

ОБЩАЯ ПОСТАНОВКА И СХЕМА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ АВИАКОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПКМ С УЧЕТОМ ИХ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ

© 2012 А.Е. Ушаков

ФГУП «ЦАГИ», Московская область, г. Жуковский

Поступила в редакцию 05.10.2012

Рассматривается подход к созданию безопасных полимерных композиционных материалов для авиационных конструкций. Этот подход основан на сочетании вероятностных методов и конструктивно-технологических средств обеспечения эксплуатационной живучести, которая позволяет нам достичь высокой безопасности конструкции и весовой эффективности. Предлагаются основные направления улучшения весовой и экономической эффективности полимерных композиционных материалов и эксплуатационных характеристик живучести. Предложены критерии выбора материалов по уровню повреждаемости и методам ремонта в эксплуатации, технологических процессов – по встречающимся технологическим дефектам и методам контроля качества, ограничениям по габаритным размерам изделий, характерным объемам серии и производительности, а также требованиям по нормативно техническому обеспечению. Выделен ряд критериев выбора конструктивных решений, непосредственно связанных с вопросами проектирования и изготовления элементов конструкций из полимерных композиционных материалов.

Ключевые слова: повреждаемость, полимерные композиционные материалы, авиационные конструкции, конструктивные решения, технологии, методология, экспертные системы, весовая эффективность, обеспечение безопасности, эксплуатационная живучесть.

В общей постановке задача достижения максимальной весовой и экономической эффективности применения ПКМ в конструкции планера при обеспечении требуемого уровня его безопасности и надежности должна рассматриваться как:

- проблема выбора рационального сочетания разнообразных типов базовых материалов и технологических процессов изготовления с конструктивно-силовой схемой авиаконструкции из ПКМ;
- проблема конструктивно-технологического обеспечения эксплуатационной живучести авиаконструкции из ПКМ.

Критерии выбора материалов, конструктивных и технологических решений должны основываться на замкнутом мультидисциплинарном подходе к проектированию авиационных конструкций из ПКМ для обеспечения их весовой и экономической эффективности. В основе подхода – математический аппарат, моделирующий многопараметрический процесс создания нового изделия на основе анализа ключевых факторов в реальном времени.

Предложены критерии выбора материалов по уровню повреждаемости и методам ремонта в эксплуатации, технологических процессов – по встречающимся технологическим дефектам и методам контроля качества, ограничениям по габаритным размерам изделий, характерным

объемам серии и производительности, а также требованиям по нормативно техническому обеспечению. Выделен ряд критериев выбора конструктивных решений, непосредственно связанных с вопросами проектирования и изготовления элементов конструкций из ПКМ: особенности технологии производства, металлокомпозитные соединения, отверстия и конструктивные вырезы, вопросы эксплуатационной повреждаемости и живучести, контроле- и ремонтпригодности. Представлена схема реализации инновационной методологии применения подхода «Building Block» для формирования сертификационного базиса.

Предложен подход к созданию авиаконструкций из ПКМ на основе конструктивно-технологических способов обеспечения эксплуатационной живучести, позволяющий достичь создаваемой конструкции высокого уровня безопасности и весовой эффективности. Указаны основные направления повышения весовой и экономической эффективности применения ПКМ и взаимосвязь характеристик эксплуатационной живучести с данными показателями. Сформулирована задача конструктивно-технологического обеспечения эксплуатационной живучести силовых конструкций из ПКМ, указан ряд особенностей и процедуры реализации данного решения, сводящегося к построению системы анализа эксплуатационной живучести авиаконструкции из ПКМ.

Ушаков Андрей Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, начальник НИК «Национальный композитный центр». E-mail: andrey.yshakov@tsagi.ru

1. МУЛЬТИДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ЭФФЕКТИВНЫХ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПКМ

Методы обеспечения весовой и экономической эффективности, отработанные за последние 70-80 лет для металлических элементов ЛА, основаны на детерминированных свойствах используемых материалов, полуфабрикатов и технологий. При таком подходе конструктивно-силовая схема формируется независимо от этих факторов, а обеспечение должного уровня характеристик, определяемого при квалификации материалов, используемых при создании КСС, является ответственностью поставщика материалов (рис. 1).

