УДК 629.7.02:620.22

### СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ФОРМОВАНИЯ В АВТОКЛАВЕ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ТИПА ОТКРЫТЫХ ОБОЛОЧЕК

© 2016 И.В. Тарасов<sup>1,2</sup>, М.Б. Флек<sup>3,4</sup>, С.Н. Шевцов<sup>2,5</sup>, В.Н. Аксенов<sup>6</sup>

<sup>1</sup> ООО «АйПиГрупп», г. Санкт-Петербург
<sup>2</sup> Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону
<sup>3</sup> ПАО «Роствертол», г. Ростов-на-Дону
<sup>4</sup> Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону
<sup>5</sup> Южный научный центр Российской академии наук, г. Ростов-на-Дону
<sup>6</sup> ПАО «Московский вертолетный завод им. М.Л. Миля»

Статья поступила в редакцию 09.02.2016

В работе рассмотрена проблема синтеза оптимального управления двухстадийным процессом полимеризации в автоклаве композитной конструкции с геометрией типа открытой оболочки переменной толщины. Синтезируемый закон управления температурным режимом должен исключить преждевременное отвердевание поверхности полимеризуемого препрега, возникновение областей обедненных и переобогащенных связующим, его ненадлежащее отверждение и неравномерность степени полимеризации в теле формуемой конструкции для максимального снижения остаточных напряжений и вызываемых ими деформаций. Поставленная цель достигается обеспечением однородности температурного поля и степени полимеризации во всем объеме препрега в течение всего цикла формования. Предлагаемый подход, включающий формулировку задачи полимеризации, ее конечно-элементную реализацию, определение корректных значений периодов нагрева и изотермической выдержки в результате решения задачи оптимизации, иллюстрируется на примере детали, имеющей геометрию типа открытой оболочки. Задача синтеза оптимального управления формулируется как задача многокритериальной оптимизации, где целевыми функционалами, подлежащими минимизации, являются вариация температуры и степени полимеризации в теле формуемой композитной конструкции при ограничениях, накладываемых термокинетическими свойствами препрега и требованиями производства. Процедура многокритериальной оптимизации, основанная на подходе Парето, и средства визуализации ее результатов позволяют оценить достижимые при заданных ограничениях показатели качества процесса, определить параметры закона управления, обеспечивающие эти показатели и принять экспертное решение о выборе наиболее приемлемого закона управления при наложенных ограничениях.

Ключевые слова: технология композитов, оптимальное управление, связанные задачи, конечноэлементное моделирование, многокритериальная оптимизация

Значительное расширение областей применения и производств армированных полимерных композитов, наблюдаемое в последние годы, особенно заметно в авиастроении, что обусловлено увеличенными кратковременной и усталостной удельной прочностью, жесткостью по сравнению с традиционно применяемыми легкими металлическими сплавами. Большая часть полимерных композитов, армированных стеклои углеволокнами, используется при изготов-лении обшивок, лонжеронов, стрингеров, нервюр, секций фюзеляжа, лопастей несущих и рулевых винтов вертолетов, бортовых сосудов высокого давления, а также различных обтекателей, имеющих форму открытых оболочек. Такого типа детали чаще всего изготавливаются путем послойной выкладки препрегов (тканей различного плетения, пропитанных термореактивным связующим) на открытые формы. Их формование, т.е. придание готовой композитной оболочке геометрии, повторяющей поверхность формы, осуществляется в результате совместного действия гидростатического давления, прижимающего препрег к поверхности формы, и температуры в течение заданного времени

[1]. Такие технологии, предусматривающие изготовление широкого спектра деталей типа открытых оболочек различной формы и размеров, обычно предусматривают такую послойную выкладку препрегов, которая обеспечивает материалу свойства, близкие к изотропии. Такие квази-изотропные сбалансированные ламинаты могут быть получены при выкладках по таким схемам как, например [0°, + 60°, - 60 °], [0°, +45°, -45°], [0°, +45°, -45°, 90°] или подобным, обеспечивающим всюду по поверхности равенство толщин каждого из слоев с противоположной ориентацией, что необходимо для исключения короблений под действием термических или эксплуатационных напряжений [1, 2]. Обычно форма, изготавливаемая из литого алюминиевого сплава с выложенным препрегом, помещенная в вакуумный мешок из тонкой термостойкой пленки. устанавливается в автоклав, где подвергается температурному воздействию со стороны циркулирующего сжатого газа, температура которого изменяется с помощью встроенной системы управления. Совместное действие вакуума, откачиваемого из вакуумного мешка, и давления газа в автоклаве обеспечивает удаление воздуха и летучих из препрега и консолидации его слоев.

