

ФОРМИРОВАНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ КОМПЛЕКСНОГО КРИТЕРИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АГРЕГАТОВ ГРАЖДАНСКИХ САМОЛЕТОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВНЫХ ЭТАПАХ ИХ СОЗДАНИЯ

Введение

В нашей публикации [1] на основе анализа и синтеза отечественного и мирового опыта предложена схема формирования пятиуровневого комплексного критерия эффективности проектирования агрегатов гражданских самолетов из полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе иерархических этапов их создания:

- состава ПКМ;
- формирования полуфабрикатов;
- конструктивно-силовых схем (КСС) агрегата;
- конструктивно-технологических решений (КТР) деталей, узлов, соединений;
- сборки агрегата.

$$\bar{K}_{\text{проект ПКМ}}^{\text{эф}} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \xi_i \bar{K}_i^{\text{эф}}, \quad \bar{K}_i^{\text{эф}} = \frac{K_i^{\text{эф}}}{K_{i \text{ баз}}^{\text{эф}}}, \quad (1)$$

где ξ_i – доли вклада i -й составляющей относительного интегрального критерия эффективности ($i=1, 2, \dots, 5$); $\bar{K}_i^{\text{эф}}$ – относительный критерий эффективности i -й составляющей интегрального критерия, определяющий стадию (этап) его формирования.

Аддитивная форма представляется оправданной и предпочтительной перед мультипликативной, так как последняя обращала бы относительный интегральный критерий в нуль при нулевом значении коэффициента значимости j -й составной части $\bar{K}_j^{\text{эф}}$.

Относительный критерий эффективности $\bar{K}_i^{\text{эф}}$ имеет также аддитивную форму:

$$\bar{K}_i^{\text{эф}} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \psi_j \bar{K}_{ij}^{\text{эф}}. \quad (2)$$

При этом число n в различных составляющих ψ_j критериях $\bar{K}_i^{\text{эф}}$, относящихся к разным i , чаще всего также различно.

Доля вклада каждой i -й составляющей относительного комплексного критерия эффективности ξ_i ($i=1, 2, \dots, 5$) определяется экспертными оценками и зависит от вида проектируемого агрегата самолета из ПКМ и назначения самого воздушного судна или его модификации [1].

Постановка и решение задачи

В статье [1] приведена таблица долевых составляющих критерия эффективности этапа состава ПКМ. Ниже даны анализ и синтез составляющих частных относительных критериев эффективности последующих этапов создания агрегатов гражданских судов из ПКМ.

Критерий эффективности проектирования и конструирования агрегата ВС ТК из ПКМ на стадии формирования полуфабрикатов

Относительный критерий эффективности i -й составляющей ее j -й компоненты $\bar{K}_{ij}^{эф}$ в общей зависимости (1) имеет прежний вид (2).

Однако компоненты доли вклада составляющих этапа выбора полуфабрикатов ПКМ ψ_{2k} , по-видимому, будут частично отличаться от аналогичных этапа состава ПКМ.

Действительно, конкурентные характеристики ψ_{23} и ψ_{24} , отражающие уровни доминирующей прочности и деформативности при различных видах воздействий, уже predeterminedены на этапе выбора состава ПКМ и соответственно содержатся в его полуфабрикатах. Остальные конкурентные характеристики ψ_{21} , ψ_{22} , ψ_{23} и ψ_{41} , сохраняя смысл аналогичных им характеристик ψ_{11} , ψ_{12} , ψ_{15} и ψ_{16} , имеют несколько отличающееся содержание, а именно:

ψ_{21} – степень сохранения свойств компонентов (связующего и армирующих волокон) в период, предшествующий переработке полуфабриката в изделие, и в процессе самой переработки;

ψ_{22} – уровень технологичности и безопасности получения и преобразования полуфабриката;

ψ_{23} – уровень себестоимости получения и переработки полуфабриката;

ψ_{41} – уровень недефицитности (доступности) получения полуфабриката.

Уровни ψ_{23} и ψ_{24} этапа состава ПКМ для стадии формирования полуфабрикатов следует принять равными нулю.

При этом число компонент j -й составляющей n в формуле (2) следует принять равным 4.

Долевые составляющие $\phi_{2k\zeta}$ в соответствии с компонентами долей ψ_{ij} можно представить в табл. 1 аналогично таблице работы [1].

