

Определение взаимосвязи K_h с показателем экспоненты упрочнения требует дополнительных исследований.

Литература

1. Ланков А.А. Вероятность упругих и пластических деформаций при сжатии металлических шероховатых поверхностей // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2009. № 3. С. 3-5.
2. Огар П.М., Дайнеко А.А., Щур Д.Д. Контакт сферической неровности с упругопластическим полупространством // Системы. Методы. Технологии. 2009. № 4. С. 17-19.

3. Огар П.М., Тарасов В.А., Дайнеко А.А. О некоторых закономерностях внедрения сферического индектора // Там же. 2010. № 4 (8). С. 38-43.

4. Ковалев А.П. Основные закономерности вдавливания сферического индектора и оценка физико механических свойств поверхностного слоя деталей // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 1. С. 36-41.

5. Oliver W.C., Pharr G.M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology // Journal of Materials Research. 2004. Vol. 19, № 1. P. 3-20.

УДК 629.73

Л.А. Бохоева, А.Г. Пнев, Т.А. Дамдинов*

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛОПАСТИ ВЕРТОЛЕТА ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Статья посвящена моделированию и технологии изготовления лопасти вертолета из полимерных композиционных материалов. Технология изготовления лопасти рулевого винта вертолета из полимерных композиционных материалов была выполнена с помощью эластичной диафрагмы.

Ключевые слова: моделирование, технология, лопасть, конструкционные элементы, пресс-форма, силиконовая резина.

С новыми материалами связаны эпохи в машиностроении. Для эволюции летательных аппаратов были характерны периоды их изготовления из органических материалов (дерево, ткани, бумага), из легких металлических сплавов (в основном, алюминиевых), сейчас происходит активное внедрение принципиально новых материалов – композиционных. Композиты называют конструкционными материалами нового поколения. Такие материалы сами представляют конструкцию, поскольку при проектировании имеется возможность нужным образом сочетать полезные свойства отдельных слоев и получать материал, обеспечивающий высокую удельную жесткость и прочность изделия.

Технология их переработки в изделие коренным образом отличается от производства металлических конструкций и требует разработки принципиально новых технологических процессов.

В современном вертолетостроении существенную роль занимает производство лопастей несущего и рулевого винтов [1] из композиционных материалов (КМ). Следует отметить, что в последнее двадцатилетие активно ведутся работы по проектированию, разработке и изготовлению лопастей винтов из КМ. В первых летательных аппаратах для изготовления лопастей использовали натуральные материалы, включая дерево. Впо-

следствии эти деревянные винты стали изготавливать слоистыми, где волокна «выравнивались» в направлении, необходимом для получения требуемой жесткости и прочности. Этот опыт является основой использования современных слоистых композиционных материалов. В 1965 году впервые были изготовлены лопасти из армированного стеклопластика, наполненного полиуретановым пенопластом. Хотя такая конструкция была очень простой, но способ изготовления оказался дорогостоящим и трудоемким. Были изучены альтернативные методы изготовления, сохраняющие основные принципы их реализации, которые затем успешно были применены в создании конструкции лопасти из КМ. Почти одновременно появились композиционные материалы, армированные углеродным волокном, причем их эксплуатационные характеристики по сравнению с характеристиками КМ на основе стеклянных тканей были лучше, что позволило использовать их в создании лопастей, испытывающих высокие вибрационные напряжения. Начались разработки КМ на основе углеродных и стеклянных волокон [2]. По сравнению с обычными дюралевыми лопастями применение углеродного волокна в лопастях винтов приводит к значительной экономии веса.

В работе рассмотрено моделирование и технология изготовления лопасти рулевого винта из КМ. Для испытания лопасти вертолета из КМ

создано ООО «МИП «Байкальский научный центр прочности» при Восточно-Сибирском государственном технологическом университете.

Конструктивно каждая лопасть представляет собой полую тонкостенную балку, имеющую в поперечных сечениях форму аэродинамических профилей. Лопасти предназначены для создания тяги рулевого винта и закреплены на проушинах корпусов осевых шарниров втулки.

В состав лопасти входят следующие конструктивные единицы (рис. 1): перо; наконечник; законцовка; противообледенительная система (ПОС) с шиной молниезащиты; балансировочный узел.