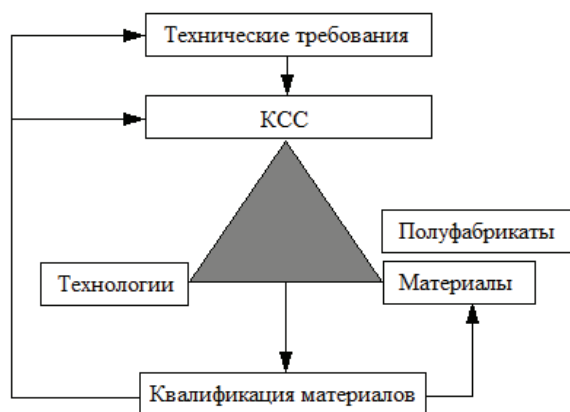


Рис. 1. Традиционный подход к проектированию авиационных конструкций из ПКМ

Такой подход неприменим к конструкциям из ПКМ. Он приводит к появлению авиаконструкций из “черного алюминия” и не позволяет реализовать всех преимуществ композиционного материала, в особенности преимуществ по весовой и экономической эффективности. Проектирование ЛА из ПКМ не допускает фикси-

рованной последовательности типа “конструкция–материал–технология”, поскольку все эти три составляющих взаимозависимы и формируются для неё, в определённом смысле, одновременно. Если в случае с металлами последовательность проектирования в известной мере предписана, то в случае с композитами для каждого набора технических требований существует многообразие комбинаций “материал–технология–конструкция”, отвечающих возможности его реализации. В этих условиях критерии проектирования в обеспечение безопасности и весовой эффективности ЛА должны основываться на замкнутом мультидисциплинарном подходе, учитывающем все факторы, влияющие на процесс (рис. 2).

Этот подход учитывает взаимное влияние особенностей материалов, производственных процессов и КСС, предоставляя с одной стороны разработчику значительную гибкость в достижении целевых ЛТХ, а с другой стороны, накладывая на него ответственность за квалификацию не только материалов, но и выбранных технологических решений, необходимую для обеспечения воспроизводимости процесса производства и контроля качества продукции при серийном производстве.

В основе этого замкнутого подхода должен лежать математический аппарат, позволяющий моделировать многопараметрический процесс создания нового изделия на основе анализа в реальном времени всех ключевых факторов влияния, обеспечивая возможность оценки эффективности различных вариантов КСС на самой ранней стадии её создания (рис. 3).

Этот математический аппарат должен содержать внутри себя соответствующие базы данных и экспертные системы, по которым осуществляется виртуальное моделирование и анализ вариантов в реальном времени с выбором наиболее оптимального из них по заранее уста-

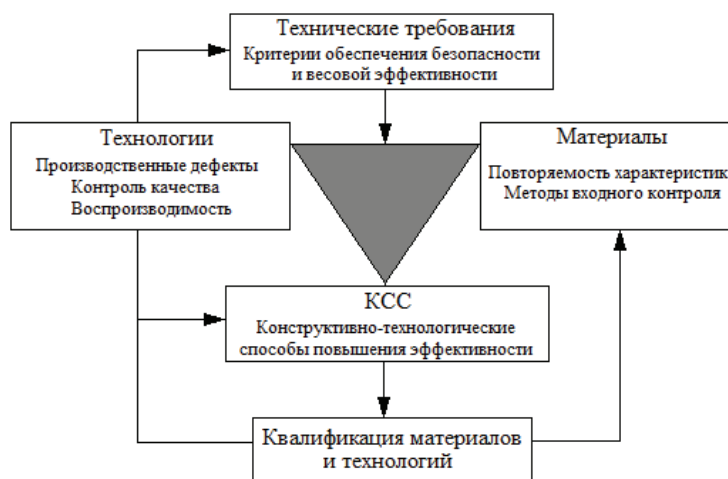


Рис. 2. Мультидисциплинарный подход к проектированию авиационных конструкций из ПКМ

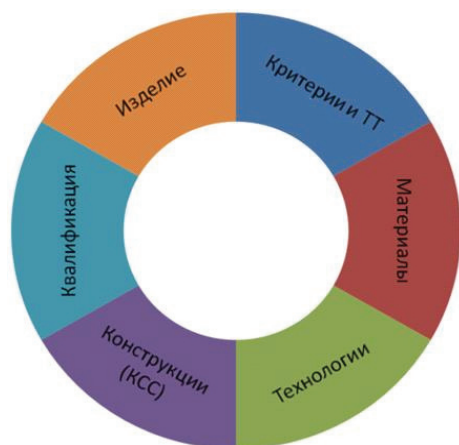


Рис. 3. Замкнутость мультидисциплинарного подхода

новленным критериям. Ниже приведены предложения по соответствующим критериям с условной разбивкой на “Материалы”, “Технологии” и “Конструкцию”.

