

Технология и технологические машины

УДК 629.73

Выбор и обоснование оптимальной технологии изготовления лопасти вертолета из композиционных материалов¹

Л.А. Бохоева, А.Г. Пнев

Статья посвящена выбору оптимальной технологии изготовления лопасти вертолета из полимерных композиционных материалов. Технология для изготовления лопасти рулевого винта вертолета из полимерных композиционных материалов создана с использованием вкладыша из силиконовой резины.

Ключевые слова: технология, лопасть, конструкционные элементы, прессформа, силиконовая резина.

The article is devoted to the choice of an optimal technology of manufacturing helicopter blades from polymer composite materials. For the first time the technology of manufacturing helicopter steering screw blades is implemented with the use of a silastic insert.

Keywords: technology, blade, structural components, press mold, silastic.

¹ Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009—2013 гг.».



БОХОЕВА

Любовь Александровна
доктор технических наук,
профессор, зав. кафедрой
«Сопротивление
материалов»
Восточно-Сибирский
государственный
технологический
университет (ВСГТУ)



ПНЕВ

Андрей Григорьевич
аспирант кафедры
«Сопротивление
материалов»
Восточно-Сибирский
государственный
технологический
университет (ВСГТУ)

В последнее двадцатилетие в современном вертолетостроении активно ведутся работы по проектированию, разработке и изготовлению лопастей несущего и рулевого винтов [11] из композиционных материалов (КМ). В первых летательных аппаратах для изготовления лопастей применялись натуральные материалы, включая дерево. Впоследствии деревянные винты стали изготавливать слоистыми, в которых волокна «выравнивались» в направлении, необходимом для получения требуемой жесткости и прочности. Этот опыт послужил основой для использования современных слоистых композиционных материалов.

В 1965 г. впервые были изготовлены лопасти из армированного стеклопластика, наполненного полиуретановым пенопластом. Хотя такая конструкция была очень простой, способ ее изготовления оказался дорогостоящим и трудоемким. Были изучены альтернативные методы изготовления лопастей, сохраняющие основные принципы их реализации, которые затем успешно были применены в создании конструкции лопасти из КМ. Почти одновременно появились КМ, армированные углеродным волокном. Их усталостные 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 — стеклянных волокон [2]. В отличие от обычных дюралевых лопастей применение углеродного волокна в лопастях винтов приводит к значительной экономии веса. В качестве

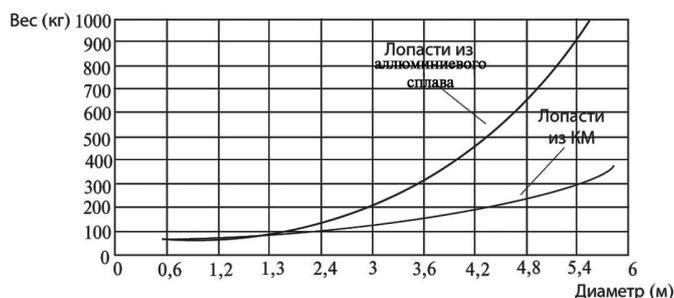


Рис. 1. Диаграмма сравнения веса лопасти из КМ и лопасти из алюминиевых сплавов

иллюстрации на рис. 1 представлена диаграмма сравнения веса лопасти из КМ лопасти из алюминиевых сплавов.

Для испытания лопасти из КМ вертолета создано ООО «МИП «Байкальский научный центр прочности» при Восточно-Сибирском государственном технологическом университете.

Конструкционные элементы лопасти рулевого винта вертолета

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. 2): перо, наконечник, законцовка, противообледенительная система (ПОС) с шиной молниезащиты, балансировочный узел.

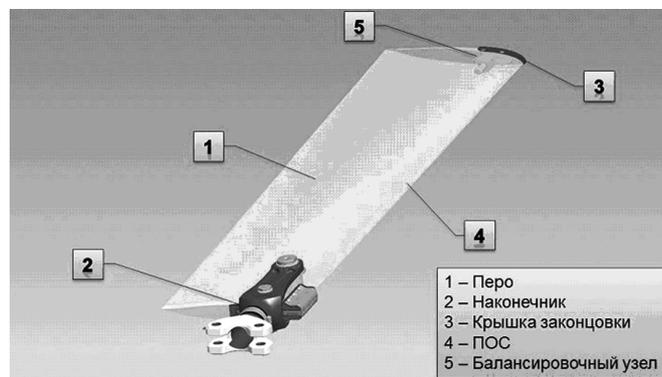


Рис. 2. Конструктивные единицы лопасти

Перо лопасти формирует полную геометрию лопасти. Основным силовым элементом является составная часть пера — оболочка, выполненная в виде полую тонкостенную балку переменного сечения из КМ на основе стеклоткани и эпоксидной смолы, состоящая из трех пакетов (рис. 3).