В развернутом виде критерий (2) с учетом долевых составляющих $\phi_{1k\zeta}$, приведенных в табл. 1, имеет вид, аналогичный (1), за исключением оговоренных в табл. 1 особенностей:

$$\bar{K}_{1j}^{\text{эф}} = \frac{1}{4} \sum_{\zeta=1}^4 \left(\sum_{\eta=1}^r \varphi_{2j\zeta\eta} \bar{K}_{2j\zeta\eta} \right) \quad (3)$$

или

$$\bar{K}_{2j}^{\text{эф}} = \frac{1}{4} \left[\left(\varphi_{2j11} \bar{K}_{2j11} + \varphi_{2j12} \bar{K}_{2j12} \right) + \left(\varphi_{2j21} \bar{K}_{2j21} + \varphi_{2j22} \bar{K}_{2j22} \right) + \left(\varphi_{2j51} \bar{K}_{2j51} + \varphi_{2j52} \bar{K}_{2j52} \right) + \varphi_{2j61} \bar{K}_{2j61} \right], \quad (4)$$

где $\bar{K}_{2j\zeta\eta}$ требуют обоснования и доопределения.

Таблица 1 – Долевые составляющие $\varphi_{2k\zeta}$

К	Долевые составляющие ζ в $\varphi_{2k\zeta}$
1	1.1 Уровень сохранения свойств компонентов в период формирования полуфабриката 1.2 Уровень сохранения свойств в процессе хранения полуфабриката до его переработки в изделие
2	2.1 Уровень технологичности формирования полуфабриката 2.2 Уровень токсичности полуфабриката в период его формирования и хранения до переработки в изделие
3	3.1 Уровень себестоимости получения полуфабриката или цены приобретения 3.2 Уровень себестоимости переработки полуфабриката в изделие
4	4.1 Уровень доступности получения полуфабриката или его приобретения

1. Уровень сохранения свойств компонентов относительных составляющих критериев долевых частей первой группы табл. 1.

1.1 Относительный критерий уровня сохранения свойств компонентов в период формирования полуфабриката в зависимости от вида полуфабриката (нить, лента, ткань, препрег) определится как

$$\bar{K}_{2j11} = \frac{K_{2j11}}{K_{2j11}^0}, \quad (5)$$

где K_{2j11} , K_{2j11}^0 – соответственно уровень доминирующих свойств полуфабриката и исходной составляющей ПКМ – армирующего наполнителя до его текстильной переработки.

Так, например, для полуфабриката в виде ткани $K_{2j11} = N_{\text{р ткан}}$, $K_{2j11}^0 = N_{\text{р вол}}$, где $N_{\text{р ткан}}$ и $N_{\text{р вол}}$ – разрывное усилие зачетного образца ткани и исходного волокна.

1.2 Относительный критерий уровня сохранения свойств в процессе хранения полуфабриката до его переработки в изделие в зависимости от вида полуфабриката определится как

$$\bar{K}_{2j12} = \frac{K_{2j12}}{K_{2j12}^0}, \quad (6)$$

где K_{2j12} , K_{2j12}^0 – соответственно уровень доминирующего свойства полуфабриката до его переработки в изделие и исходный уровень его свойства после получения (изготовления) в зависимости от вида полуфабриката.

Для полуфабрикатов, полученных ткачеством, может быть принято:

$$K_{2j12} = K_{2j11} \text{ и } K_{2j12}^0 = K_{2j11}^0.$$

Для препрегов кроме влияния снижения доминирующих свойств армирующей составляющей K_{2j11} существенное, если не определяющее, влияние оказывает изменение свойств подполимеризованного связующего в препреге, зависящее от времени и температуры хранения препрега, поэтому для препрегов может быть принято

$$\bar{K}_{2j12} = \frac{K_{2j12}}{K_{2j12}^0} K_{T,\tau}, \quad (7)$$

где $K_{T,\tau} < 1$ – коэффициент снижения доминирующего свойства препрега в зависимости от температуры и времени его хранения до переработки в изделие, определяемый из опыта или экспертным путем.

При отсутствии точных данных можно рекомендовать $K_{T,\tau} = 0,75 \dots 0,8$.

2. Уровень технологичности и безопасности жизнедеятельности.

Весьма широкое понятие технологичности существенно зависит от определяемого им объекта. Применительно к формированию состав ПКМ в [1] этот термин использован только как характеризующий один экономический аспект – трудоемкость получения продукта. Именно этот аспект является определяющим в [2]: технологичный – позволяющий использовать в производстве наиболее экономичные технологические процессы.