2. КРИТЕРИИ ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ

Уровень повреждаемости материала. Каждому из технологических процессов присущ определенный перечень применяемых базовых материалов и полуфабрикатов, напрямую влияющий на реализуемый уровень повреждаемости получаемого композиционного материала и конструкций из него. Это, в свою очередь, определяет требования по контролепригодности и эффективности ремонтов, а также разброс характеристик конструкции, что также должно учитываться при выборе материалов.

Методы ремонта в эксплуатации. На этапе выбора базовых материалов для авиационных конструкций из ПКМ необходимо с учетом предполагаемых технологий их ремонта предусмотреть компоненты и полуфабрикаты, которые будут предписаны для применения ремонтным заводам с учетом их доступности, срока их хранения (что особенно актуально для препрегов) и технологии утилизации.

3. КРИТЕРИИ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Технологические дефекты и контроль качества. Важнейшим фактором, определяющим успех при разработке новых конструкций из ПКМ, является точность воспроизведения описанного технологического процесса в реальном производственном процессе. Различные технологии имеют различные точки чувствительности, влияющие на появление технологических отклонений: действие человеческого фактора, чрезмерное количество технологических переде-

лов, геометрическая нестабильность оснастки при воздействии нагрева, нестабильность армирующего пакета при воздействии давления, усадка связующего и т.д.

Это означает, что при выборе технологии необходимо учитывать применяемые методики контроля качества и способы контроля наиболее важных зон изготавливаемых изделий с учетом допусков, заложенных в конструктивно-силовую схему. В противном случае все преимущества оптимизированного конструктивного решения могут быть сведены на нет погрешностями в серийном производстве.

Ограничения по габаритным размерам. Габаритные ограничения формируются в зависимости от типа используемого оборудования и оснастки. Для вакуумного формования и вакуумной инфузии – это размер внутренней камеры печи, для RTM–технологии ограничения определяются возможностями по подъёму и перемещению пуансона в пределах производственного участка, а также стоимостью комплекта “матрица+пуансон”, для пултрузии – поперечными размерами вытягиваемого профиля, зависящего от типа машины.

Характерный объём серии и производительность. При выборе технологии необходимо иметь чёткое представление о продолжительности цикла изготовления, выделяя более производительные и менее производительные процессы. Например, RTM–технология, в основе которой лежит тот же самый принцип, что и в основе вакуумной инфузии, обеспечивает большую производительность, чем последняя, но оптимальна при относительно больших сериях, поскольку оснастка для RTM окупается значительно дольше. Поэтому вакуумная инфузия может эффективно применяться для изготовления крупногабаритных изделий относительно небольшими партиями, например, основных панелей крыла, а высокопроизводительные технологии такие, как: пултрузия и RTM для изготовления элементов, имеющих меньший размер, но выпускаемых в большем объёме, например, стрингеров, нервюр, окантовок иллюминаторов.

Требования по нормативно-техническому обеспечению при сертификации. Влияние этого критерия на выбор технологии определяется, в основном, сертификационными требованиями, предъявляемыми к создаваемым конструктивным элементам. Чем выше уровень ответственности элемента, тем большей детализации и глубины контроля свойств материалов и полуфабрикатов, стабильности технологии может потребовать сертифицирующий орган. Поэтому на этапе её выбора необходимо обеспечить наличие нормативно-методической основы и сер-

тификационной базы, которые будут использоваться в обеспечении сертификации типа ВС, а также сертификации серийного производства.

Учитывая, что созданные к настоящему моменту расчётные методы для ПКМ не так надёжны, как для металлов, в основном в силу многообразия мод разрушения для возможных допускаемых повреждений традиционным в США и Европе для формирования сертификационного базиса является подход “Building Block” (рис. 4а). На его основе проверяются расчётные методы и возможность их дальнейшего применения в обоснование сертификационных требований, что в существующей практике приводит к постоянно увеличивающемуся объёму испытаний и увеличению стоимости и сроков реализации программы сертификации в целом (например, программы создания Airbus 380 и Boeing 787). Важным условием преодоления этих проблем и обеспечения эффективности использования подхода “Building Block” является наличие в его основе инновационной методологии, определяющей и обосновывающей способы достижения целевых установок сертификации (прежде всего, безопасности и надёжности), а также экспертной системы, обеспечивающей практическую реализацию этой методологии в целях достижения максимальной эффективности применения ПКМ в авиаконструкциях. Формирование и выполнение расчётно-экспериментальных исследований безопасности и эффективности конструкций из ПКМ на каждом уровне “Building Block” обеспечивается рациональным использованием при проектировании конструктивно-технологических способов повышения весовой эффективности и применением сертификационных норм и процедур обо-

снования соответствия. На рис. 4б представлена схема реализации инновационной методологии применения подхода “Building Block”.