На начальной стадии нагрева вязкость связующего, содержащегося в слоях препрега, снижается, достигая минимума, а затем, быстро повышается; и после перехода через состояние желатинизации реакции молекулярных сшивок способствуют переходу связующего в полностью полимеризованное твердое состояние. Обычно для завершения процесса полимеризации эпок-сидных связующих необходимо на завершающей стадии процесса выдержать температуры

Тарасов Илья Владимирович, директор. E-mail: ilya.tarasov@carbonstudio.ru

Флек Михаил Бенсионович, доктор технических наук, профессор, заместитель директора. E-mail: michflek@gmail.com Шевцов Сергей Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией. E-mail: snshevcov@sfedu.ru

Аксенов Владимир Николаевич, кандидат технических наук, ведущий специалист. E-mail: vnaxenov@mail.ru

порядка 180 °C - 200 °C [1, 3]. Рис. 1 демонстрирует типичный двухстадийный цикл полимеризации армированных стекло- и углепластиков на эпоксидном связующем.

Первая стадия цикла полимеризации включает повышение температуры с регулируемой скоростью до точки начала снижения вязкости связующего и далее, выдержку в течение некоторого времени (t hold1) при постоянной температуре *T*<sub>1</sub> (см. рис. 1) вплоть до достижения минимума вязкости связующего во всем объеме препрега. Вторая изотермическая выдержка выполняется на стадии завершения отверждения связующего; она обеспечивает достижение однородности распределения температуры и степени полимеризации связующего в теле препрега, что особенно важно при изготовлении крупногабаритных разностенных композитных конструкций и позволяет за счет увеличения продолжительности выдержки удалить из препрега выделяющиеся в процессе реакции и завершить все возникающие при полимеризации реакции молекулярных сшивок [2]. По завершении цикла полимеризации температура в автоклаве медленно снижается, тогда как давление газа поддерживается на прежнем уровне, зависящем от толщины препрега и вида используемого связующего. После завершения стадии охлаждения готовое изделие снимается с формы и в некоторых случаях может подвергаться дополнительному нагреву при несколько повышенной температуре, что сдвигает вверх диапазон температур стеклования [1-3].



Рис. 1. Типичный двухстадийный цикл полимеризации препрегов на основе термореактивных связующих

Для исключения таких источников дефектов как перегрев и преждевременное образование затвердевшей корочки на поверхности, затрудняющей удаление выделяющихся газов, образование пор, областей обедненных и переобогащенных связующим, неполное затвердевание, неравномерность степени полимеризации в объеме формуемого ламината, плохое качество наружной поверхности, необходим корректный выбор продолжительности всех четырех процессов нагревавыдержки и моментов приложения формующего давления. Средства автоматики, оснащающие современные автоклавы, позволяют осуществлять с высокой точностью мониторинг температуры, давления и, в ряде случаев, вязкости связующего (с помощью сенсоров оборудования для диэлектрического анализа, размещаемых в теле формуемых сравнительно мелких деталей). Однако имеющиеся средства не позволяют контролировать состояние материала во всем объеме достаточно крупных полимеризуемых конструкций. Это обстоятельство предопределяет тот факт, что разработка технологии формования особо ответственных композитных конструкций, как правило, следует методу проб и ошибок, как при проектировании технологической оснастки, так и при отработке корректных таймингов цикла полимеризации, что существенно увеличивает трудоемкость работ и удорожает конечный продукт. Как альтернативу этому подходу в последние годы исследовательские группы крупных авиационных корпораций промышленно развитых стран разрабатывают средства моделирования процессов полимеризации изделий из композитов, которые позволят обоснованно выбрать тип оснастки и параметры цикла полимеризации при значительном снижении объема испытаний по отработке технологии, тем самым, резко сократив производственные издержки.

Работоспособная компьютерная модель процесса должна корректно описывать связанные физикохимические явления, протекающие при полимеризации, включая распространение тепла в технологической системе, преобразования тепловых, кинетических и реологических свойств материала на всех стадиях цикла полимеризации, и учитывая весь спектр ограничений, накладываемых характеристиками используемого технологического оборудования, оснастки, свойствами материала и т.п. Для получения необходимой информации требуется проведение предварительных испытаний связующих и препрегов методами дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК), диэлектрического (ДЕА) и динамического механического анализа (ДМА) с последующей идентификацией свойств материала на всех стадиях цикла полимеризации. Из-за сложности математического описания протекающих связанных процессов и особенностей геометрии формуемых деталей наиболее эффективным и используемым большинством автором является метод конечных элементов, позволивший успешно реализовать модельное описание группы разновидностей процессов формования полимерных композитов [4-9]. Конечноэлементная реализации модели связанных процессов распространения тепла и полимеризации в телах произвольно сложной конфигурации позволяет сформулировать задачу оптимизации, в которой значение степени полимеризации в финальной стадии процесса, ее вариация и разброс температуры в теле формуемой конструкции в течение всего цикла, могут быть приняты в качестве целевых функций, в то время как временные зависимости температуры и давления приняты в качестве варьируемых переменных закона управления (переменных дизайна). Такой подход, реализованный некоторыми авторами в работах последних лет [10-13], позволил синтезировать оптимальный закон управления режимом процесса, обеспечивающий наилучшие показатели его качества за приемлемую длительность технологического цикла, а также определить доступные для мониторинга параметры (температуры в определенных точках формы или на поверхности препрега), характеризующие состояние процесса.

