

## **КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПОДХОД К КРИТЕРИАЛЬНОЙ ОЦЕНКЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ АВИАКОНСТРУКЦИЙ, ФОРМИРУЕМЫХ МЕТОДАМИ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ**

Высокая конкуренция на мировом рынке продаж и услуг гражданских самолетов требует непрерывного повышения летно-технических и эксплуатационных характеристик отечественных воздушных судов транспортной категории. Одним из эффективных способов решения этой проблемы представляется расширение объемов применения наряду с полимерными композиционными порошковых материалов, обладающих широкими возможностями [1 – 4].

В наших работах [1 – 2] проведен обзор и анализ состояния проблемы повышения эксплуатационных характеристик авиакосмической техники методами порошковой металлургии. В них вскрыты стратегические (фундаментальные) и тактические аспекты проблемы, разработана классификационная блок-схема методов порошковой металлургии и критериев их эффективности для повышения эксплуатационных характеристик изделий рассматриваемого класса этими методами, а также выявлены основные составляющие концепции повышения эксплуатационных характеристик конструкций агрегатов отечественных гражданских самолетов методами порошковой металлургии и газотермических покрытий

Ниже обсуждается концептуальный подход к критериальной оценке возможностей повышения эксплуатационных характеристик деталей авиационных конструкций, изготавливаемых методами порошковой металлургии.

Прежде всего представляется необходимым определить само понятие (термин) «эксплуатационная характеристика конструкции». По видимому, этот термин определяет свойства конструкционного материала (материала конструкции), существенно влияющие на показатели (критерии) эффективности его применения в изделии. В свою очередь термин «свойство» определяется как качество или признак, составляющий отличительную особенность чего-либо [5] (в данном случае – материала). Но там же [5] качество – существенный признак, свойство, отличающее один предмет (в данном случае – материал) от другого, а «признак» - показатель, примета, знак, по которому можно определить что-либо [5] (в данном случае – материал). Таким образом свойство материала – это его признак (определитель), по которому можно определить этот материал.

Резюмируя проведенный выше анализ, следует констатировать, что свойства материалов – это набор (перечень) однозначно опреде-

ленных, содержательно общих для всего класса материалов признаков (качеств), отличающихся только по величине (уровню), позволяющий сопоставлять эти материалы (ранжировать) по эффективности (значимости) их применения для реализации того или иного критерия (показателя) уровня, характеризующего потребительские (эксплуатационные) требования к конструкции из данного материала.

В связи с этим для разработки концепции повышения эксплуатационных характеристик (свойств) конструкций агрегатов самолета необходимо воспользоваться той или иной классификацией свойств материалов. Наиболее полной и информативной классификацией представляется приведенная в [6], в которой выделены два класса свойств материалов: физические, химические.

К физическим относятся фундаментальные свойства веществ, отражающие поведение материала при взаимодействии с силовыми, тепловыми, электрическими, магнитными, радиационными и другими полями, являющиеся предметом изучения физики как отрасли естествознания и формирующие условия эксплуатации изделий. К химическим относят свойства материалов, отражающие характер взаимодействия с другими веществами.

В зависимости от рода инженерной деятельности часть физических и химических свойств стали относить к механическим, характеризующим поведение материала в силовых полях (при механическом нагружении), часть – к технологическим, связанным с особенностями переработки материалов, сборки изделий и придания им внешнего вида, соответствующего дизайну, и часть – к эксплуатационным, которыми должен обладать материал для устойчивого и надежного функционирования в специфических (заданных) условиях эксплуатации – в радиационных и электромагнитных полях, при высоких или низких температурах и т.п. [6].

В соответствии с делением свойств материалов на эксплуатационные, механические и технологические авторы [6] приводят таблицы, в которых указаны сами свойства, их суть, характеристика и единица измерения. Всего в таблицах приведено 59 свойств материалов. Как указывают авторы [6], в таблицах приведены определения важнейших физических и химических свойств, отнесенных к эксплуатационным, механическим и технологическим. В этих таблицах приведены далеко не все свойства материалов, а только те, с которыми инженеру приходится сталкиваться наиболее часто. Можно согласиться с авторами [6] относительно отнесения части класса (подкласса) физических и химических свойств к механическим по характеру взаимодействия материала с силовыми полями и к технологическим по характеру переработки данного материала в изделие, сборки изделия и (или) дизайна – к технологическим. Однако выделенные таким образом подклассы свойств материалов так или иначе и в том или ином виде должны обеспечивать устойчивое и

надежное функционирование материала в изделии в заданных условиях его (изделия) эксплуатации.