4. КРИТЕРИИ ВЫБОРА КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ

Помимо требований по статической и усталостной прочности, а также по аэроупругости, можно выделить ряд критериев, непосредственно связанных с вопросами материаловедения и технологии изготовления конструкций из ПКМ.

Технология производства. Конструктивные элементы ЛА существенно различаются по оптимальным для них способам производства. Среди конструкций, например, можно выделить: толстостенные крупногабаритные (лонжероны и шпангоуты), толстостенные малогабаритные (тяги и рычаги), интегральные (подкреплённые панели крыла и фюзеляжа), замкнутые (кессоны киля и стабилизатора), оболочечные (обшивки), профильные (балки пола) и др. Для каждого из перечисленных типов конструкций может быть выбрана оптимальная комбинация базовых материалов и полуфабрикатов и технологии их переработки в изделие, в частности, для крупногабаритных † вакуумная инфузия, для толстостенных малогабаритных † РТМ, для профильных † пултрузия и т.д.

Металлокомпозитные соединения. При использовании в КСС комбинированных металлокомпозитных элементов следует учитывать факторы, определяющие особенности и ограничения их совместной работы. Например, с точки зрения совмещения ПКМ и металла по КЛТР, совместно с композитом рекомендовано применение титана вместо алюминия. При проектирова-

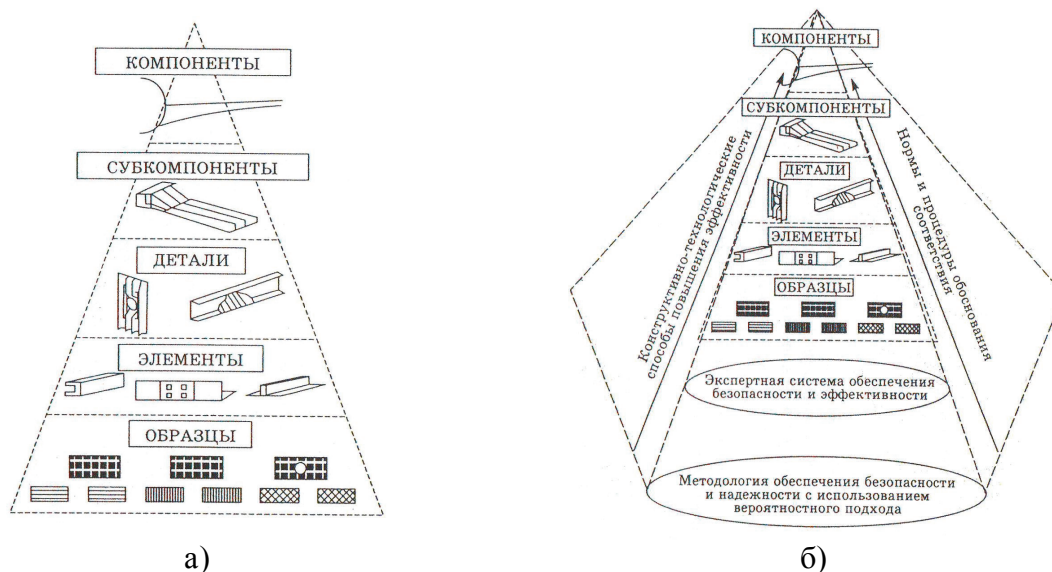


Рис. 4. Методология применения подхода “Building Block”:
а – традиционная постановка; б – инновационная методология

нии системы молниезащиты необходимо учитывать, что удар молнии в область, в которой металлические элементы находятся под композитными, приведёт к пробое ПКМ и образованию сквозного дефекта.

Отверстия и конструктивные вырезы. При проектировании конструктивных вырезов в соответствующих зонах элементов из ПКМ необходимо предусматривать специальную схему армирования с особым углом укладки волокна, обеспечивающим качественную реализацию процессов разрезки или сверления, которые представляют собой достаточно сложную процедуру, основанную на последовательном углублении отверстия с постоянным контролем состояния внутренней поверхности и краёв отверстия.

Эксплуатационная живучесть. Конструктивные решения, закладываемые в элементы ЛА, должны обеспечивать скорость распространения повреждения достаточно низкую для безопасной эксплуатации самолёта между регламентными осмотрами либо предусматривать резервные элементы, останавливающие развитие повреждений за счет перераспределения нагрузок.