Для обеспечения необходимой поперечной центровки лопасти в носке оболочки размещен стальной груз. Жесткость по задней кромке ло-

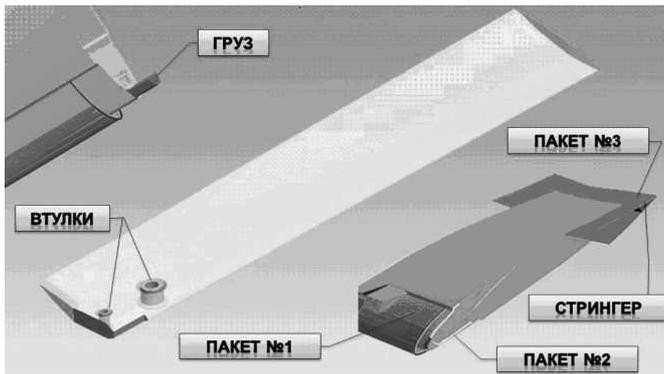


Рис. 3. Оболочка лопасти из КМ

пасти в оболочке обеспечивает стрингер. В комлевой части пера оболочка имеет утолщения, в которых установлены переходные резьбовые металлические втулки для соединения с наконечником. Для обеспечения затяжки резьбовых втулок во внутренний канал комлевой части пера вклеен текстолитовый вкладыш.

Наконечник соединяет перо лопасти рулевого винта (РВ) со втулкой РВ и выполнен в виде звена с двумя парами проушин (рис. 4). С одной стороны наконечник болтами соединяется с пером через втулки, с другой стороны через проушины в виде гребенки переходник соединяется с корпусом осевого шарнира втулки РВ. Наконечник воспринимает и передает на втулку РВ все виды нагрузок, возникающих на лопасти РВ. Материал переходника — легированная сталь.



Рис. 4. Наконечник лопасти, выполненный из легированной стали

Для защиты от абразивного износа на носке оболочки установлена оковка из титанового листа ОТ-4 толщиной 0,5 мм. Оковка неразрезная, выполнена с пониженной жесткостью на

растяжение и изгиб, что позволяет «выключить» ее из работы при изгибных деформациях лопасти. Оковка устанавливается после формирования оболочки на клею холодного отверждения типа ВК-9.



Рис. 5. Противообледенительное устройство

В носовой части оболочки под оковкой устанавливается противообледенительное устройство, предназначенное для защиты носовой части лопасти от налипания льда при работе в условиях обледенения (рис. 5). Оно является частью ПОС лопастей РВ и состоит из нагревателя и проводки.

Нагреватель выполнен из полос коррозионной стали, вклеенных между слоями стеклоткани и резины. Пакет нагревателя вместе с проводкой устанавливается на оболочку в процессе единого формования. В состав нагревателя как узла включена дополнительно шина молниезащиты. Шина проходит по верхней поверхности оболочки лопасти рядом с нагревающими лентами и электрически соединяет оковку с массой вертолета и с крышкой законцовки. Проводка состоит из проводов с наконечниками и соединяет нагреватель с токосъемником ПОС РВ, шины молниезащиты для снятия статического электричества с массой вертолета.

Для исключения потери устойчивости и обеспечения необходимой поперечной центровки лопасти в качестве заполнителя пера применен самовспенивающийся пенопласт пониженной плотности.

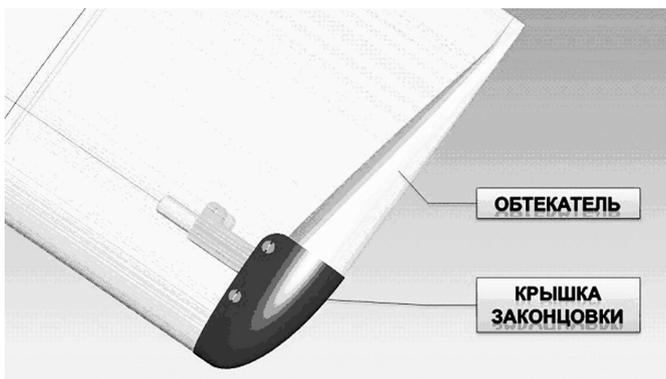


Рис. 6. Концевая часть пера

Жесткость по задней кромке в комлевой части пера обеспечивает комлевая нервюра. Торец комля пера закрыт крышкой.

