Котенко В.Д., Абраумов В.В., Глебов И.В., Синюков Н.В.
Вакуумная технология изготовления многослойных препрегов

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)
(Россия, Мытищи)*

doi:10.18411/spc-12-12-2017-16

idsp: 000001:spc-12-12-2017-16

Аннотация

Рассматриваются проблемы, связанные с использованием вакуумной технологии для изготовления многослойных препрегов. Показано, что повышенное содержание полимера в таких препрегах может быть обеспечено многократной пропиткой и сушкой в вакууме. Изготовлене препрегов производится в специальных устройствах (кассетах), обеспечивающих равномерное распределение связующего по поверхности пропитываемого полотна и устраняющих его контракцию при вакуумной сушке. Повышенное содержание летучих продуктов в полученном по вакуумной технологии препреге не оказывает влияния на характеристики изготовленных из них деталей. Требуемое содержание летучих продуктов может быть обеспечено дополнительной сушкой препрега под вытяжным зонтом. Значительное удешевление стоимости производства многослойных препрегов, изготовленных по вакуумной технологии, открывает широкие возможности для применения этих материалов в различных устройствах, работающих в условиях интенсивного теплового нагружения.

Ключевые слова: композиты, препреги, связующее, армирующий наполнитель, кривая сушки, вакуумная пропитка.

Введение

Многослойные препреги являются полуфабрикатами, из которых изготавливаются композиционные материалы, применяемые, в основном, в аэрокосмической отрасли. В космонавтике такие композиты используются в качестве абляционных материалов для тепловой защиты возвращаемых на землю космических аппаратов [1]. При входе в плотные слои атмосферы от действия высокой температуры торможения абляционная защита на поверхности космического аппарата постепенно сгорает, разрушается и уносится потоком газа. Этот процесс сопровождается поглощением большого количества теплоты, что ограничивает тепловой поток внутрь материала. В качестве связующего в таких материалах применяется фенолоформальдегидная смола резольного типа, которая имеет высокое коксовое число. Раскалённый кокс способствует интенсификации теплового излучения в соответствии с законом Стефана-Больцмана [2, 3]. Армирующими наполнителями являются кремнезёмные и кремнезёмно-капроновые ткани. Материалы из этих тканей отличаются долговечностью, повышенной устойчивостью к коррозии, высокой прочностью, стойкостью к разложению, износу и воздействию химикатов. Для изготовления многослойных препрегов используют маты (полотна) из этих тканей. Маты требуемой толщины (до 24 мм – 24 сложения) набираются из предварительно соединённых на вязально-прошивной машине пакетов из двух слоёв ткани путём последовательной прошивки переплетением «трико» каждого последующего пакета со всеми предыдущими.

К препрегам из таких полотен предъявляются повышенные требования по содержанию фенолоформальдегидной смолы: 30...50% из кремнезёмных тканей, не менее 40% из кремнезёмно-капроновых тканей. Эти требования обусловлены тем, чтобы композиционные материалы, изготовленные из таких препрегов, имели минимальную пористость, что исключит концентрацию тепловых напряжений на

поверхности теплозащитного материала. Пропитать пакеты чистой фенолоформальдегидной смолой невозможно, так как она обладает большой вязкостью. Поэтому для пропитки используется бакелитовый лак ЛБС-4, представляющий собой раствор фенолоформальдегидной смолы в этиловом спирте, массовая доля смолы в котором составляет 50...60%, воды не более 9%. После пропитки бакелитовым лаком препреги подвергаются сушке при комнатной температуре. Содержание летучих продуктов (этиловый спирт + вода) в высушенном препреге должно быть: из кремнезёмных тканей 3...6%, из кремнезёмно-капроновых тканей 7...13%.

Препреги, отвечающие приведенным выше требованиям, в настоящее время получают длительной пропиткой (более 700 часов) в ваннах, заполненных бакелитовым лаком, с последующей сушкой под вытяжным зонтом. Такая технология является не только достаточно затратной, но и представляет экологическую и производственную опасность.

Основная часть.