2.1 Исходя из изложенного выше относительный уровень технологичности формирования полуфабриката ПКМ \bar{K}_{2j21} следует представить как

$$\bar{K}_{2j21} = \frac{K_{\text{труд полуфабр}}}{K_{\text{труд Д16}}}, \quad (8)$$

где $K_{\text{труд полуфабр}}$ – показатель трудоемкости изготовления полуфабриката; $K_{\text{труд Д16}}$ – показатель трудоемкости получения Д16.

2.2 Составляющую относительного критерия эффективности \bar{K}_{2j22} аналогично [1] можно представить как

$$\bar{K}_{2j22} = \frac{K_{\text{без препр}}}{K_{\text{без Д16}}}, \quad (9)$$

где $K_{\text{без препр}}$, $K_{\text{без Д16}}$, как и ранее, интегральные (обобщенные) показатели токсичности (безопасности) производства полуфабриката ПКМ и аналогичный показатель получения Д16.

3. Уровни себестоимости получения и переработки полуфабриката в изделие.

3.1 Долевая составляющая относительного уровня стоимости изготовления полуфабриката определяется как

$$\bar{K}_{2j51} = \frac{C_{\text{изг полуфабр}}}{C_{\text{Д16}}}, \quad (10)$$

где $C_{\text{изг полуфабр}}$, $C_{\text{Д16}}$ – цены единицы производства полуфабриката и Д16.

3.2 Уровень себестоимости переработки полуфабриката в изделие

$$\bar{K}_{2j51} = \frac{C_{\text{перераб полуфабр}}}{C_{\text{перераб Д16}}}, \quad (11)$$

где $C_{\text{перераб полуфабр}}$, $C_{\text{перераб Д16}}$ – себестоимости переработки полуфабриката и Д16 в изделие.

4.1 Долевая составляющая относительного уровня доступности получения полуфабриката или его приобретения

$$\bar{K}_{2j61} = \frac{K_{2j61 \text{ полуфабр}}}{K_{2j61 \text{ Д16}}}, \quad (12)$$

где $K_{2j61 \text{ полуфабр}}$, $K_{2j61 \text{ Д16}} = K_{1j61 \text{ Д16}}$ определяются экспериментальными оценками с использованием справочной литературы и соответствующих прайс-релизов поставщиков.

Критерий эффективности проектирования и конструирования агрегата ВС ТК из ПКМ на стадии выбора его конструктивно-силовой схемы

Несмотря на множество не существенно отличающихся формулировок понятия конструктивно-силовой схемы (КСС) [3 – 6 и др.], будем исходить из определения, что КСС называют схему взаимного расположения силовых элементов, обеспечивающих работу агрегата или его фрагмента как единой силовой конструкции.

Анализ публикаций [6 – 12] и опыта проектирования авиаконструкций на этапе выбора КСС позволяет заключить, что при сохранении самого критерия эффективности в каноническом виде (3) его долевые составляющие имеют отличия от содержащихся на этапе формирования полуфабрикатов (табл. 2).

Таблица 2 – Долевые составляющие $\Phi_{3k\zeta}$

К	Долевые составляющие ζ в $\Phi_{3k\zeta}$
1	1.1 Уровень сохранения эксплуатационных свойств полуфабриката в ходе технологического процесса формирования (реализации) КСС
2	2.1 Уровень потенциальной возможности снижения массы агрегата, реализующей КСС
3	3 Уровень обеспечения надежности [10 – 12] агрегата в эксплуатации реализуемый КСС 3.1 Уровень обеспечения безотказности, реализуемый КСС 3.2 Уровень ремонтпригодности, обеспечиваемый КСС 3.3 Уровень долговечности (ресурса) агрегата из ПКМ, обеспечиваемый КСС 3.4 Уровень сохраняемости значений безотказности, ремонтпригодности и долговечности в течение и после хранения и транспортировки, обеспечиваемый КСС себестоимости переработки полуфабриката в изделие
4	4.1 Уровень интегральной технологичности, реализуемый КСС
5	5.1 Уровень технологической себестоимости агрегата, реализуемый КСС
6	6.1 Уровень доступности реализации КСС

1.1 Относительный критерий уровня сохранения эксплуатационных свойств полуфабриката в ходе технологического процесса формирования (реализации) КСС можно представить аналогично принятому для второго этапа:

$$\bar{K}_{3j11} = \frac{K_{3j11}}{K_{3j11}^0}, \quad (13)$$

где K_{3j11} , K_{3j11}^0 – соответствующие уровни доминирующих свойств полуфабриката после реализации КСС и эти же его свойства в исходном состоянии (после второго этапа – формирования полуфабриката).