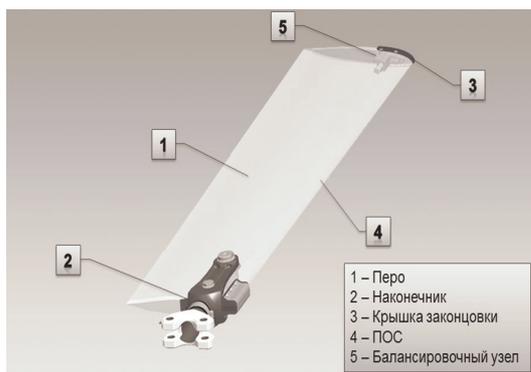


Рис. 1. Конструктивные единицы лопасти.

Перо лопасти формирует полную геометрию лопасти. Основным силовым элементом является составная часть пера – оболочка, выполненная в виде полый тонкостенной балки переменного сечения из композиционного материала на основе стеклоткани и эпоксидной смолы, состоящая из трех пакетов.

С развитием вычислительной техники появилась возможность расчета сложного напряженно-деформированного состояния с геометрическими и физическими нелинейностями. Именно такого рода задачи вполне под силу программному комплексу ANSYS на основе МКЭ. В работе на стадии эскизного проектирования были проведены предварительные расчеты лопасти рулевого винта вертолета на прочность с использованием современных компьютерных технологий.

Задача моделирования детали представляет собой разработку расчетной модели. Под расчетной моделью будем понимать геометрическое представление объекта (рис. 2), разбитого сеткой КЭ (рис. 3), максимально приближенное по форме к реальной конструкции. Особенностью методики расчета слоистых композитных материалов является привлечение целого комплекса программ.

Модель конструкции сложной формы подразделяется на более мелкие части (конечные элементы) сравнительно простой формы, в пределах которых ищется приближенное решение. Результатом такого моделирования обычно является

поле напряжений и смещений в целой конструкции (рис. 4).

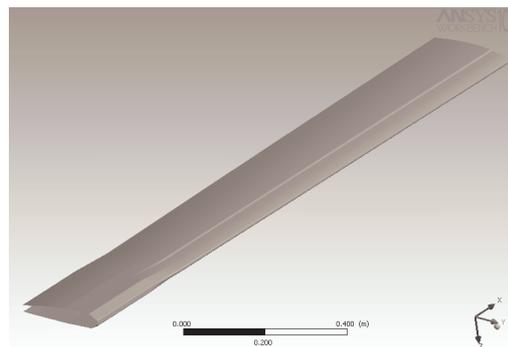


Рис. 2. Модель пера лопасти.

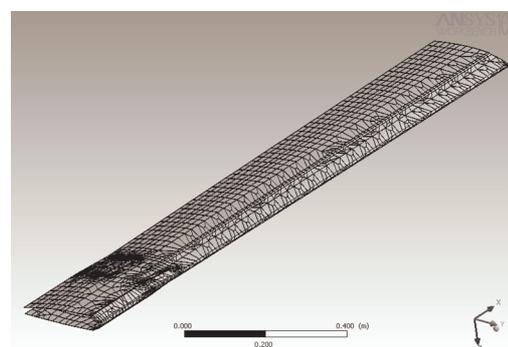


Рис. 3. Конечно-элементная модель пера лопасти.



Рис. 4. Поле напряжений модели пера лопасти.

Построение геометрии выполняется в CAD программе – Pro-E, возможностей ANSYS не хватает для моделирования сложных объектов. Pro-E дает возможность построения детали по сечениям с последующим натягиванием поверхности или объема. В большинстве случаев расчетная модель детали в программном комплексе ANSYS строится на основе твердотельных КЭ (элементы типа SOLID45, SOLID46). В совокупности с учетом импортированной из CAD-системы геометрической модели практически всех элементов реальной конструкции детали, это приведет к большо-

му количеству КЭ в расчетной модели и существенно увеличит время расчета. С другой стороны, большинство деталей лопасти вертолета подходит под определение оболочки. Это делает возможным разработку вполне адекватной расчетной модели детали с использованием shell элементов непосредственно в программном комплексе ANSYS. Рассмотрение детали как оболочковой конструкции существенно упрощает разработку ее расчетной модели. В тоже время, использование оболочковых КЭ позволяет существенно сократить их количество в расчетной модели по сравнению с использованием твердотельных элементов.