Альтернативой существующей технологии изготовления многослойных препрегов является вакуумная технология, при которой пропитка полотен бакелитовым лаком осуществляется в герметичной форме под вакуумом. Вакуумная технология позволяет значительно сократить время пропитки, полностью исключить потери связующего, существенно уменьшить экологическую и производственную опасность, обеспечить автоматизацию процесса пропитки [4, 6].

Одноразовая пропитка полотна бакелитовым лаком не обеспечивает требуемое содержание смолы в препреге.

Расчёты и эксперименты показали [5], что одноразовая пропитка полотен бакелитовым лаком не обеспечивает требуемого содержания смолы в препреге. Если допустить, что все поры будут заполнены смолой (предельное содержание смолы), то это требование выполняется (табл. 1). Чтобы обеспечить требуемое содержание смолы в препреге необходимо проводить многократную пропитку, сочетая её с вакуумной сушкой. В этом случае объём удаляемых летучих продуктов при вакуумной сушке будет замещаться объёмом бакелитового лака при вакуумной пропитке и при проведении определённого количества таких циклов (вакуумная пропитка + вакуумная сушка) в препреге может быть обеспечено требуемое содержание смолы.

Проведенные расчёты и эксперименты показали, что после 3-х циклов вакуумной пропитки и сушки (при каждом цикле вакуумной сушки удаляется ~50 масс. % спирта) в препрегах обеспечивается требуемое содержание смолы (табл. 2).

Таблица 1

Расчётное и предельное содержание смолы в опытных образцах

Полотно	Пористость, 1	Расчётное содержание смолы в полотне при содержании ФФС в лаке, масс. %		Содержание смолы в препреге по результатам опытной вакуумной пропитки, масс. %	Предельное содержание смолы в полотне, масс. %
		50	60		
Кремнезёмное	0,591	25,5	29,1	–	46
Кремнезёмно-капроновое	0,546	28,9	32,8	27,2; 30,8; 30,1	50

Таблица 2

Содержание смолы в заготовках при проведении 3-х параллельных пропиток

Полотно	Количество сложений	№ пропитки	Размер заготовки, мм	Заданное содержание смолы, мас. %	Содержание смолы после пропитки, мас. %	Содержание летучих продуктов, мас. %
Кремнезёмное	12	1	145x145	50	48,45	15,5
	16	2	145x145	50	45,2	17,07

	16	3	145x145	50	42,42	17,7
Кремнезёмно-капроновое	11	1	300x300	46	37,12	9,27
	11	2	300x300	46	37,13	10,76
	11	3	300x300	46	37,21	9,74

При вакуумной пропитке «снизу – вверх» происходит «всплытие» заготовки, а при вакуумной сушке наблюдается контракция полотна.

Для устранения этих явлений при пропитке была разработана специальная кассета, в которой имеется прижимная решётка и «заневоливающая» рамка (рис. 2).

1 – прижимная решетка; 2 – заготовка; 3 – «заневоливающая» рамка;
4 – основание; 5 – трубки для подачи лака; 6 – распределитель

Рисунок –1. Кассета для пропитки заготовок

Равномерная пропитка заготовки обеспечивается за счёт распределённой подачи лака по поверхности заготовки

Содержание летучих продуктов в образцах после 3-х кратной вакуумной пропитки и сушки больше требуемых значений (табл. 2).

Для построения кривой сушки препрега была изготовлена заготовка из кремнезёмно-капронового полотна (16 слоёв) размером 145 x 145 мм, которая была помещена в кассету и пропитана бакелитовым лаком ЛБС-4. Кассета с пропитанной бакелитовым лаком заготовкой помещалась в герметичную камеру, в которой поддерживалась температура 250С и давление несколько ниже парциального давления паров этилового спирта, но значительно выше парциального давления паров воды, т.е. реализовали вариант испарения спирта с поверхности заготовки. Таким образом, вода из бакелитового лака в процессе вакуумной сушки практически не удалялась. Взвешивание кассеты производилось через каждые десять минут. Сушка производилась до установления постоянной массы.