На концевой части пера (рис. 6) устанавливается законцовка, формирующая геометрию конца лопасти РВ, состоящая из съемной крышки, концевой нервюры и обтекателя. Крышка выполнена в виде тонкостенной стальной оболочки и крепится к перу лопасти винтами. Остальные детали законцовки выполнены из композиционных материалов.

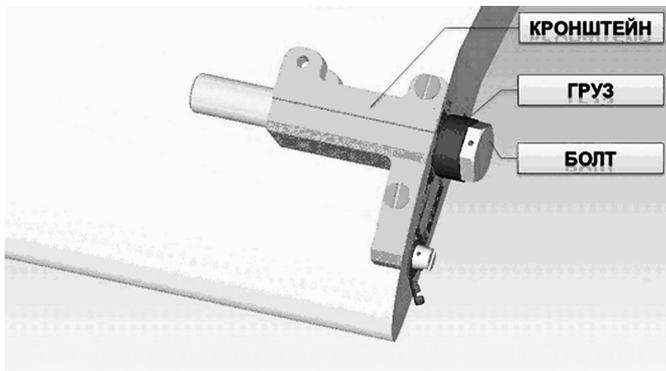


Рис. 7. Балансировочный узел

Балансировочный узел (рис. 7), предназначенный для регулировки статического момента лопасти РВ относительно оси вращения винта, установлен на конце пера лопасти и состоит из кронштейна, грузов и болтов. Регулировка статического момента лопасти обеспечивается изменением количества и массы грузов.

Распределенные по радиусу РВ упруго-массовые характеристики лопасти тщательно подобраны для обеспечения необходимой проч-

ности элементов лопасти РВ и безрезонансной работы рулевого винта на всех режимах полета.

Оптимальная технология изготовления лопасти РВ из полимерных композиционных материалов

Анализ имеющихся технологий показал, что оптимальная технология изготовления лопасти РВ вертолета из полимерных композиционных материалов (ПКМ) предполагает применение оправки из силиконовой резины вместо эластичной диафрагмы (пресс-камеры) [3].

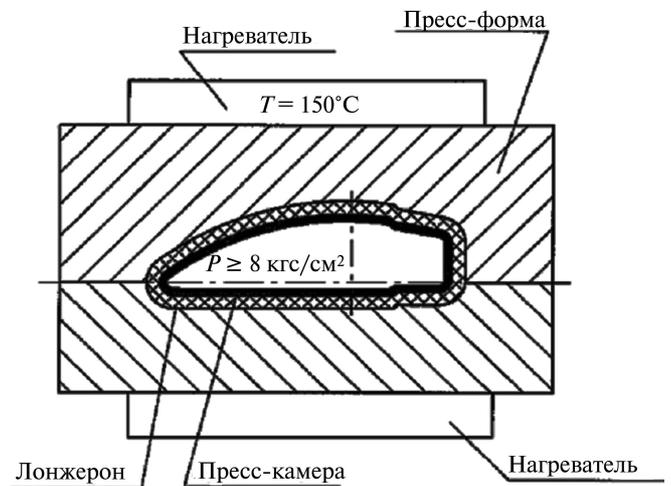


Рис. 8. Формование пакетов препрега в пресс-форме

Технология изготовления пера лопасти заключается в формировании пакетов препрега в пресс-форме, обеспечивающей аэродинамический контур лопасти (рис. 8). К стенкам пресс-формы слои стеклопластика необходимо прижать с усилием 8 кгс/см².