Таким образом все свойства конструкционных материалов являются эксплуатационными характеристиками. Другое дело, в какой степени (насколько значительно) те или иные свойства определенного подкласса конструкционных материалов предопределяют повышение эффективности конструкции при ее эксплуатации в нормированных условиях для гражданских самолетов по критериальной оценке.

Уровни критериев эффективности представлены в блок-схеме рис. 1. Они соответствуют иерархическому принципу, принятому в квалиметрии [7 – 11] и др., в соответствии с которым единичные критерии  $K_{едi}$  характеризуют количественно какое-либо одно свойство материала\*. Единичные критерии объединяются в групповые,  $K_{эpi}$ , которые функционально и количественно описывают критерии нескольких свойств, близких между собой на более высоком иерархическом уровне. Объединения групповых критериев  $K_{эpi}$  образуют комплексные критерии  $K_{комплi}$ . Наконец интегральный критерий есть функция, объединяющая все критерии предшествующих уровней, а также ее количественное значение (рис. 2).

Синтезированная на рис. 1 блок-схема содержит критерии эффективности повышения эксплуатационных характеристик деталей самолета, формируемых методами порошковой металлургии, обзор и анализ которых проведен в [4]. В качестве таких критериев, как показывает анализ Норм летной годности самолетов [12], а также других источников [13 – 20] приняты: комплексный критерий назначенного ресурса  $K_p$ ; а также комплексные критерии – предельные состояния агрегата (детали)  $K_{пс}$ ; надежность  $K_n$ ; нормированные условия среды эксплуатации  $K_{сэ}$ , включающие в себя соответствующие им групповые критерии.

Однако комплексным критерием  $K_p$  не ограничивается весь массив критериев эффективности эксплуатационных характеристик. Интегральный критерий объединяет и комплексный критерий  $K_p$  и ряд других, включающих групповые критерии, основными из которых являются критерии: показателей качества изделия  $K_{кач}$ , технологичности  $K_{техн}$ , весовой отдачи  $K_{во}$ , стоимости  $K_c$ .

---

\* Некоторые единичные эксплуатационные характеристики ряда групповых критериев могут включать в себя еще более конкретизированные (элементные) «субединичные» свойства.