Перед построением модели следует проанализировать конструкцию детали с целью выявления второстепенных элементов, которыми можно пренебречь. К таким элементам относятся мелкие отверстия, болты, вентили, заглушки. Следует отметить, что при разработке расчетной модели толщина оболочек, которыми моделируются детали, должны быть равны толщине реальных стенок. Если стенки реальной конструкции имеют отверстия, а их модели с целью упрощения выполнены без них, то толщины последних должны быть уменьшены исходя из обеспечения равенства жесткости модели и реальной детали.

Анализ имеющихся технологий показал, что технология изготовления лопасти рулевого винта вертолета из ПКМ может быть выполнена с помощью эластичной диафрагмы (оправка из силиконовой резины).

Технология изготовления пера лопасти заключается в формовании пакетов препрега в пресс-форме, обеспечивающей аэродинамический контур лопасти (рис. 5). К стенкам пресс-формы слои стеклопластика необходимо прижать с усилием 8 кгс/см^2 . Одним из сложных процессов изготовления лопасти является создание требуемого давления прессования препрега в пресс-форме. Это обусловлено геометрической формой аэродинамического профиля лопасти в местах сопряжения нижнего и верхнего обвода в виде поверхностей двойной кривизны переменного радиуса. Пресс-камера (диафрагма) должна выдерживать необходимое давление и температуру $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 4 часов. Температура задается в автоматическом режиме встроенным в пресс-форму нагревательным элементом, давление – нагнетанием сжатого газа (азот). Готовое изделие должно легко извлекаться из внутренней полости пресс-формы.

Разработанная технология предусматривает создание специальной пресс-формы, представленной на рис. 6, поверхность которой должна быть идентичной теоретической поверхности лопасти. При проектировании лопасти из КМ созданы рабочие численные модели поверхности для изготовления пресс-форм, программы для станка с ЧПУ.

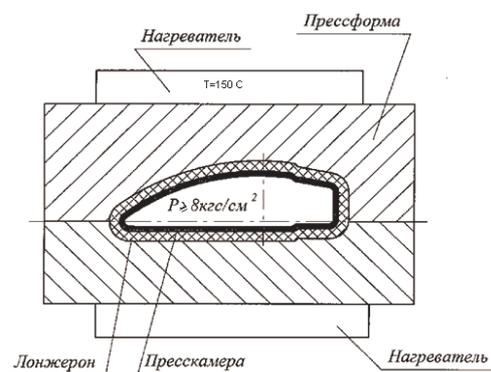


Рис. 5. Формование пакетов препрега в пресс-форме.

Применение пространственной твердотельной численной модели поверхности в совокупности с различными пакетами программного обеспечения позволит точно конструировать все элементы пресс-формы.

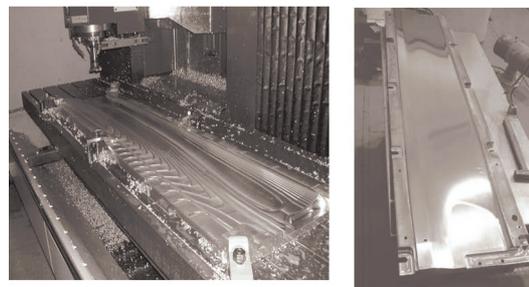


Рис. 6. Изготовление формообразующей матрицы лопасти РВ.

Первым этапом изготовления лопасти является 100 % входной контроль всех материалов на соответствие нормативным физико-химическим параметрам и срокам хранения для оценки их годности к дальнейшей работе.

Для изготовления препрега используется стеклоткань Т-25 (ВМП)-78 ТУ6-11-380-76. Процесс изготовления препрега состоит в пропитке рулона связующим 5-211Б в пропиточной машине УПСТ-1000М. Все работы, связанные с пропиткой стеклоткани, производятся в пылевлагозащищенном помещении при температуре воздуха $18-25 \text{ }^\circ\text{C}$ и относительной влажности не выше 75 %. Стеклоткань предназначенную для пропитки, необходимо предварительно просушить в термошкафе при температуре $80 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 6 часов. Время между операцией сушки и началом пропитки не должно превышать 4-х часов.