Отличия K_{3j11} и K_{3j11}^0 возможны вследствие воздействий на полуфабрикат технологических факторов процесса реализации КСС (температурно-временных, давления и др.).

2.1 Относительный критерий уровня потенциального снижения массы агрегата реализуемой КСС должен иметь вид

$$\bar{K}_{3j21} = \frac{M_{3j11}}{M_{3j11Д16}}. \quad (14)$$

Здесь M_{3j11} , $M_{3j11Д16}$ – массы агрегата из ПКМ реализуемой КСС и масса этого агрегата металлического аналога.

Если значение $M_{3j11Д16}$ предполагается известным, то определение M_{3j11} реализуемой КСС всегда сопряжено с большими трудностями и связано с точностью и корректностью самого метода выбора КСС из ПКМ.

В [6] указано, что в практике проектирования металлических агрегатов воздушных судов чаще всего применяют следующие основные методы выбора КСС:

- на основе сравнительного анализа различных вариантов;
- путем решения задачи в постановке математического программирования;
- по рациональному распределению конструкционного материала в континуальной модели.

Для агрегатов из ПКМ все эти методы выбора КСС вызывают ряд принципиальных вопросов.

В [13 – 14] для агрегатов из ПКМ обсуждаются две альтернативные модели КСС: синтезирующая и дифференциальная.

Первая представляет собой синтез элементов, в которых армирующие волокна расположены таким образом, чтобы обеспечить наилучшую сопротивляемость конструкции всем регламентированным для нее видам воздействий (расчетным случаям нагружения). Принцип формирования первой КСС основан на одном из возможных способов организации схем армирования элементов, структурно не чувствительных к конкретным видам воздействий, регламентированных нормами прочности.

Вторая КСС состоит из конструктивно выраженных элементов, каждый из которых структурно чувствителен к одному или нескольким, вполне определенным, регламентированным видам воздействий и не воспринимает остальные виды нагрузок.

Синтезирующий и дифференциальный принципы конструирования реализуются оптимальными конструкциями, не эквивалентными по массе [14].

3.1 Уровень обеспечения надежности агрегатов в эксплуатации регламентированной КСС

Согласно [10 – 12] надежность – свойство самолета сохранять во время в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять полетные задания в расчетных режимах

и условиях эксплуатации, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.

Надежность является сложным свойством самолета и состоит из сочетаний свойств: безотказности, ремонтпригодности, долговечности и сохраняемости [11 – 12].

Безотказность – свойство самолета непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение времени выполнения полетного задания.

Ремонтпригодность – свойство самолета, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, повреждений и поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонтов.

Долговечность – свойство самолета сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Сохраняемость – свойство самолета сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности в течение и после хранения и (или) транспортирования.

Каждое из этих сложных свойств предопределяется рядом факторов, возникающих как на предшествующих (в меньшей степени), так и на последующих этапах проектирования самолета. Однако на этапе выбора КСС необходимо выделить только те долевые составляющие, которые могут быть непосредственно связаны с реализацией данной КСС и ее вида в металлическом варианте агрегата.

Выбор количественных значений уровней долевых частей этих составляющих сопряжен с необходимостью постановки и решения соответствующих задач, с учетом которых уровень обеспечения надежности агрегата, реализуемой КСС, определится составляющими

$$\bar{K}_{33j} = \frac{K_{33j}}{K_{33jД16}}, \quad (15)$$

где параметры K_{33j} и $K_{33jД16}$ относятся соответственно к уровням, определенным пп. 3.1 – 3.4 табл. 2.

4 Уровень обеспечения технологичности реализуемой КСС

В отличие от принятой выше весьма узкой трактовки технологичности на этапе формирования полуфабрикатов ПКМ этап выбора КСС агрегата требует учета более широкой трактовки этого термина.

Как известно, технологичность является одной из важнейших комплексных характеристик совершенства авиационной техники. Она в значительной степени определяет уровень их технико-эксплуатационных характеристик (ТЭХ). Повышение технологичности позволяет существенно снизить материальные, трудовые и энергетические затраты при произ-

водстве, эксплуатации, ремонте изделия, являясь одной из основных задач, решаемых в процессе его создания [15, 17-18].

При принципиальном различии в определении понятия технологичности она трактуется как совокупность свойств конструкции, обеспечивающих оптимальные затраты труда, средств, материалов и времени при установленных значениях показателей качества и принятых условиях изготовления, эксплуатации и ремонта.