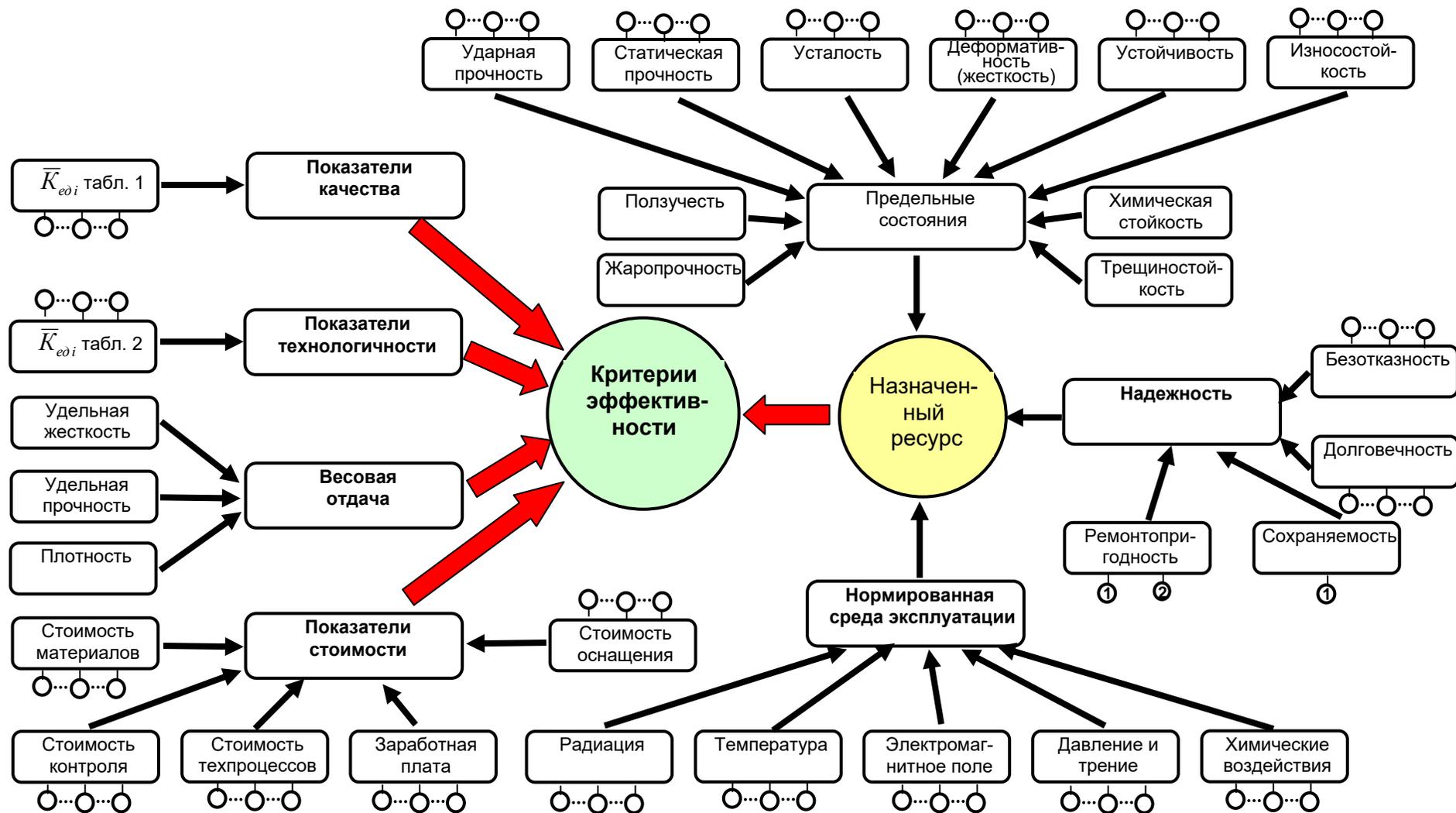


Рисунок 1 – Блок-схема критериев эффективности повышения эксплуатационных характеристик агрегатов самолета путем рациональной замены конструкционных материалов  
 ○...○...○ – единичные критерии, входящие в соответствующие групповые