Полученные после пропитки полуфабрикаты (препреги) являются исходным материалом для дальнейшей работы по созданию элементов конструкций лопастей. Основные особенности этого этапа, определяющего качество лопастей, – это точность дозирования компонентов и выдержка технологических режимов их смешивания, а также параметры пропитки: температура в сушиль-

ной шахте пропиточной машины, скорость пропитки и степень пропитки стеклоткани связующим.

Следующим шагом изготовления интегральных конструкций типа оболочки лопасти является создание технологических сборочных единиц (пакетов). Этот этап состоит из следующих операций:

- раскрой препрегов, клеевых пленок и резин на заготовки и их разметка;
- комплектация пакетов из заготовок (конструкция оболочки состоит из пяти пакетов);
- выкладка пакетов (технологических сборочных единиц) на оправки; – вакуумирование пакетов и их предварительная подпрессовка (опрессовка) в автоклаве;
- хранение препрегов и собранных пакетов.

Раскрой заготовок из препрега производится на гидрорезной установке BARS JET 2060. Раскрой производится без абразива, только водой при давлении 2500 бар. Обрабатываемый водной струей материал меньше разрушается от воздействия лезвийного инструмента. Кроме того, он менее трудоемок и на несколько порядков снижает уровень запыленности в рабочей зоне.

В управляющей программе предусмотрена маркировка заготовок для удобства их дальнейшей выкладки на оправки. После раскроя заготовки сушатся в течение 8 часов и взвешиваются с точностью не грубее 0,01 кг. Все данные заносятся в технологический паспорт.

Следующий этап – укладка полученных заготовок на технологические оправки для предварительной опрессовки послойно. Выкладка производится по осям, нанесенным на оправку, с контролем направления основы ткани по линиям укладки основы, без складок и наличия гофр. На собранный пакет накладываются технологическая цулага, два слоя дренажной ткани, затем он помещается в вакуумный мешок. Предварительная опрессовка производится в автоклаве при температуре 60 °С и вакууме 0,6÷0,8 бар.

После подпрессовки получаем вместо большого числа мягких заготовок три относительно жестких элемента, пригодных к дальнейшей сборке. Основными критериями качества на этапе предварительной сборки являются:

- повышенные требования к чистоте помещений, оснастке, оборудованию, инструментам и исполнителям;
- порядок выкладки, совмещение осей и другой разметки на заготовках, контроль укладки направления основы препрегов, зазоры в стыках между листами, укладываемыми под углами, отличными от нуля, уровень герметичности в сборке с вакуумным мешком, температура и давление подпрессовки;
- режимы, условия и сроки хранения предварительно опрессованных пакетов.

По аналогичной схеме осуществляется предварительная сборка и подпрессовка пакета противообледенительного устройства.

Подготовленные пакеты укладываются в пресс-форму на оправке-вкладыше из силиконовой резины марки Пентаэласт-750. Данный материал работает при температуре от –50 °С до +220 °С и имеет прогнозируемое линейное расширение, необходимое для создания давления внутри оболочки. Преимущества оправки из силиконовой резины заключаются в том, что упрощается конструкция пресс-формы, возможно изготовление деталей из полимерных композиционных материалов без использования автоклавов и разжимного приспособления; значительно уменьшается брак при формовании и как следствие – потеря дорогостоящих материалов и трудозатрат.

Окончательное формование оболочки лопасти происходит при ступенчатом повышении температуры со скоростью 1÷2 градуса в минуту до 65 °С и выдержке при этой температуре 30 минут с последующим выходом на режим 150 °С с выдержкой 4 часа. После охлаждения пресс-формы до температуры окружающей среды производятся выемка детали и удаление вкладыша из внутреннего канала лопасти.

Основными параметрами качества на этом этапе являются режимы формования: давление формования, температура нагрева, скорость подъема температуры, время выдержки при заданной температуре и давлении. Все режимы формования заносятся в технологический паспорт на лопасть. Контроль сплошности материала производится на просвет и дефектоскопом.

Контроль качества технологических процессов на первых трех этапах осуществляется пооперационно. На третьем этапе, кроме параметров формования, контролируются:

- химико-физические параметры материала (плотность, прочность, пористость);
- качество формования (пропрессовка, наличие пузырей воздуха и т. д.);
- электрические параметры нагревателя;
- геометрические параметры оболочки (аэродинамический контур, кривизна, саблевидность и т. д.).