Для оценки технологичности вариантов конструкции самолетов применяются различные методы, классификация которых приведена в [17 – 19]:

- качественный;
- количественные (экспертных оценок, аналоговый, структурных показателей, аналитический).

В настоящее время наиболее распространен метод качественной оценки, который применяется на всех стадиях проектирования, изготовления и эксплуатации изделий.

Качественная оценка базируется на знаниях, накопленных в области обеспечения технологичности авиационной техники (АТ) и опыте исполнителей (конструкторов и технологов), участвующих в создании изделия. Качественная оценка технологичности, несомненно, дает положительный эффект, однако имеет ряд существенных недостатков [17].

Основным содержанием метода количественной оценки технологичности является расчет и сравнение ее показателей.

Методика расчета комплексных показателей технологичности и определение частных показателей для каждого вида производства изложена подробно в методических материалах [19]. В [17] приведена таблица показателей технологичности применительно к АТ. В таблице показан примерный состав основных и дополнительных частных показателей технологичности конструкции изделия. При необходимости могут быть приняты и другие показатели, не указанные в данной таблице, но характерные для рассматриваемой конструкции и вида производства.

Основные показатели технологичности могут быть определены в начале стадии рабочего проектирования, когда разработан классификатор деталей по классификационным группам и выделены типовые представители.

Представляется оправданным в рамках данной статьи ввести обобщенный (интегральный) уровень технологичности реализации КСС агрегата из ПКМ, выражаемый параметром

$$\bar{K}_{3j\xi} = \frac{\sum_{j=1}^k K_{j \text{техн.ПКМ}}}{\sum_{j=1}^k K_{j \text{техн.Д16}}} . \quad (16)$$

Здесь $K_{j_{техн.ПКМ}}$, $K_{j_{техн.Д16}}$ – составляющие показателей технологичности реализуемой КСС агрегата из ПКМ и металла из перечня таблицы [17], учет которых признан желательным соответствующей службой фирмы.

5. Долевая составляющая уровня технологической себестоимости агрегатов реализуемой КСС, определяемый в каноническом виде, аналогичном (10).

6. Долевая составляющая относительного уровня доступности реализации КСС, определяемая в виде, аналогичном (12).

Синтез относительного критерия эффективности применения ПКМ на этапе КТР узлов, деталей и соединений

Внимательный анализ опыта проектирования агрегатов самолета из ПКМ на этапе выбора КТР узлов, деталей и соединений позволяет заключить, что структурно и содержательно его долевые составляющие совпадают с выделенными выше на этапе выбора КСС (табл. 2).

Принципиальное отличие составляющих этапа выбора КТР состоит в том, что в рамках принятой КСС агрегата имеет место конечное (ограниченное) расчетное число КТР, каждое из которых однозначно соответствует вполне определенной, но допустимой несущей способности агрегата. При этом всегда может быть выделено одно (или несколько) КТР, соответствующее минимальному значению составляющей критерия (показателя) эффективности. Именно это значение составляющей должно быть отнесено к соответствующему минимальному значению аналога КТР из КСС металлического агрегата.

Сумма отношений этих составляющих с соответствующими коэффициентами приоритетности определит относительный интегральный критерий эффективности применения ПКМ на этапе КТР узла, детали и соединения:

$$\bar{K}_{ij\xi}^{КТР} = \frac{\sum_{i=1}^6 \alpha_i K_{ij\xi}^{КТР ПКМ}}{\sum_{i=1}^6 \beta_i K_{ij\xi}^{КТР Д16}}, \quad (17)$$

где $\sum_{i=1}^6 \alpha_{ij\xi} = 1$, $\sum_{i=1}^6 \beta_{ij\xi} = 1$ – коэффициенты приоритетности i -й (j -й и ξ -й) составляющей соответствующих долей, определяемые (назначаемые) соответствующей службой.

При этом входящие в (16) параметры, относящиеся к КТР ПКМ и КТР Д16, в общем случае различны как по структуре (составу), так и по содержанию. Коэффициенты приоритетности определяются экспертами.

Критерий эффективности этапа сборки агрегата самолета из ПКМ

Сборка агрегата осуществляется, как известно [20 – 21], одним из методов:

- сборка по базовой детали;
- сборка по разметке;
- сборка с базированием по сборочным отверстиям.

В зависимости от вида комплектующих деталей в производстве изделий из ПКМ можно выделить три основных типа сборки деталей [7]: из полуфабрикатов (интегральная сборка); из полуфабрикатов и готовых изделий; из готовых деталей.