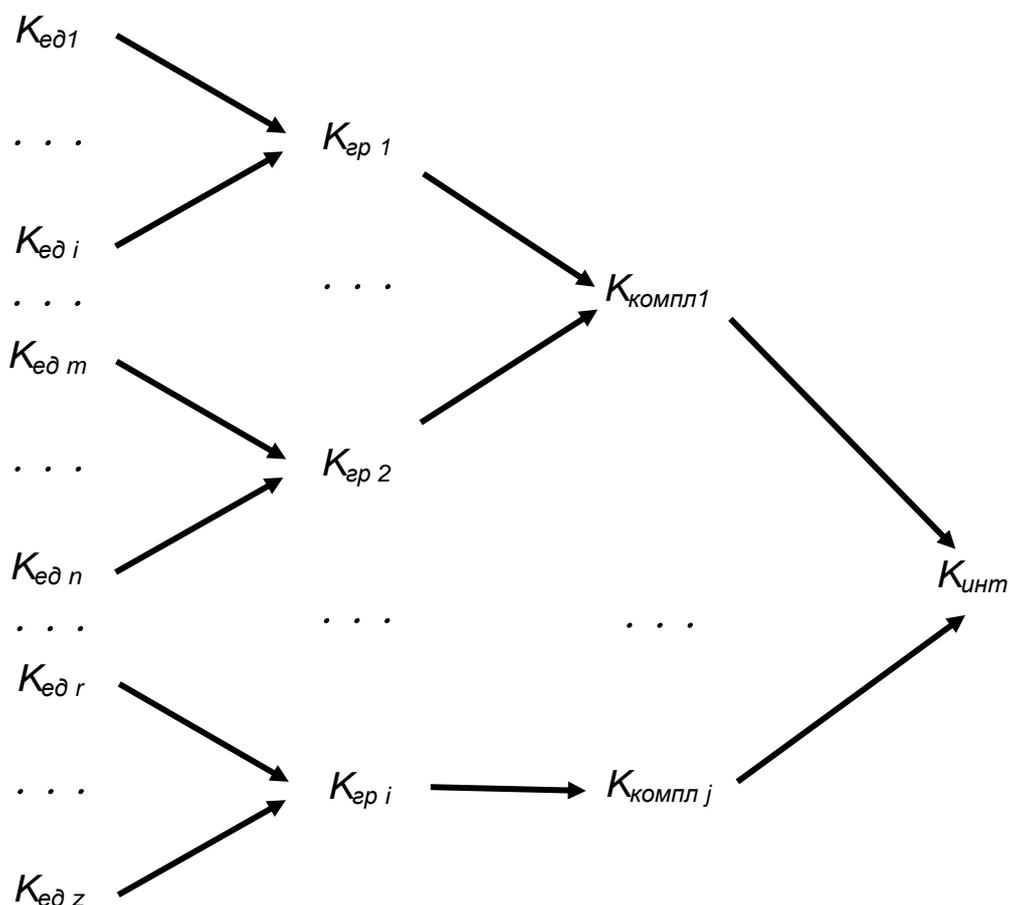


Рисунок 2 – Иерархическая структура критериев эффективности повышения эксплуатационных характеристик конструктивных элементов

Входящие в блок – схему рис. 2 комплексные критерии представлены с включенными в них групповыми за исключением показателей качества и технологичности, по которым имеют место как неоднозначности, касающиеся как их содержания, так и статуса определяемого соответствующими стандартами или аналогичными им документами.

Надежность как свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения (то есть в нормированной среде эксплуатации), технического обслуживания, хранения, ремонтов и транспортирования (перемещения), а также ее показатели безотказность, ремонтпригодность, долговечность и сохраняемость (рис. 2), определены ДСТУ ISO 9004-1-95 [10] и тем самым является самостоятельной (автономной) сложной эксплуатационной характеристикой объекта.

В то же время эта характеристика введена в состав номенклатуры показателей качества как единичный критерий эффективности повышения эксплуатационных характеристик (то есть квалиметрическая характеристика объекта) [7 – 11].

В таблице 1 приведены групповые показатели качества, содержащиеся в [7] и других источниках, и их краткие характеристики. Эти показатели, как уже отмечалось выше, регламентированы в соответствующих стандартах или других регламентах.

Теперь проанализируем блок критериев технологичности. По видимому, первым отечественным руководящим материалом по технологичности был изданный в 1954 году, дополненный и расширенный в [21], где четко сформулированы три группы задач, решаемых технологичностью. Среди этих критериальных задач указаны и обеспечение высокого качества изделия, а также его надежности и живучести. Общая схема показателей технологичности изделий приведена на рис. 3 [21].

Таблица 1 – Групповые показатели качества и их характеристика [5]

№ п/п	Показатели качества	Суть и характеристика показателей качества
1	Назначения	Предназначены для оценки полезного эффекта при использовании изделия по назначению. Включают показатели функциональной и технической эффективности и конструктивные.
2	Надежности	Включают показатели ремонтпригодности, сохраняемости, безопасности и долговечности.
3	Экономичного использования сырья	Характеризуют свойства изделия, отражающие его техническое совершенство по уровню потребления им ресурсов.
4	Эргономические	Учитывают комплекс гигиенических, антропологических, физиологических и психологических свойств оператора.
5	Эстетические	Отражает рациональность формы и совершенство производственного исполнения изделия.
6	Технологичности	Включает коэффициент сборки, КИМ и показатели трудоемкости.
7	Транспортабельности	Характеризует приспособленность изделия к перемещению без использования и потребления.
8	Стандартизации и унификации	Включен в показатели технологичности.
9	Патентно-правовые	Характеризуют патентно-правовую защищенность.
10	Экологические	Характеризуют уровень вредных воздействий на окружающую среду в производстве и эксплуатации.
11	Безопасности	Характеризуют вероятность безопасной работы при производстве и эксплуатации.