В задачах производства, когда сложно выделить какой-то один показатель качества или эффективности процесса, наиболее продуктивна формулировка задачи оптимизации как многокритериальной, когда область варьируемых переменных дизайна отображается на область N-мерного пространства целевых критериев; и ее результатом является некоторое псевдо-оптимальное решение, полученное как результат удовлетворения всей системы различных ограничений и компромисса между допустимыми длительностью технологического цикла, градиентом температуры и однородностью степени полимеризации в объеме полимеризуемого препрега.

Описываемый подход, использующий процедуру многокритериальной оптимизации модели процесса для синтеза закона оптимального управления, иллюстрируется ниже на примере процесса полимеризации обтекателя бортового радара из стеклопластика (см. рис. 2). Деталь, имеющая форму открытой оболочки с толщиной стенок, варьируемой в диапазоне 4-6,5 мм, изготавливается методом выкладки сырого препрега на открытую форму и последующим автоклавным формованием в вакуумном мешке. Связанная задача, включает описание процессов теплопередачи и термокинетики, сходное [13], но с отличающимися граничными условиями (свойственными для автоклавного формования), и зависимостями теплофизических и реологических свойств от температуры и степени полимеризации, определенными в результате предварительно выполненных испытаний материала методами ДСК и ДЕА.



Рис. 2. Общий вид конструкции обтекателя, формуемого из стеклопластика

Для двухстадийного цикла полимеризации выполняется оптимизация длительностей первого, второго наборов температуры (скоростей нагрева) и обеих изотермических выдержек с целью мини-мизации температурного градиента и степени полимеризации в теле детали в течение всего цикла полимеризации при ограничениях на максимальную продолжительность каждого этапа разогрева и цикла в целом. С целью проверки выводов и рекомендаций, изложенных в монографии [1], в работе также изучалось влияние материала формы на целевые характеристики процесса.

I. Модель связанных процессов теплопередачи и термокинетики при полимеризации препрега с термореактивным связующим.

Формулировка связанной задачи включает уравнение теплопроводности

$$\rho_{c/m}C_{c/m}\partial T/\partial t + \nabla \left(-k_{c/m}\nabla T\right) = \begin{cases} Q_{exo} \\ 0 \end{cases}, \quad (1)$$

вместе с кинетическим уравнением, принятым для рассматриваемого препрега в форме Камала [14, 15]

$$\partial \alpha / \partial t = A_2 \exp(-E_2 / RT) \cdot \alpha^m \cdot (1 - \alpha)^n$$
. (2)

Индексы <br/> c и mу плотности материалов <br/>  $\rho_{{\it c}/m}$ , удельной теплоемкости  $C_{{\it c}/m}$  и коэффициента

температуропроводности  $k_{c/m}$  в уравнении (1) обозначают материал препрега и формы соответственно (см. рис. 3). Интенсивность распределенных тепловых источников  $Q_{ava}$  представляет собой удельное экзотермическое тепло, выделяющееся в объеме композита, в материале формы тепловые источники отсутствуют. В кинетическом уравнении (2) для степени полимеризации lpha , которая определяется как отношение количества тепла, выделившегося в единичном объеме в течение некоторого периода протекания процесса полимеризации, к полной энтальпии реакции  $Q_{\scriptscriptstyle tot}$ ,  $A_{\scriptscriptstyle 2}$  предэкспоненциальный фактор,  $E_{\rm 2}\,$  - энергия активации, *R* - газовая константа, *m*, *n* - порядки реакции. Уравнение (2) показывает, как локальное значение степени полимеризации эволюционирует в зависимости от температуры T, чье пространственное распределение в каждый момент времени описывается уравнение теплопроводности (1). В свою очередь, коэффициенты  $C_c, k_c$  и интенсивность распределенных в пространстве тепловых источников  $Q_{exo}$  в уравнении (1) зависят от локального состояния препрега, которое определяется степенью полимеризации связующего. Значение О определяется соотношением [15]



Рис. 3. Геометрия моделируемой системы

Зависимости параметров  $C_c(\alpha), k_c(\alpha)$  от степени полимеризации определялись по аналогичным эмпирическим формулам

$$P_{c}(\alpha) = P_{c}^{raw} - \left(P_{c}^{fpol} - P_{c}^{raw}\right) \cdot H\left(\alpha^{gel}, \delta\alpha\right), \tag{4}$$

где каждое из свойств полимеризуемого материала  $C_c(\alpha)$  и  $k_c(\alpha)$  зависит от его исходного значения до начала цикла полимеризации (верхний индекс *raw*), от значения в полностью полимеризованном состояния (верхний индекс *fpol*), первый аргумент сглаженной функции Хевисайда H представляет собой степень полимеризации  $\alpha^{gel}$ , соответствующую стадии начала желатинизации. Перечисленные параметры, описывающие изменение теплофизических свойств материала в течение всего цикла полимеризации, определялись по результатам экспериментов.