Первый тип технологического процесса сборки представляет собой процесс формирования изделия из нескольких заготовок полуфабриката ПКМ (препрега) на одном приспособлении (собираемом в процессе формирования изделия), завершающийся формованием этого изделия.

Этот процесс отличается рядом особенностей по сравнению со сборкой металлических деталей, связанных с совмещением процесса образования материала и изделия: сборочную оснастку конструируют так, чтобы каждый элемент конструкции с требуемой точностью занял свое положение в изделии (отсутствует возможность корректировки их расположения в процессе сборки; элементы оснастки должны обеспечивать в процессе формования заданную точность структуры материала изделия (схемы армирования, объемного содержания и т.д.) и его качество (отсутствие непроклеев, пережогов, содержание пор в допустимых пределах и т.д.); допуски на поверхности готового изделия (точность обводов, допустимая волнистость, ступенчатость и т.д.).

Второй тип технологического процесса сборки представляет собой процесс формирования изделия из нескольких заготовок полуфабриката ПКМ (препрега) и готовых изделий на одном приспособлении (собираемом в процессе формирования изделия), завершающийся единым процессом формования всего изделия.

Допуски на размеры отдельных элементов конструкции (входящих в сборку в виде полуфабрикатов) обеспечиваются как элементами оснастки, так и комплектующими элементами сборки.

Третий тип сборки деталей из ПКМ не отличается от типа сборки металлических деталей. Сборка отсеков и агрегатов не имеет принципиальных особенностей в оснащении за исключением специфических условий взаимной фиксации элементов или агрегатов. Кроме того, при сборке панели и агрегаты из ПКМ соединяют угольниками из лент, полимеризуемых без нагрева или с нагревом в стапеле общей сборки.

Процессы сборки агрегата из ПКМ имеют существенные отличия от металлического аналога. В.Т. Щербаков выделяет три уровня интегральности сборки агрегата [22, 23]:

– первый уровень формируется из нескольких элементов (готовых или недополимеризованных деталей), окончательно формуемых в единой оснастке за один технологический цикл;

– второй уровень включает в себя комплектующие из деталей – элементов первого уровня, окончательно формуемые одновременно в единой оснастке;

– третий уровень включает в себя сложные конструкции типа совмещенно формуемых продольно-поперечных панельных каркасов, многолонжеронных и многострингерных узлов, формуемых одновременно в единой оснастке.

Тем не менее сборка агрегата из ПКМ так или иначе реализуется с применением одного из указанных методов [20, 21] (см. выше).

Как и ранее, анализ и синтез ряда публикаций и опыта проектирования авиаконструкций на этапе сборки агрегата позволяют выделить следующие долеваемые составляющие критерия эффективности этого этапа (табл. 3).

Таблица 3 – Долеваемые составляющие критерия эффективности проектирования агрегата из ПКМ на этапе сборки

К	Долеваемые составляющие
1	1. Комплексный показатель эффективности технологической подготовки производства (ТПП), оснащения и оборудования для сборки агрегата (показатель эффективности ТПП оснастки): 1.1. – уровень расхода материала на оснастку $G_{мосн}$; 1.2. – уровень трудоемкости изготовления оснастки $T_{осн}$; 1.3. – уровень себестоимости изготовления оснастки $C_{осн}$
2	2. Комплексный показатель эффективности техпроцесса сборки агрегата: 2.1. – уровень производительности труда $\Pi_{пр\ тр\ сб}$; 2.2. – уровень технологичности и безопасности процесса сборки $TБ_{сб}$; 2.3. – уровень полной трудоемкости процесса сборки $T_{сб}$; 2.4. – уровень полного цикла сборки $\zeta_{сб}$; 2.5. – уровень масштаба производственных площадей под сборку $F_{сб}$; 2.6. – уровень полного цикла себестоимости сборки $C_{сб}$; 2.7. – уровень точности (погрешностей, допусков процесса сборки) $D_{сб}$

Тогда применительно к этапу сборки агрегата воздушного судна из ПКМ относительный критерий эффективности может быть принят в виде

$$\bar{K}_{ij\text{ ктр сб}}^{\text{эф}} = \frac{1}{K_0} \sum_{i=1}^{K_0} \varphi_i^{\text{ктро}} \bar{K}_i^{\text{ктро}} + \frac{1}{K_c} \sum_{j=1}^{K_c} \varphi_j^{\text{ктрс}} \bar{K}_j^{\text{ктрс}}, \quad (18)$$