В результате обработки экспериментальных данных получены следующие уравнения регрессии:

- для расчёта среднего изменения содержания этилового спирта $\bar{U}_c$

$$\bar{U}_c(t) = 16,697 - 0,872 \cdot t + \exp(-t/10), \quad 0 \leq t \leq 120; \quad (1)$$

- для расчёта среднего изменения содержания летучих продуктов (этиловый спирт + вода) $\bar{U}_{cv}$

$$\bar{U}_{cv}(t) = 21,456 - 0,878 \cdot t + \exp(-t/10), \quad 0 \leq t \leq 120, \quad (2)$$

где t – время, мин (при проведении расчётов в уравнения (1), (2) необходимо подставлять $t/10$).

На графике (рис. 2) нанесены экспериментальные данные изменения влажности препрега в процессе вакуумной сушки и результаты расчёта по уравнениям регрессии (1) и (2).

1, 3 – экспериментальные значения $\bar{U}_c$ и $\bar{U}_{cv}$; 2, 4 – расчёт по уравнению 1 и 2
Рисунок – 2. Изменение влажности препрега в процессе вакуумной сушки

Анализ экспериментальных данных и аппроксимирующих зависимостей показывает, что на огибающих и аппроксимирующих кривых не наблюдается периодов, характерных для постоянной и падающей скорости сушки, это означает, что внешняя и внутренняя диффузия не являются лимитирующими стадиями. Скорость сушки определяется, по-видимому, скоростью кинетики фазового превращения.

Равновесное содержание спирта при температуре 250С составляет ~8%, а содержание летучих продуктов (вода + спирт) ~13%. При удалении из заготовки ~50% спирта, содержание летучих продуктов в заготовке составит ~17...18%, что свидетельствует о том, что при данных режимах сушки нельзя обеспечить в заготовке требуемое содержание летучих продуктов.

Для обеспечения требуемого содержания летучих продуктов препреги необходимо дополнительно сушить под вытяжным зонтом при более высокой температуре. Тем не менее, препреги с показателями летучих продуктов, приведенных в табл. 2, обладают хорошими драпировочными свойствами, что для многослойных препрегов является необходимой технологической характеристикой. Такие препреги позволяют изготавливать фасонные детали со ступенчатыми переходами. Изготовление деталей из таких препрегов показало, что они отвечают предъявляемым к ним требованиям [7].

Вакуумная технология изготовления многослойных препрегов позволяет приблизительно в девять раз сократить расход бакелитового лака (рис. 3) и продолжительность пропитки (рис. 4), а также существенно улучшить экологичность и культуру труда.

Рисунок – 3. Сравнительная диаграмма расхода и стоимости бакелитового лака при пропитке заготовки размерами 1100 x 1100 мм, 6 сложенной в ванне и по вакуумной технологии

Рисунок – 4. Продолжительность пропитки заготовки с содержанием смолы 40 % по массе при использовании различных технологий

Заключение.

Значительное сокращение расхода бакелитового лака и продолжительности пропитки существенно удешевляют производство многослойных препрегов, что открывает возможности для применения этих материалов в различных областях. Таковыми областями являются:

- лесопожарные и гражданские пожарные машины. Оборудование таких машин навесными сменными элементами из абляционных материалов позволит пожарным, находясь в машине, работать в непосредственной близости от кромки пожара, где температура воздуха может достигать 300-700°C.
- контейнеры с аппаратурой для диагностики конструкций теплотехнического назначения. Типичным примером является диагностика изношенности котельных труб. Изготовление корпуса контейнера из абляционных материалов, в котором размещается аппаратура, позволяет существенно сократить и упростить диагностику изношенности таких труб, так как она может осуществляться без остановки котла [8].
- сейфы для хранения ценных бумаг. Сейфы из абляционных материалов способны защитить ценные бумаги не только от вандалов, но и от пожаров.
- автомобилестроение. В Германии проводятся исследования по возможности изготовления армированного углеродными волокнами капота автомобиля с применением технологии «щелевой» пропитки под давлением [9]. Технология вакуумной пропитки может конкурировать с технологией «щелевой» пропитки при изготовлении деталей для автомобилей.