Эксплуатационная повреждаемость. Для различных элементов планера характерны различные типы эксплуатационных повреждений. Например, удар молнии по статистике приходится в основном на носовую часть фюзеляжа, законцовки крыла и хвостовое оперение, но почти никогда не приходится в центральные части фюзеляжа и крыла. Воздействие града, так же как и падение инструмента при техническом обслуживании, невозможно на нижнюю часть фюзеляжа и нижние панели крыла, удар птицы приходится в основном в переднюю кромку крыла. Таким образом, типы динамического воздействия от низкоскоростных и высокоскоростных ударов могут быть дифференцированы по конструктивным элементам и учтены при выборе схем армирования, толщин и их конструктивного исполнения.

Контролепригодность. Конструктивные элементы и зоны, наиболее подверженные появлению эксплуатационных повреждений, должны быть доступны для осмотра и контроля их состояния обслуживающим персоналом с учётом его квалификации и применяемых в полевых условиях методов контроля. К этим методам относятся, в частности: визуальный осмотр, простукивание (которое эффективно только в условиях достаточной тишины при выполнении осмотра квалифицированным персоналом), поиск холодных конденсационных пятен на нижних поверхностях сразу после приземления самолёта, ультразвуковой контроль с использованием переносных приборов.

Ремонтопригодность. На этапе проектирования авиационных конструкций из ПКМ необходимо предусмотреть технологии их ремонта в эксплуатации с учётом квалификации обслуживающего персонала эксплуатантов, а также с учётом технических возможностей минимально оснащённых ремонтных баз в регионах, где планируется обслуживать создаваемый самолёт.

5. ПОДХОД К СОЗДАНИЮ АВИАКОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПКМ С ВЫСОКИМ УРОВНЕМ БЕЗОПАСНОСТИ И ВЕСОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ НА ОСНОВЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СПОСОБОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ЖИВУЧЕСТИ

Весовая и экономическая эффективность авиаконструкций из ПКМ с должным уровнем безопасности и надёжности зависит от уровня допускаемых максимальных эксплуатационных напряжений (деформаций) – $\sigma_{\downarrow \max}^{\uparrow \varepsilon}$ $\varepsilon_{\downarrow \max}^{\uparrow \varepsilon}$, определяющих массу конструкции М, а также от затрат $T_{\text{Росм}}$ на обнаружение технологических дефектов и эксплуатационных повреждений, входящих наряду с другими затратами в стоимость ее производства и эксплуатации (рис. 5).

Характеристики $\sigma_{\downarrow \max}^{\uparrow \varepsilon}$, $T_{\text{Росм}}$, в свою очередь, являются монотонными функциями повреждаемости авиаконструкций из ПКМ в процессе производства и эксплуатации, которая выражается размерами допустимых повреждений $2L_{\text{доп}}$, и их значения уменьшаются с ростом последних. Однако, если уменьшение $\sigma_{\downarrow \max}^{\uparrow \varepsilon}$ приводит к снижению весовой эффективности применения ПКМ, то увеличение $T_{\text{Росм}}$ обуславливает снижение затрат на обнаружение дефектов (повреждений) и, как следствие этого, повышает экономическую эффективность конструкции. Поэтому при заданном уровне безопасности существуют оптимальные значения $[(\sigma)]_{\max}^{\text{opt}}$, $(2L_{\text{доп}})^{\text{opt}}$, когда повышение требований по весовой эффективности нецелесообразно из-за существенного увеличения затрат на ее обеспечение, и наоборот. Общая схема взаимосвязи значений $\sigma_{\downarrow \max}^{\uparrow \varepsilon}$ и $2L_{\text{доп}}$ с показателями эффективности применения ПКМ представлена на рис. 6.

Оптимальные значения $[(\sigma)]_{\max}^{\text{opt}}$, $(2L_{\text{доп}})^{\text{opt}}$ определяются прежде всего характером зависимостей уровня допускаемых напряжений, трудоемкости осмотров при производстве и в эксплуатации от величины $2L_{\text{доп}}$.