где K_0, K_c – число структурных единиц оснастки и сборки соответственно

($K_0=3, K_c=7$); $\varphi_i^{\text{ктро}} = \frac{K_{i\text{ПКМ}}^o}{K_{i\text{Д16}}^o}$ – отношение части вклада i -й структурной единицы оснастки для агрегата из ПКМ к части вклада i -й структурной единицы оснастки для металлического агрегата;

$\varphi_j^{\text{ктрс}} = \frac{K_{j\text{ПКМ}}^c}{K_{j\text{Д16}}^c}$ – то же для j -й части вклада структурной единицы сборки;

$\bar{K}_i^{\text{ктро}} = \frac{K_{i\text{ПКМ}}^{\text{ктро}}}{K_{i\text{Д16}}^{\text{ктро}}}$ – отношение i -й структурной единицы оснастки для агрегата из ПКМ к i -й структурной единице оснастки для агрегата из металла;

$\bar{K}_j^{\text{ктрс}} = \frac{K_{j\text{ПКМ}}^{\text{ктрс}}}{K_{j\text{Д16}}^{\text{ктрс}}}$ – то же для j -й структурной единицы сборки.

В развернутом виде относительный критерий эффективности проектирования агрегата воздушного судна из ПКМ на стадии сборки агрегата (18) имеет вид

$$\begin{aligned} \bar{K}_{ij\text{ ктр сб}}^{\text{эф}} = & \frac{1}{K_0} \left(\frac{K_{G\text{ПКМ}}^o G_{M\text{ПКМ}}}{K_{G\text{Д16}}^o G_{M\text{Д16}}} + \frac{K_{T\text{ПКМ}}^o T_{\text{оснПКМ}}}{K_{T\text{Д16}}^o T_{\text{оснД16}}} + \frac{K_{C\text{ПКМ}}^o C_{\text{оснПКМ}}}{K_{C\text{Д16}}^o C_{\text{оснД16}}} \right) + \\ & + \frac{1}{K_c} \left(\frac{K_{\text{пртрПКМ}} \Pi_{\text{пртрПКМ}}}{K_{\text{пртрД16}} \Pi_{\text{пртрД16}}} + \frac{K_{TБ\text{ПКМ}} TБ_{\text{ПКМ}}}{K_{TБ\text{Д16}} TБ_{\text{Д16}}} + \frac{K_{T\text{ПКМ}} T_{\text{ПКМ}}}{K_{T\text{Д16}} T_{\text{Д16}}} + \right. \\ & \left. + \frac{K_{Ц\text{ПКМ}} Ц_{\text{ПКМ}}}{K_{Ц\text{Д16}} Ц_{\text{Д16}}} + \frac{K_{F\text{ПКМ}} F_{\text{ПКМ}}}{K_{F\text{Д16}} F_{\text{Д16}}} + \frac{K_{D\text{ПКМ}} D_{\text{ПКМ}}}{K_{D\text{Д16}} D_{\text{Д16}}} + \frac{K_{C\text{ПКМ}} C_{\text{ПКМ}}}{K_{C\text{Д16}} C_{\text{Д16}}} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

Выводы

1. Получил дальнейшее развитие и реализацию ранее предложенный автором подход к формированию составляющих комплексного критерия эффективности проектирования агрегатов гражданских самолетов из ПКМ на основных стадиях их создания, позволяющий при надлежащем информационном обеспечении с приемлемой точностью прогнозировать рациональный объем применения композитов в конкретных

условиях ресурсного обеспечения их государственной поддержкой отечественного авиастроения.

2. Предложены аналитические зависимости для прогнозирования компонент составляющих критерия эффективности применения ПКМ на этапах формирования их полуфабрикатов, выбора КСС, КТР узлов, деталей и соединений и сборки агрегата, которые предполагают наличие у проектирующей фирмы количественных данных, от точности которых и степени учета входящих факторов зависит и достоверность прогноза эффективности применения ПКМ.

Поэтому практическая реализация предложенного подхода требует проведения параллельных исследований, анализа и синтеза, а также оптимизации объема учитываемых факторов.

Список использованных источников

1. Коцюба, А.А. Формирование критерия эффективности проектирования конструкций гражданских самолетов из полимерных композитов на этапе выбора их состава [Текст] / А.А. Коцюба // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3 (87).– Х., 2016. – С. 19 – 31.