1. Романенков В.А. Выбор технологических режимов автоклавной обработки композитной теплозащиты спускаемых космических кораблей / В.А., Романенков, В.А., Тарасов, М.А., Комков, Р.В., Боярская // XL Академические чтения по космонавтике. – 2016. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. – с. 408 - 409.

2. Романенков В.А. Методические вопросы интенсификации процесса пропитки при изготовлении тепловой защиты космических кораблей / В.А., Романенков, А.М., Ильина, Д.В., Евсеев, Б.П., Парфюмов, В.А., Тарасов/. – XLI Академические чтения по космонавтике. – 2017 – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. – с. 495.
3. Романенко П.Н. Теплопередача / П.Н., Романенко, А.Н., Обливин, Ю.П. Семёнов. –Изд-во «Лесная промышленность», 1969. – 432 с.
4. Котенко В.Д. Технология получения препрегов с высоким содержанием полимера / В.Д. Котенко, В.В., Абраумов, И.В., Сапожников, В.А., Романенков, Л.Н., Кузнецова, А.И., Терехин. // Вестник МГУЛ. Лесной вестник. – №1(93). – 2013. – с. 77 - 81.
5. Глебов И.В. Математическая модель многократной пропитки пористых тел растворами полимеров // И.В., Глебов, В.Д., Котенко, В.А., Романенко /. Наука и образование, МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронный журнал, № 11. – 2015. – с. 238 - 248.
6. Глебов И.В. Способ автоматического управления вакуумной технологией изготовления препрегов // И.В., Глебов, В.Д., Котенко /. Труды МАИ. – вып. № 83. – 2015. – с. 1 - 12.
7. Котенко В.Д. Вакуумная технология получения многослойных препрегов с высоким содержанием полимеров / В.Д. Котенко, И.В. Глебов / Вестник МГУЛ. Лесной вестник. – т. 20. – № 3. – 2016. – с.29 - 34.
8. Котенко В.Д. Охлаждаемый контейнер для аппаратуры / В.Д. Котенко, И.В. Сапожников // Технология химической переработки древесины. Науч. труды. Вып. 267. – М.: МГУЛ, 1996 г. – с. 64-68.
9. Хопман К. Щелевая пропитка под давлением для сокращения времени цикла производства изделий из композитов / К. Хопман, В. Михаэли, Р. Бастиан // Полимерные материалы, №2, IKV (г. Аахен, Германия). – 2014. – с. 4-11.

Мусаев А.А., Фенин М.М.

Анализ трендов хаотических процессов как прогностических индикаторов разладки

*Санкт-Петербургский Государственный Технологический Институт
(технический университет)" (СПбГТИ(ТУ))
(Россия, Санкт-Петербург)*

doi:10.18411/spc-12-12-2017-17

ids: 000001:spc-12-12-2017-17

Аннотация

Представлены описания и результаты серии вычислительных экспериментов, посвященных исследованию возможности использования трендов, возникающих в хаотических процессах, как прогностических индикаторов разладки сложных технических систем (СТС).

Ключевые слова: хаотические процессы, инерционность, контроль состояния, сложные технические системы.

1. Введение. Стационарное состояние СТС, отвечающее заданному режиму регламента ее эксплуатации, сопровождается шумовой хаотической динамикой, обусловленной большим количеством разнообразных неконтролируемых факторов влияния. При этом обнаружение системного тренда в этой шумовой компоненте может служить прогностическим индикатором возникновения разладки, ведущей к возникновению неисправности или отказа.

Обнаружение системного тренда хаотических процессов является ключевой с точки зрения принципиальной возможности построения системы прогностической диагностики СТС. Идеальный хаотический процесс не имеет и не может иметь системного тренда, под которым понимается способность сохранять тенденцию развития в течение заданного интервала времени. Однако реальный хаос, как правило, содержит локальные тренды, существенно снижающие его энтропию. При этом