Начальное значение абсолютной температуры *T* соответствовало значению 20 °С всюду в моделируемых областях. Так как зависимая переменная  $\alpha(t)$  в уравнении (2) может эволюционировать только при ненулевых начальных условиях, т.е.  $\alpha(0) > 0$ , это начальное значение определялось по результатам ДСК сканирования. Идентификация начального значения  $\alpha(0)$  производилась вместе с параметрами кинетического уравнения  $A_2, E_2, m, n$ . Граничные условия задачи отличались от случая пресскамерного формования, рассмотренного в [7, 13]. Все внешние поверхности, за исключением теплоизолированной нижней опорной поверхности формы, подвергались действию одной и той же температуры T(t), закон изменения которой графически представлен на рис. 1. Для упрощения конечноэлементного разбиения (см. рис. 4) тепловым сопротивлением и, следовательно, наличием тонкой пленки вакуумного мешка пренебрегали. Две температуры изотермических выдержек Т1, Т2 были фиксированы значениями, полученными из ДСК и ДЕА а четыре тайминга тестов, *t*\_*heat*<sub>1</sub>,*t*\_*hold*<sub>1</sub>,*t*\_*heat*<sub>2</sub>,*t*\_*hold*<sub>2</sub> (см. рис. 1) были варьируемыми переменами дизайна, подлежащими оптимизации.



Рис. 4. Конечноэлементное разбиение моделируемой системы

Значительная разность толщин детали типа тонкостенной оболочки и формы, геометрия которых была импортирована из САD моделей, потребовала весьма частого конечноэлементного разбиения (см. рис. 4), что определяло значительную вычислительную трудоемкость решения прямой задачи. Для преодоления этой трудности использовался распределенный решатель, встроенный в конечноэлементную систему Comsol Multiphysics.

#### II. Идентификация параметров процесса полимеризации.

Для определения четырех параметров кинетического уравнения (2), an initial value of conversion  $\alpha(0)$ , значения общего выделившегося экзотермического тепла  $Q_{tot}$  , а также теплоемкостей препрега при минимальной вязкости связующего и в его твердом состоянии, экспериментальное исследование методом динамического ДСК проводилось на оборудовании NETZSCH DSC 200 F3 Maia. Исследуемые образцы препрега подвергали нагреву со скоростями 1, 1.5 и 2 К/мин от начальной температуры -20°С до 250°С. Повторный нагрев образцов не выявлял никаких температурных пиков, что свидетельствовало о полном завершении реакций полимеризации в течение первого нагрева, т.е. о достижении степенью полимеризации предельного значения α=1. Зависимости дифференциального теплового потока от времени и температуры экспортировались в виде текстовых файлов, которые затем обрабатывались численно для исключения вклада теплоемкости в общий тепловой поток. Идентификация всех 5 искомых параметров кинетического уравнения (2) производилась с использованием инструментария Genetic Algorithm Toolbox MATLAB © (см. рис. 5), который минимизировал функционал невязок методом, изложенным в работах [17, 18]

$$\min_{A_2,E_2,m,n,\alpha_0} \Phi = \int_0^{tend} \left| \dot{\alpha}_{\exp} - \dot{\alpha}_{\mathrm{mod}} (A_2,E_2,m,n,\alpha_0,t) \right| dt , \qquad (5)$$

где  $\alpha_{\exp}, \alpha_{mod}$  - значения скоростей реакции, наблюдаемые экспериментально и вычисляемые из уравнения (2), соответственно,  $t_{end}$  -- момент окончания ДСК сканирования. Для исследованного препрега значения  $A_2, E_2, m, n, \alpha_0$  представлены в табл. 1.





Исследование реологических превращений препрега в течение цикла полимеризации выполнялось на оборудовании для диэлектрического мониторинга NETZSCH DEA 230/2 Epsilon с штатным программным обеспечением Proteus®, позволявшим сглаживать высокочастотные шумы, генерируемые внешними электромагнитными полями. Образцы подвергали линейному нагреву с постоянной скоростью и двухстадийному циклу, аналогичному представленному на рис. 1 с изменяемыми скоростями нагрева на частотах 1 и 10 Hz, которые обеспечивали наилучшее разрешение и воспроизводимость результатов.