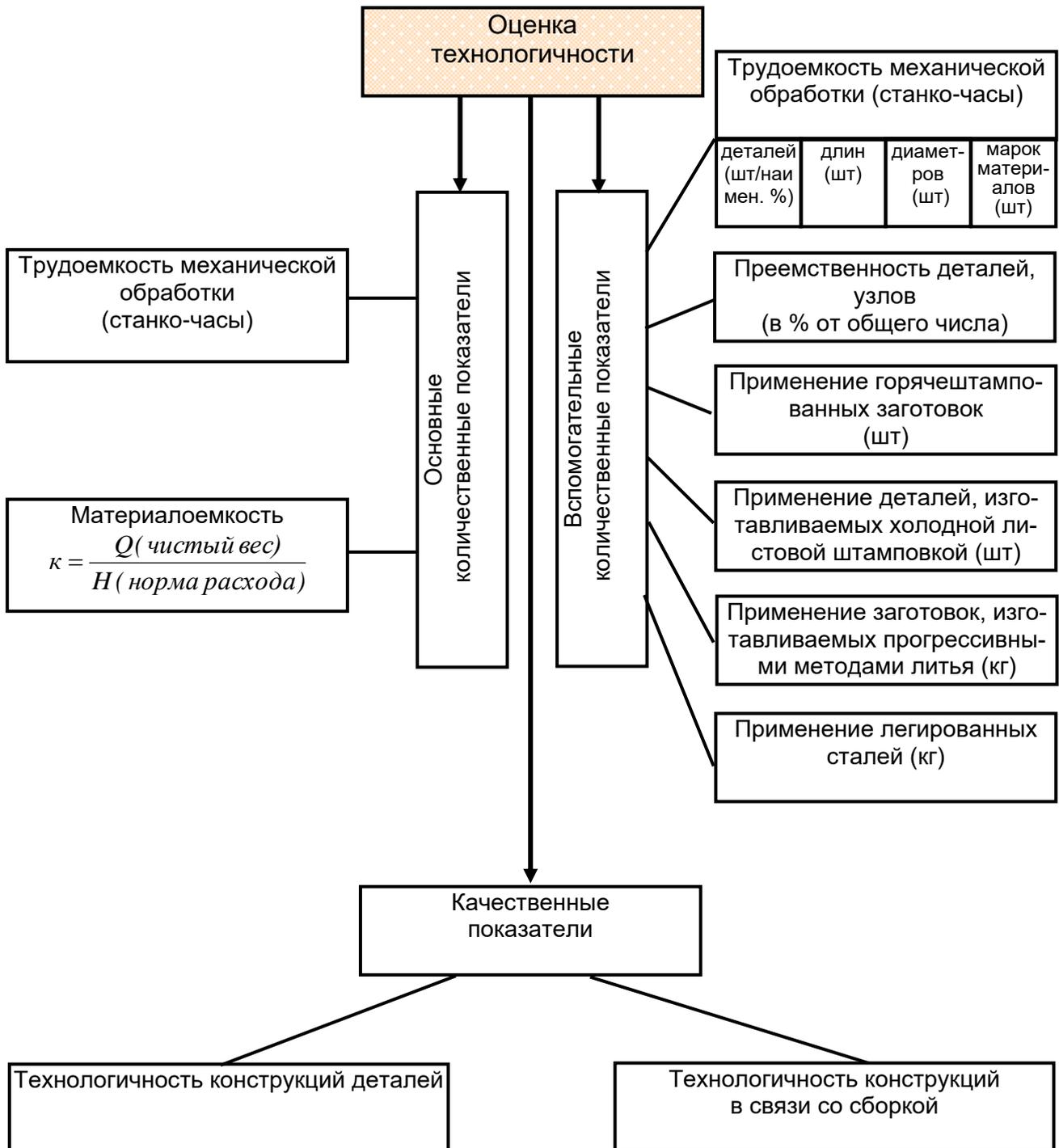


Рисунок 3 – Общая схема показателей оценки технологичности изделий

В [21], по-видимому, впервые сформулировано само понятие технологичности: технологичность конструкций – совокупность свойств конструкции изделия, проявляемых в возможности оптимизации затрат труда, средств, материалов и времени при технической подготовке производства, изготовлении, эксплуатации и ремонта конструкций изделий того же назначения при обеспечении установленных значений показателей качества в принятых условиях изготовления, эксплуатации и ремонта.