Готовую оболочку помещают в специальное приспособление. Заполнитель из пенополиуретана марки ППУ-210 изготавливается заливкой при свободном вспенивании с помощью заливочной машины ПК-90М при температуре 35-40 °С. Пенополиуретан подается во внутреннюю полость по трубке, скорость движения которой определена экспериментально и составляет 3 м/мин.

На следующем этапе оболочка лопасти поступает на участок механической обработки. На ленточнопильном станке производится обрезка технологических припусков. В дальнейшем из них изготавливают образцы для подтверждения хими-

ко-физических свойств полученного композита требованиям конструкторской документации. На этом этапе производится расточка отверстий под втулки для соединения пера лопасти и законечника.

Технология изготовления лопасти рулевого винта вертолета из ПКМ была выполнена с помощью эластичной диафрагмы. Преимущества оправки из силиконовой резины заключаются в том, что упрощается конструкция пресс-формы, возможно изготовление деталей из полимерно-композиционных материалов без использования автоклавов и разжимного приспособления; значительно уменьшается брак при формовании и как следствие потеря дорогостоящих материалов и трудозатрат.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы».

Литература

1. Строительная механика летательных аппаратов / под ред. И.Ф. Образцова. М.: Машиностроение, 1986. 536 с.
2. Абибов А.Л. Применение конструкционных пластмасс в производстве летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1971. 192 с.
3. Резниченко В.И. Изготовление лопастей из неметаллических материалов. М.: Изд-во МАИ, 1977. 63 с.

УДК 62.752

С.В. Елисеев, Ю.В. Ермошенко, И.С. Ситов*, А.Н. Трофимов

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДИНАМИЧЕСКОГО ГАСИТЕЛЯ КОЛЕБАНИЙ. КОНЦЕПЦИЯ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Рассматриваются вопросы построения математических моделей динамических гасителей колебаний как дополнительных обратных связей в виброзащитных системах. Показано, что, в отличие от общепринятых взглядов, структура исходной модели защиты объекта оказывает существенное влияние на параметры и возможности режимов динамического гашения, что зависит от особенностей системы внешних воздействий.

Ключевые слова: динамический гаситель колебаний, структурная схема виброзащитной системы, дополнительные обратные связи.

Динамическое гашение колебаний в конструкциях, силовых передачах и виброзащитных системах приборов и оборудования является одним из эффективных способов повышения надежности и безопасности работы технологических машин [1÷3]. В теоретических и прикладных разработках, посвященных динамическому гашению колебаний, которые носят междисциплинарный характер, используются различные подходы, в том числе и основанные на применении аппарата теории автоматического управления соединения. Вместе с тем, многие особенности динамического гашения, рассматриваемые с позиции теории обратных связей, учета конструктивных форм реализации, остаются недостаточно изученными. В работах [4÷6] представлены результаты исследований, связанные с рассмотрением динамических гасителей, вводимых как дополнительные Г-образные связи, имеющие специфичные формы закрепления упругих элементов. В связи с этим имеет смысл обратить внимание на обобщение подходов к построению математических моделей динамических гасителей.

I. На рис. 1 представлена система с двумя степенями свободы, состоящая из двух элементов

массами M и m , соединенных пружиной с жесткостью k ; система может свободно перемещаться в направлении y , имея точку отсчета 0 (силы трения считаются малыми).

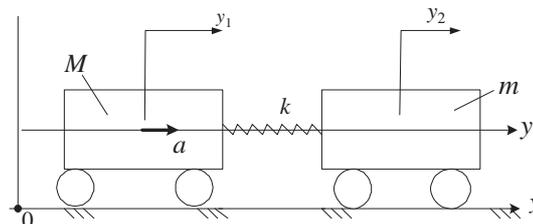


Рис. 1. Общий вид системы из двух элементов в поступательном движении.

Для представленной на рис. 1 схемы определим выражения для кинетической и потенциальной энергий:

$$T = \frac{1}{2} M \dot{y}_1^2 + \frac{1}{2} m \dot{y}_2^2; \quad (1)$$

$$\Pi = \frac{1}{2} k (y_1 - y_2)^2. \quad (2)$$