Зависимости логарифма ионной вязкости после сглаживания подвергались численной обработке для идентификации критических точек процесса полимеризации термореактивного связующего [19]: СР(2) — Минимум ионной вязкости, который обычно соответствует минимуму механической вязкости. Эта критическая точка указывает на момент, когда интенсивность реакций молеку-лярных сшивок начинает доминировать над процессом ожижения связующего. СР(3) — Точка перегиба, указывающая на начало замедления реакций сшивок, как пра-вило, ассоциируемая с процессом желатинизации.

СР(4) — Определяемый экспертом наклон термограммы, используемый для прогноза момента окончания процесса полимеризации.

Таблица 1. Результаты идентификации параметров кинетического уравнения (2) для исследуемого препрега

Термокинетические параметры препрега								
A2, 1/c	Е2, Дж/кг	т	п	α(0)	Q <sub>tot</sub> , Дж/кг			
9,66e-3	2,49e6	1,035	1,374	1,01e-6	1,106e5			

Эти точки (см. рис. 6) определяют моменты времени, когда связующее испытывает фазовые превращения, т.е. моменты и температуры, когда материал изменяет свою удельную теплоемкость  $C_{c/m}$ , коэффициент температуропроводности  $k_{c/m}$ , а также момент, при котором необходимо приложение формующего внешнего давления в автоклаве. Определение координат точек СР(2), СР(3) производилось путем аппроксимации соответствующих отрезков термограмм многочленами второго и третьего порядка, соответственно, с последующим нахождением точек экстремума и перегиба на аппроксимантах.

Изменение теплопроводности препрега при переходе связующего из вязко-текучего в твердое состояние определялось по методу лазерной вспышки на оборудовании NETZSCH LFA 467. Переход коэффициента температуро-проводности характеризуется его начальным значением 0,2 [Вт/(м×К)] (вязко-текучее состояние), значением, соответствующим полностью отвержденному состоянию 0,08 [Вт/(м×К)], и диапазоном температур перехода ~110-150°С.



Рис. 6. Пример термограммы ДЕА сканирования для определения критических точек процесса полимеризации связующего в препреге

# Ш. Синтез оптимального двухстадий-ного цикла полимеризации.

Численная процедура многокритериальной оптимизации была организована следующим образом. Конечноэлементная модель всей технологической системы (препрег, выложенный на форму) была конвертирована в скрипт MATLAB, который вызывал бинарный файл модели, сгенерированный системой Comsol для каждого набора варьируемых переменных дизайна. Алгоритм оптимизации «засевал» точки в пространстве переменных дизайна, отображая их на область пространства целевых критериев. Результаты вычислений сохранялись в текстовом файле, который программно обрабатывался для удовлетворения наложенных ограничений и реконструкции области оптимума. Четыре тайминга двухстадийного цикла полимеризации были ограничены неравенствами  $t\_heat_1, t\_heat_2 \leq 60$  мин, а длительность полного цикла ограничивалась величиной 180 мин, что было обусловлено условиями производства. Целевые критерии процесса, вычисляемые путем интегрирования и усреднения по объему  $\Omega$  полимеризуемого композита, включали:

- степень полимеризации на момент завершении цикла

$$t_{end} = t \_heat_1 + t \_hold_1 + t \_heat_2 + t \_hold_2$$
  
$$\langle \alpha \rangle_{end} = \int_{\Omega} \alpha(\mathbf{r}, t_{end}) \cdot dv / V, \qquad (6)$$

которая не должна быть менее 0,98;

 максимальное рассеяние средней девиации степени конверсии в течение всей продолжительности цикла

$$\left\langle \Delta \alpha \right\rangle = \max_{t \in [0; t_{end}]} \int_{\Omega} \left| \alpha(\mathbf{r}, t) - \left\langle \alpha \right\rangle \right| \cdot dv / V , \qquad (7)$$

подлежащее минимизации.

Для оценки однородности температурного поля в теле препрега на первой и второй стадии набора температуры ее средняя девиация рассчитывалась согласно соотношениям

$$\langle T(t) \rangle_{1,2} = \int_{\Omega} T(\mathbf{r}, t) \cdot dv / V; \quad at \quad t \in \begin{cases} [0; t_1] \\ [t_2; t_3] \end{cases};$$
 (8)

$$\left\langle \Delta T \right\rangle_{1,2} = \max_{\substack{t \in \left[ [0,t_1] \\ [t_1,t_2] \right] \Omega}} \int_{\Omega} \left| T(\mathbf{r},t) - \left\langle T(t) \right\rangle_{1,2} \right| \cdot d\nu / V, \qquad (9)$$

и затем точки в пространстве целевых критериев оценивались для поиска приемлемого минимума критериев (7) и (8). Изменением объема препрега V в результате приложения формующего давления пренебрегали в связи с малостью этого изменения.