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 обводов в виде поверхностей двойной кривизны переменного радиуса. Пресс-камера должна выдерживать необходимое давление и температуру 150°C в течение 4 ч. Температура задается в автоматическом режиме встроенным в пресс-форму нагревательным элементом, давление — нагнета-

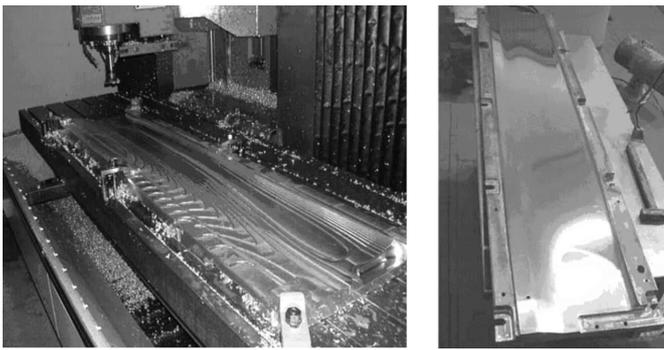


Рис. 9. Изготовление формообразующей матрицы лопасти РВ

нием сжатого газа (азот). Готовое изделие должно легко извлекаться из внутренней полости пресс-формы.

Разработанная технология предусматривает создание специальной пресс-формы (рис. 9), 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. Применение пространственной твердотельной численной модели поверхности в совокупности с различными пакетами программного обеспечения позволит точно конструировать все элементы пресс-формы.

Первым этапом изготовления лопасти является 100-ый входной контроль всех материалов на соответствие физико-химических параметров нормативным документами сроком хранения.

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°С и относительной влажности не выше 75%. Стеклоткань, предназначенную для пропитки, необходимо предварительно просушить в термошкафу при температуре 80°С в течение 6 ч. Время между операцией сушки и началом пропитки не должно превышать 4 ч.

Полученные после пропитки полуфабрикаты (препреги) служат исходным материалом

для дальнейшей работы по созданию элементов конструкций лопастей. Основные требования на этом этапе, определяющем качество изготавливаемых лопастей, — точность дозировки компонентов и выдержка заданных технологических режимов их смешивания, соблюдение параметров пропитки (температуры в сушильной шахте пропиточной машины, скорости пропитки и степени пропитки стеклоткани связующим).

Следующим (вторым) этапом изготовления интегральных конструкций типа оболочки лопасти является создание технологических сборочных единиц (пакетов). Второй этап состоит из таких операций, как 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, без абразива, только водой при давлении 2 500 бар. Обрабатываемый водной струей материал меньше разрушается от воздействия лезвийного инструмента. Кроме того, такой раскрой 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 ч и взвешиваются с точностью не менее 0,01 кг. Все данные заносятся в технологический паспорт.

Третий 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. Собранный пакет, на который сначала накладывается технологическая цулага и два слоя дренажной ткани, помещается в вакуумный мешок. Предварительная опрессовка про-

изводится в автоклаве при температуре 60°C и вакууме 0,6...0,8 бар.

После подпрессовки вместо большого числа мягких заготовок получаем три относительно жестких элемента, пригодных к дальнейшей сборке. Основными параметрами 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; укладка 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 укладывают в пресс-форму на оправке-вкладыше из силиконовой резины марки пентаэласт-750. Этот материал работает при температуре от -50 до +220°C и имеет прогнозируемое линейное расширение, необходимое для создания давления внутри оболочки.

Окончательное формование оболочки лопасти происходит при ступенчатом повышении температуры со скоростью 1...2 градуса в минуту до 65°C с выдержкой при этой температуре 30 мин и последующим выходом на режим 150°C с выдержкой 4 ч. После охлаждения пресс-формы до температуры окружающей среды производится 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 заданных 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, также 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, крутка, саблевидность и т. д.).

Готовую оболочку укладывают в специальное приспособление. Заполнитель из пенополиуретана марки изолан-210 изготавливается заливкой при свободном вспенивании с помощью заливочной машины ПК-90М при температуре 35...40°C. 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, из которых в дальнейшем изготавливают образцы для подтверждения химико-физических свойств полученного композита требованиям конструкторской документации. На этом этапе производится расточка отверстий под втулки для соединения пера лопасти и наконечника.

Выводы

Технология изготовления лопасти РВ вертолета из ПКМ заключается в применении вкладыша из силиконовой резины вместо эластичной диафрагмы. Преимущества оправки из силиконовой резины очевидны: упрощается конструкция пресс-формы; возможно изготовление деталей из ПКМ без использования автоклавов и разжимного приспособления; значительно сокращается брак при формовании и, как следствие, уменьшаются потери дорогостоящих материалов и трудозатрат.

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.

Статья поступила в редакцию 30.03.2011 г.