Рис. 5. Общая схема повышения эффективности применения ПКМ

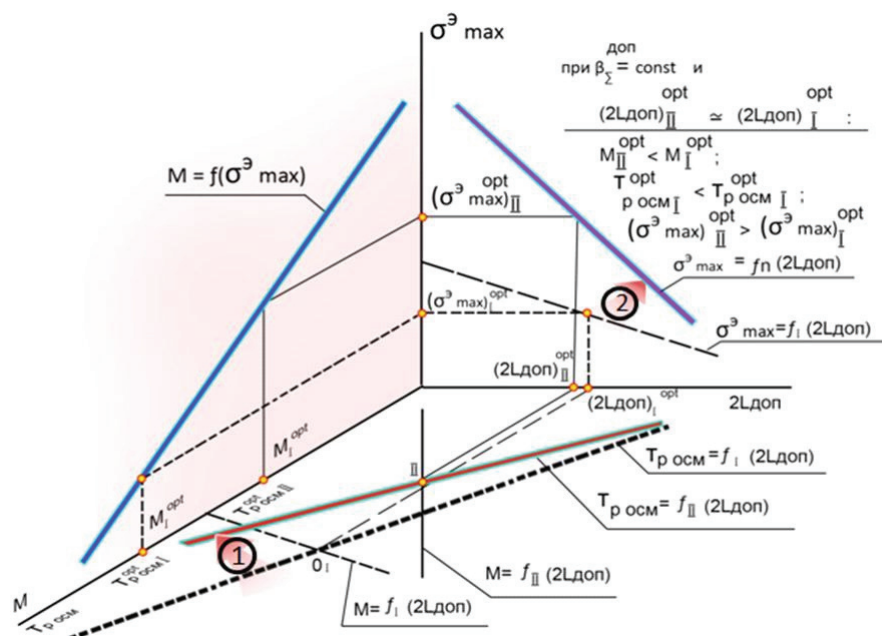


Рис. 6. Общая схема взаимосвязи характеристик эксплуатационной живучести с показателями эффективности применения ПКМ и способы их увеличения:

- 1 – использование конструктивно-технологических способов повышения сопротивления разрушению ПКМ,
- 2 – повышение производительности и снижения затрат на обнаружение дефектов

Поэтому, как показано на рис. 7, основными направлениями повышения весовой и экономической эффективности применения ПКМ являются:

- использование конструктивно-технологических способов повышения сопротивления разрушению поврежденных авиаконструкций из ПКМ;
- повышение эффективности контроля целостности авиаконструкций из ПКМ при производстве и в эксплуатации, снижение затрат на его проведение.

Реализация указанных мероприятий непосредственно связана с внедрением в практику проектирования принципов “эксплуатационной живучести”, что еще раз подтверждает актуальность изучаемой проблемы. Характеристики эк-

сплуатационной живучести – это параметры, которые устанавливают взаимосвязь эффективности конструктивно-технологических способов с экономической эффективностью и определяют целесообразность повышения нагруженности авиаконструкций из ПКМ, т.к. оно ограничено из-за увеличения стоимости производства и затрат на обслуживание.

Зависимости, отражающие качественный характер изменения массы, стоимости авиаконструкции из ПКМ, трудоемкости ее осмотров и ремонтов от относительной величины допускаемых напряжений, приведены на рис. 7. Задаваемые в виде технических требований уровень безопасности конструкции по условиям ресур-

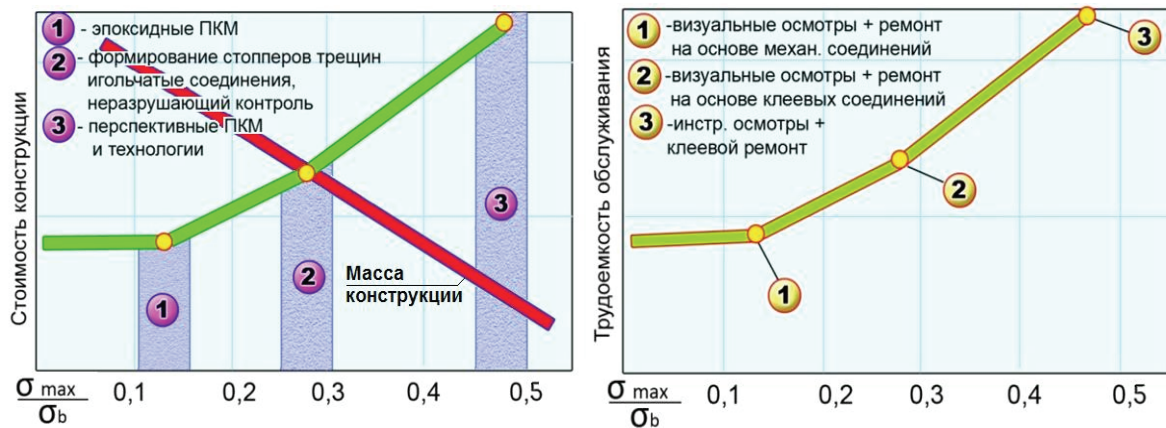


Рис. 7. Характер изменения массы, стоимости и трудоемкости обслуживания авиаконструкций из ПКМ с увеличением относительной величины допускаемых напряжений

са, а также допускаемые затраты на осмотры, ремонты, доработки в процессе производства и эксплуатации являются ограничениями при решении данной оптимизационной задачи.