Концепция Парето-оптимальности, предполагающая реконструкцию фронта Парето [20] и использованная в настоящей работе, широко используется при решении задач многокритериальной оптимизации, составной частью которых является принятие экспертных решений. К сожалению, множество и фронт Парето при более чем трех целевых критериев не могут быть наглядно визуализированы с использование традиционных 2-D и 3-D изобразительных средств. Техника визуализации многомерных объектов пытается преобразовать такие объекты или множества данных так, чтобы они отображались в виде 2-D или 3-D изображений. Для этой цели используется один из трех групп приемов [21]:

 техника, использующая наборы двумерных изображений (проекций или сечений);

 техника, использующая цвет или дополнительные символы, обеспечивающие визуализацию третьей или четвертой размерности;

- техника, использующая анимацию, где время играет роль дополнительной размерности.

В рассматриваемой задаче, где закон управления параметризован четырьмя величинами  $t\_heat_1;t\_hold_1;t\_heat_2;t\_hold_2$ , полностью и однозначно характеризующими управляющее воздействие на технологическую систему, компонентами вектора выхода объекта управления являются 4 целевых функционала, на вход и выход наложены три ограничения, наиболее удобным для визуализации результатов и понимания сложных процессов, протекающих при полимеризации композита, является первый подход. Мы используем отдельные проекции подмножества в пространстве целевых критериев на двумерные подпространства переменных дизайна, где эти проекции изображаются в виде линий уровня соответствующего критерия. Некоторые результаты оптимизации процесса представлены на рис. 7-10. Четырех-, пяти- и шестиконечные маркеры на графиках обозначают три закона управления, параметры которых представлены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры законов управления, обозначенных маркерами на рис. 7-10

Режим	Маркер	Тайминги (мин)				
		t_heat1	t_hold1	t_heat2	$t_hold_2$	
1	+	45	17	45	13	
2	*	50	17	50	13	
3	*	55	25	55	15	

Мелкие артефакты на линиях уровня (см. рис. 7, 8) вызваны ограниченным количеством численных экспериментов – решений прямой задачи моделирования, которое составляло около 5000. Графики показывают, что скорость нагрева на первой стадии цикла оказывают значительно большее влияние на максимальное рассеяние степени полимеризации  $\langle \Delta \alpha \rangle$ , чем

скорость нагрева на второй стадии. Это очень важный и достаточно неожиданный результат, т.к. при первичном нагреве препрега процессы молекулярных сшивок еще не стартовали (см. рис. 5). Тем самым показано, что скорость первичного нагрева оказывает определяющее влияние на качество процесса.



**Рис. 7.** Линии уровня для максимальной вариации степени полимеризации в теле препрега в течение всего цикла (сплошные линии), на которые наложены линии уровня для полной длительности цикла в мин (пунктир). Проекция на плоскость (*t heat*<sub>2</sub>, *t heat*<sub>1</sub>)

Максимальная девиация температуры  $\langle \Delta T \rangle_{1,2}$  в теле препрега на первой и второй стадии нарастания температуры зависит по близкому к линейному закону

от скоростей нагрева, тогда как от длительности второй изотермической выдержки зависимость очень слабая. Этот вывод подтверждается, в частности, временными диаграммами на рис. 9, 10. Когда управляемый рост температуры в автоклаве останавливается, температура в тонких стенках препрега быстро выравнивается, благодаря высокой теплопроводности алюминиевой формы.



Рис. 8. Линии уровня для максимальной вариации степени полимеризации в теле препрега в течение всего цикла, спроектированные на плоскость (t\_heat<sub>i</sub>, t\_hold<sub>i</sub>)

Дополнительное исследование влияния теплопроводности материала формы на одно-родность полей степени полимеризации и температуры, проведенное нами, показало, что качество процесса повышается с ростом теплопроводности материала формы. Вместе с тем для снижения тепловой инерционности формы желательно уменьшение ее массы. С этой целью в нижней плоскости формы, представленной на рис. 3, 4, выполнен глубокий карман, уменьшающий массу формы примерно на 40%. Этот результат подтверждает рекомендации, приведенные в монографии [1], а разработанная методика моделирования и оптимизации процесса формования композитных конструкций позволяет получить количественную оценку влияния материала и геометрии формы на качество процесса.

Приведенные графики, иллюстрирующие результат решения задачи оптимизации процесса полимеризации композитного обтекателя, имеющего форму открытой оболочки, позволяет с учетом имеющихся ограничений принять обоснованное решение о выборе параметров закона управления температурой в автоклаве. Необходимо отметить, что представленные результаты дают правильное качественное описание процесса, зависимости его показателей качества от параметров закона управления. Однако правильные количественные выводы могут быть сделаны только с учетом геометрии конкретной композитной конструкции, формы и всего комплекса свойств материалов.