2. Большой толковый словарь русского языка [Текст] / под ред. С.А. Кузнецова. – СПб.: Норинт, 2001. – 1596 с.

3. Оболенский, Е.П. Прочность летательных аппаратов и их агрегатов [Текст] / Е.П. Оболенский, Б.И. Сахаров, В.А. Сибиряков; под ред. И.Ф. Образцова. – М.: Машиностроение, 1995. – 504 с.

4. Авдонин, А.С. Расчет на прочность летательных аппаратов: учеб. пособие [Текст] / А.С. Авдонин, В.И. Фигуровский. – М.: Машиностроение, 1983. – 440 с.

5. Конструкции летательных аппаратов и их систем: конспект лекций [Текст] / А.И. Андриенко, В.В. Кириченко, В.И. Парасюк и др. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2003. – Ч. 1. – 178 с.

6. Конструкции летательных аппаратов и их систем: конспект лекций [Текст] / А.И. Андриенко, В.В. Кириченко, В.И. Парасюк и др. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2004. – Ч. 2. – 174 с.

7. Технологія виробництва літальних апаратів із композиційних матеріалів: підруч. [Текст] / С.А. Бичков, О.В. Гайдачук, В.Є. Гайдачук, В.Д. Гречка, В.М. Кобрін; за ред. В.Є. Гайдачука. – К.: ІСДО, 1995. – 376 с.

8. Буланов, И.М. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов: учебник [Текст] / И.М. Буланов, В.В. Воробей. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. – 516 с.

9. Технология производства изделий и интегральных конструкций из композиционных материалов в машиностроении [Текст] / под ред. А.Г. Братухина, В.С. Боголюбова, О.С. Сироткина. – М.: Готика, 2003. – 516 с.

10. ДСТУ 2860-94 Надійність техніки. Терміни та визначення [Текст]. – 01.01.1996. – К.: Держспоживстандарт України, 1994. – 21 с.
11. Волков, Л.И. Надежность летательных аппаратов: учеб. пособие [Текст] / Л.И. Волков, А.М. Шишкевич. – М.: Высш. Шк., 1975. – 296 с.
12. Анцелиович, Л.Л. Надежность, безопасность и живучесть самолета: учебник для вузов [Текст] / Л.Л. Анцелиович. – М.: Машиностроение, 1985. – 296 с.
13. Гайдачук, В.Е. О принципах и проблемах проектирования авиаконструкций из композиционных материалов [Текст] / В.Е. Гайдачук // Самолетостроение и техника воздушного флота: респ. межвед. темат. науч.-техн. сб. – Х., 1975. – С. 51 – 56.
14. Инженерные методы расчета стеклопластиковых авиаконструкций и элементов их сочленений : дис. ... канд. техн. наук / Гайдачук Виталий Евгеньевич; Харьк. авиац. ин-т. – Х., 1969. – 188 с.
15. Руководство по технологичности самолетных конструкций [Текст] / под ред. П.Н. Беянина. – М.: НИАТ, 1983. – 720 с.
16. Прялин, М.А. Оценка технологичности конструкций [Текст] / М.А. Прялин, В.М. Кульчев. – К.: Техніка, 1985. – 120 с.
17. Кривов, Г.А. Технология самолетостроительного производства [Текст] / Г.А. Кривов. – К.: КВІЦ, 1997. – 459 с.
18. Зернов, И.А. Теоретические основы технологии и процессы изготовления деталей самолетов [Текст] / И.А. Зернов, Л.М. Коноров. – М.: Оборонгиз, 1960. – 627 с.
19. Методические материалы ММ 1.4.1237-83. Технологическое проектирование самолетных конструкций. – М.: НИАТ, 1984. – 116 с.
20. Технология самолетостроения: учебник для вузов [Текст] / под ред. А.Л. Абибова. – М.: Машиностроение, 1982. – 651 с.
21. Бабушкин, А.И. Методы сборки самолетных конструкций [Текст] / А.И. Бабушкин. – М.: Машиностроение, 1983. – 248 с.
22. Конструктивно-технологическое решение деталей и агрегатов летательных аппаратов из композиционных материалов: учеб. пособие [Текст] / В.Е. Гайдачук, А.М. Гончаров, Я.С. Карпов и др. – Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1989. – 80 с.
23. Забашта, В.Ф. Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения: справ. [Текст] / В.Ф. Забашта, Г.А. Кривов, В.Г. Бондарь. – К.: Техніка, 1993. – 160 с.

Поступила в редакцию 25.11.2016.

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.В. Гайдачук,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.*