На основании изложенного задачу конструктивно-технологического обеспечения эксплуатационной живучести силовых авиаконструкций из ПКМ можно сформулировать следующим образом: *достижение максимальной весовой и экономической эффективности применения ПКМ на основе определения условий и обеспечения возможности эксплуатации ответственных конструкций минимальной массы при наличии дефектов и повреждений в течение требуемого срока службы в заданных условиях при выполнении ограничений по безопасности, надежности и экс-*

плуатационной технологичности.

Несмотря на традиционность приведенной формулировки задачи для рассматриваемой области знаний о прочности ответственных конструкций [1], ее решение применительно к авиаконструкциям из ПКМ имеет ряд особенностей, отраженных на рис. 8 и связанных с закономерностями повреждения и разрушения ПКМ.

Наиболее важными факторами, влияющими на условия постановки задачи обеспечения эксплуатационной живучести авиаконструкций из ПКМ, являются (рис. 8):

- технологические (материалы, техпроцессы, контроль качества);
- методы и критерии проектирования;
- эксплуатационные (внешние нагрузки, ме-

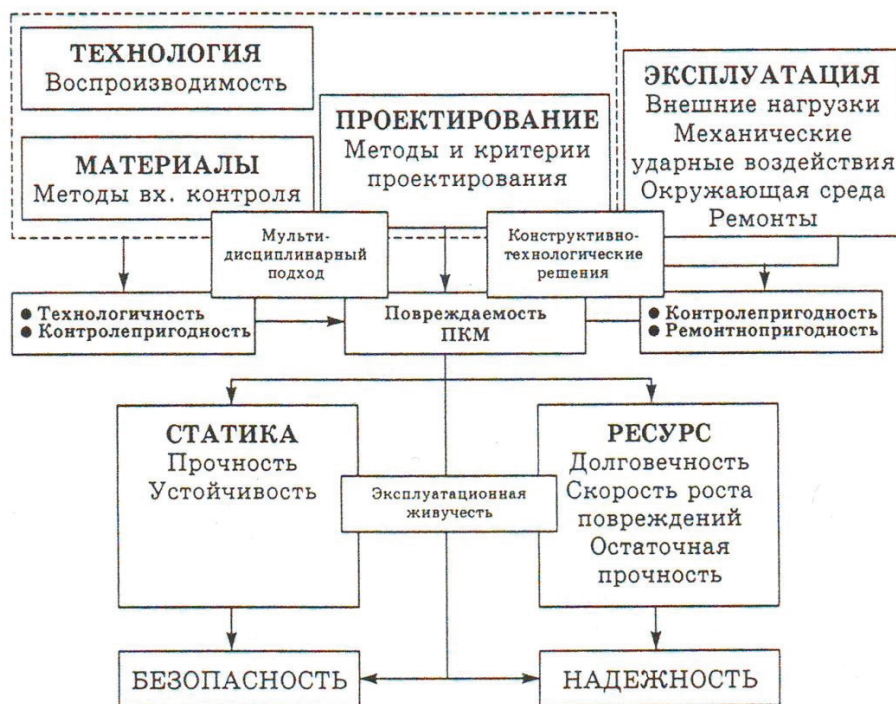


Рис. 8. Общая постановка задачи конструктивно-технологического обеспечения живучести и безопасности авиаконструкций из ПКМ

ханические ударные воздействия, окружающая среда, регламентные осмотры и ремонты).

Основным элементом, объединяющим указанные факторы, являются конструктивно-технологические решения, которые определяют:

- повреждаемость ПКМ в процессе производства и эксплуатации;
- характеристики статической прочности и ресурса;
- технологичность конструкции, включая эффективность методов контроля;
- эксплуатационную технологичность (контроле - и ремонтпригодность).

Опыт проектирования и эксплуатации элементов из ПКМ показывает, что задачи обеспечения их статической прочности и ресурса должны решаться одновременно путем обеспечения соответствующих характеристик эксплуатационной живучести, поскольку:

- во-первых, из-за высокой чувствительности ПКМ к концентраторам напряжений для силовых конструкций из ПКМ необходимый для безопасной эксплуатации уровень характеристик эксплуатационной живучести не может быть достигнут только за счет введения коэффициента запаса по статической прочности, полученного с учетом повышенного коэффициента вариации свойств композитов ($f = 1,5 \cdot f_{\text{дон}}$);
- во-вторых, для обеспечения живучести конструкций из ПКМ, спроектированных без учета повреждаемости при производстве и в эксплуатации, такие мероприятия, как частичная доработка или ограничение срока службы либо неприемлемы, либо малоэффективны.