**Рис. 9.** Временные зависимости средней температуры и ее вариации в теле препрега для трех режимов полимеризации (см. табл. 2)



Рис. 10. Временные зависимости средней степени полимеризации и ее вариации в теле препрега для трех режимов полимеризации (см. табл. 2)

#### Выводы:

1. Задача синтеза оптимального управления процессом полимеризации композитной конструкции типа открытой оболочки, формуемой под вакуумом в автоклаве, сформулирована и решена как задача многокритериальной оптимизации для обеспечения минимальной вариации температуры и степени полимеризации материала в теле формуемого препрега в течение всего цикла полимеризации с учетом ограничений, накладываемых термокинетическими свойствами препрега и другими требованиями производства.

2. Прямая задача моделирования нестационарного процесса полимеризации композитной конструкции использующая ее геометрию, экспортируемую из САD модели, описывает термокинетические явления в препреге в течение всего двухстадийного цикла полимеризации. Входными параметрами модели процесса, реализованной в конечно-элементном комплексе Comsol Multiphysics, являются тайминги, формирующие закон управления температурой в автоклаве и представляющие собой точки в четырехмерном пространстве варьируемых переменных дизайна. На выходе модели, формируемом по завершении нестационарного анализа, который охватывает продолжительность всего цикла полимеризации – критерии качества процесса, вычисляемые на каждом временном шаге интегрированием по объему полимеризуемого препрега. Все тепло-физические, термокинетические и реологически свойства полимеризуемого материала, входящие в модельные уравнения, идентифицированы с использованием результатов предварительно выполненных экспериментальных исследований методами ДСК и ДЕА.

3. Процедура многокритериальной оптимиза-ции реализована в форме скрипта MATLAB, вызывающего для каждого набора входных параметров модели полимеризации бинарный файл конечноэлементной модели прямой задачи. Алгоритм оптимизации выполняет отображение точек в пространстве переменных дизайна на область пространства целевых критериев. Для обеспечения наглядности результатов многокритериальной оптимизации закона управления процессом мы используем набор 2-D графиков, представляющих собой проекции подмножеств в пространстве целевых критериев, удовлетворяю-щих ограничениям, на 2-D подпространства переменных дизайна, где эти проекции представлены линиями уровней выбираемых целевых критериев.

4. Наше исследование подтвердило и позволило дать количественную оценку влияния теплофизических свойств материала формы на качество и производительность процесса. Показано, что наилучшие показатели качества достигаются при максимально высокой теплопроводности материала формы и его минимальной тепловой инерции (массе), особенно, при использовании открытых форм. Представленный подход к проблеме моделирования и оптимизации управления процессом полимеризации препрега на основе термореактивного связующего, средства визуализации и реконструкции области оптимума, позволяют понять сложный характер явлений при полимеризации, оценить максимально достижимые показатели качества процесса, найти значения удовлетворяющих ограничениям параметров закона управления и принять обоснованное экспертное решение по их выбору.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- Baker, A. Composite Materials for Aircraft Structures / A. Baker, S. Dutton, D. Kelly. – Reston, Virginia: AIAA ltd., 2004. 597 p.
- Mallick, P.K. Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design. 3-rd ed. Boca Raton, FL.: CRC Press, 2007. 650 p.
- Слюсарь, Б.Н. Технология вертолетострое-ния. Технология производства лопастей вертолетов и авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов / Б.Н. Слюсарь, М.Б. Флек, Е.С. Гольдберг, С.Н.Шевцов // Издательство ЮНЦ РАН. 2013. 230 с.
- Park, H.C. Cure Simulation of Thick Composite Structures Using the Finite Element Method / H.C. Park, S.W. Lee // J. Comp. Mat. 2001. Vol. 35. P. 188-201.
- Melnik, R.V.N. Models for Coupled Kinetics and Heat Transfer in Processing Polymeric Materials with Applications to Biochemical Engineering // Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. 2002. No.10. P. 341-357.

- Slusar, B. Mould Heating Distribution Control System Simulation for Polymerization of a Composite Spar for Helicopter Main Rotor Blade / B. Slusar et al. - Proc. Femlab Conf., Stockholm, 2005, P. 237-244.
- Jiazhong, X. Numerical Simulation Research on Curing Process of Composite Overwrap Considering a Die Model / Jiazhong, X. et al. // J. Reinf. Plast. and Comp.2013. Vol. 32. P. 1393-1405.
- Liu, X.L. Heat Transfer Analysis and Cure Modelling of Composite Repairs for Pipelines / X.L. Liu et al. // J. Reinf. Plast. and Comp. 2014. Vol. 33. P. 586-597.
- Liang, G. Cure Kinetics and Rheology Characterization of Soy-Based Epoxy Resin System / G. Liang, K. Chandrashekhara // J. of Appl. Polym. Sc. 2004. No. 916. P 3513-3538.
- Oh, J.H. Cure Cycle for Thick Glass/Epoxy Composite Laminates / J.H. Oh, D.G. Lee // J. Comp. Mat. 2002. No. 36. P. 19-44.
- 11. *Saad, A.* Optimization of the Cycle Time in Resin Transfer Molding Process by Numerical Simulation / *A. Saad, A. Echchelh, M. Hattabi, M.E. Ganaoui* // J. Reinf. Plast. and Comp.2012. No. 31. P. 1388-1399.
- Jahromi, P.E. Prediction and Optimization of Cure Cycle of Thick Fiber-Reinforced Composite Parts Using Dynamic Artificial Neural Network / P.E. Jahromi, A. Shojaei, S.M.R. Pishvaie // J. Reinf. Plast. and Comp. 2012. No. 31. P. 1201-1218.
- Shevtsov, S. Optimization of the Composite Cure Process Based on Thermo-Kinetic Model / S. Shevtsov et al. // Adv. Mat. Res. 2012. No. 569. P.185-192.