Согласно изложенному, решение сформулированной задачи конструктивно-технологического обеспечения эксплуатационной живучести авиаконструкций из ПКМ можно представить в виде реализации отдельных процедур в следующей последовательности:

- определение влияния технологических и эксплуатационных факторов, методов и критериев проектирования на характеристики повреждаемости ПКМ;
- определение характеристик эксплуатационной живучести для заданных условий повреждаемости ПКМ с учетом влияния конструктивно-технологических факторов;
- обеспечение требуемой эксплуатационной живучести для парка авиаконструкций из ПКМ минимальной массы при заданном уровне безопасности и при выполнении ограничений по трудоемкости осмотров и ремонтов в процессе производства и в эксплуатации.

Под обеспечением живучести при заданном уровне безопасности понимается создание совокупности методик расчета и проектирования

авиаконструкций из ПКМ с учетом возможного рассеяния всех характеристик, определяющих их повреждаемость и остаточную прочность, а также установление такой процедуры контроля этих характеристик в процессе создания и в эксплуатации, которая сделала бы возможным достижение требуемой безопасности. Использование в качестве критериев проектирования минимума массы конструкции и ограничений по трудоемкости обслуживания приводит к необходимости, помимо внедрения оптимальных конструктивно-технологических решений и эффективных способов повышения характеристик сопротивления разрушению ПКМ, обеспечить введение обоснованных коэффициентов безопасности по остаточной прочности, рациональной периодичности осмотров и ремонтов. Это может быть осуществлено только при выполнении целого ряда мероприятий в самом начале проектирования, при изготовлении конструкции и в процессе ее эксплуатации, а именно: установление и уточнение фактических условий повреждаемости ПКМ при производстве и в эксплуатации; получение реальных характеристик повреждаемости и живучести ПКМ; оптимизации процедуры сертификации и контроля безопасности конструкции в эксплуатации.

Решение поставленной задачи сводится к построению системы анализа и синтеза эксплуатационной живучести авиаконструкции из ПКМ с учетом ее повреждаемости в стохастической постановке, аналогичной рассмотренной в работе [1]. Эта система должна связывать требования повышения весовой и экономической эффективности применения ПКМ с критериями прочности и ресурса авиаконструкций, условия эксплуатации с характеристиками повреждаемости и живучести ПКМ, все необходимые процедуры по их расчетному и экспериментальному определению, все процедуры контроля и восстановления конструкции при производстве и в эксплуатации. Помимо этого, система должна содержать необходимые обратные связи, позволяющие в соответствии с реальным опытом корректировать параметры конструкции или условия эксплуатации. Таким образом, в решении участвуют следующие основные элементы:

- требования по критериям живучести, безопасности и эффективности применения ПКМ;
- вероятностно-статистическая модель повреждения и живучести ПКМ в условиях производства и эксплуатации;
- система обеспечения прочности и ресурса авиаконструкций из ПКМ, включающая две ветви: синтеза и контроля;
- результаты фактического производства и эксплуатации;



Рис. 9. Общая схема решения задачи конструктивно-технологического обеспечения живучести и безопасности авиаконструкций из ПКМ

- обратная связь опыта производства и эксплуатации авиаконструкций из ПКМ со всеми элементами задачи.

Взаимосвязь всех перечисленных элементов схематически приведена на рис. 9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Селихов А.Ф. Обеспечение ресурса конструкций (опыт самолетостроения) // Машиноведение. 1986. № 5. С.11-18.

THE GENERAL STATEMENT AND SCHEME PERFORMING SAFE POLYMER COMPOSITE MATERIALS AVIATION DESIGN ADAPTED TO THEIR DAMAGEABILITY

© 2012 A.E. Ushakov

Central Aerohydrodynamic Institute "TsAGI", Moscow Region, Zhukovsky

The approach to the creation of safe polymer composite materials aviation design is stated. The approach is based on the combination of probabilistic methods and constructive-technological means of ensuring operational survivability, which lets us achieve the high safety design and weight efficiency. The main ways to increase the weight and cost-effectiveness of polymer composite materials and operational survivability characteristics of the interaction with these figures are proposed. The criteria of the selection of materials by the level of damages which may occur and the methods of the repair process, the operating processes - in the occurring technological defects and quality control methods, the limits for overall dimensions, a typical batch size and performance, as well as regulatory requirements technical support, are proposed. Identified a number of criteria for the selection of design solutions that are directly related to the design and manufacture of structural elements of the safe polymer composite materials.

Key words: Damageability, polymer composite materials, aircraft design, constructive decisions, technology, methodology, expert systems, weight efficiency, safety, operational viability.