- Koorevaar, A. Fast, Accurate, Reliable 3D Reactive RTM Simulation. – Proc. ISCM 2002 Conf., Vollenhove, Nedherland, 2002, P.12.
- Kamal, M.R. Kinetics and Thermal Characterization of Thermoset Cure / M.R. Kamal, S. Sourour // Polym. Eng. and Sc. 1973. No. 13. P. 59-64.
- Um, M.-K. A Study of Cure Kinetics by the Use of Dynamic Scanning Calorimetry / M.-K. Um, I.M. Daniel, B.-S. Hwang // Comp. Sc. and Techn. 2002. Vol. 62. P. 29-40.
- Hardis, R. Cure Kinetics Characterization and Monitoring of an Epoxy Resin Using DSC, Raman Spectroscopy, and DEA / R. Hardis et al. // Composites: Part A. 2013. Vol. 49. P.100– 108.
- Wu, J.-K. Identification of Thermoset Resin Cure Kinetics Using DSC and Genetic Algorithm / J.-K. Wu, J.-P. Huang, S. Shevtsov, L. Chinchan // Proc. Int Conf. on Information Science, Electronics and Electrical Engineering (ISEEE 2014). – Sapporo, Japan, 2014, P. 6.
- Lee, H.L. The Handbook of Dielectric Analysis and Cure Monitoring. – Boston, MA, Lambient Technology LLC, 2014. P. 156.
- Tarantola, A. Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation. – Philadelphia, PA: SIAM ltd., 2005. P. 358.
- Agraval, G. Intuitive Visualization of Pareto Frontier for Multi-objective Optimization in N-Dimensional Performance Space / G. Agraval et al. – Proc. 10<sup>th</sup> AIAA / ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conf., Albany, N.-Y., 2004. P. 11.

## SYNTHESIS OF OPTIMAL CONTROL FOR CURING THE SHELL-LIKE COMPOSITE STRUCTURES AT THE AUTOCLAVE PROCESSING

© 2016 I.V. Tarasov<sup>1,2</sup>, M.B. Flek<sup>3,4</sup>, S.N. Shevtsov<sup>2,5</sup>, V.N. Aksenov<sup>6</sup>

<sup>1</sup>«AP Group» LLC, Saint-Petersburg
<sup>2</sup> Southern Federal University, Rostov-on-Don
<sup>3</sup> «Rostvertol Helicopters Co.», Rostov-on-Don
<sup>4</sup> Don State Technical University, Rostov-on-Don
<sup>5</sup> South Center of RAS, Rostov-on-Don
<sup>6</sup> Mil Moscow Helicopter Plant, Rostov branch, Rostov-on-Don

The paper study a problem of optimal control synthesis for curing the shell-like composite structure using open die molding in autoclave. The needful control should eliminate early hard skin formation, an emergence of resin-rich or resin-dry areas, insufficient consolidation, and uneven cure. This purpose can be achieved providing the uniform distributions of temperature and degree of cure within the cured part volume. The used approach which includes the cure problem formulation, its finite element implementation, where the correct timing of heating-up and iso-thermal holds should be found by the optimization procedure, is illustrated on the example of shell-like composite part manufactured by two stages curing in autoclave. The control synthesis problem is formulated as multi-objective optimization problem where minimized objectives are the deviations of temperature and degree of cure within a cured part at the constraints imposed by thermal-kinetics properties of pre-preg and the manufacturing requirements. The Pareto-based optimization procedure and means of its results visualization allow to estimate the best achievable quality of manufactured composite parts, to find the satisfactory parameters of control law, and decision-making considering all imposed constraints.

Key words: composite technology, optimal control, coupled problems, finite-element modeling, multiobjective optimization

- Sergey Shevtsov, Doctor of Technical Sciences, Chief of the Laboratory. E-mail: snshevcov@sfedu.ru
- Laboratory. E-mail: Silsievcov@Sjeau.ru

Iliya Tarasov, Director. E-mail: ilya.tarasov@carbonstudio.ru Mikhail Flek, Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy

Director. E-mail: michflek@gmail.com

Vladimir Aksenov, Candidate of Technical Sciences, Leading Specialist. E-mail: vnaxenov@mail.ru