Как отмечается в [21], технологичность – свойство конструкции, заложенное в нем при проектировании и позволяющее получить изделие с заданным уровнем качественных характеристик и высокими технико-экономическими показателями в производстве и эксплуатации.

По области проявления свойств различают производственную и эксплуатационную технологичность. Производственная технологичность конструкции изделия проявляется в экономии затрат средств и времени на конструкторскую и технологическую подготовку производства, а также на изготовление изделий. Эксплуатационная технологичность конструкции изделия проявляется в сокращении затрат средств и времени на техническое обслуживание и ремонт изделия, а также на подготовительные и заключительные работы, связанные с полетом.

В [18] приведена номенклатура показателей технологичности для деталей, сборочных единиц и изделия в целом, применяемых на разных этапах жизненного цикла изделия (проектирование, производство, эксплуатация).

В таблице 2 выделен фрагмент этой номенклатуры для деталей изделия, соответствующий рассматриваемому нами классу изделий (деталей).

Таблица 2 Номенклатура групповых показателей технологичности деталей

№ п/п	Показатели технологичности конструкции деталей
1	Трудоемкость изготовления изделия (детали) $T_u$
2	Технологическая себестоимость $C_m$ или себестоимость изделия ( $C_u$ )
3	Коэффициент унификации конструктивных элементов $K_{yэ}$
4	Коэффициент применяемости стандартизованных обрабатываемых поверхностей $K_{cps}$
5	Коэффициент обработки поверхности $K_{po}$
6	Максимальное значение класса точности обрабатываемых поверхностей
7	Максимальное значение класса чистоты обрабатываемых поверхностей.
8	Коэффициент использования материала (КИМ)
9	Масса изделия $M$
10	Коэффициент обрабатываемости материалов $K_{OM}$

Анализ и сравнение показателей качества (табл. 1), технологичности (табл. 2) и надежности позволяет отметить следующее: каждый из трех классов критериев входит в соответствующий нормативный документ, регламентирующий его целевое применение для оценивания только изолированного соответствующего класса и исключает их совместное использование в единой классификационной системе, так как такое их объединение противоречит одному из основных принципов и правил теории классификаций – правилу деления объема понятий [23]: члены классификации должны взаимно исключать друг друга, то есть ни один из них не должен входить в объем другого класса.

Поэтому классы критериев качества, технологичности и надежности сохраняются в их нормативных объемах только для независимого (автономного) использования. В рамках же полной классификации рис. 2 составляющие надежности и технологичности исключаются из групповых критериев комплексного показателя качества и обретают ранг соответствующих комплексных критериев.

В то же время отметим, что предложенная классификация критериев эффективности в перспективе не исключает расширения путем обоснованного введения новых дополнительных единичных групповых и комплексных критериев, не противоречивых правилам теории классификации.

Кроме того, из классификационной схемы рис. 1 могут исключаться те или иные критерии и их составляющие при оценке эффективности изготовления того или иного класса (подкласса) деталей методами порошковой металлургии, если заменяющий материал или сфера эксплуатации детали не требуют учета исключаемых показателей.

Количественная оценка критериев эффективности производится в соответствии с общепринятыми принципами и правилами, приведенными в достаточно полном объеме, например, в [7, 24 – 26].

Каждому из критериев блок-схемы рис. 1 соответствует комплекс эксплуатационных характеристик (свойств), сумма которых предопределяет уровень повышения эффективности объекта из того или иного материала, полученного соответствующим методом порошковой металлургии (МПМ), в сравнении с базовым (заменяемым) объектом, изготовленным из традиционного материала.

Большинство из выделенных выше комплексных критериев предопределяют эффективность замены материала на получаемый МПМ, если сумма входящих в них групповых критериев не меньше единицы.

Таким образом

$$\bar{R}_i(K) = \frac{R_{МПМi}}{R_{базi}} \geq 1, \quad K \in (K_{пред.с.}, K_n, K_{кач.}, K_{техн.}, K_{в.о.}) \cdot (1)$$

Здесь  $\bar{R}_i(K)$   $i$ -й комплексный критерий заменяющего материала  $R_{МГМi}$ , отнесенный к аналогичному критерию базового материала  $R_{базi}$ .

Однако, если по своему характеру входящие в заменяемый материал составляющие комплексного критерия при своем снижении обеспечивают повышение эффективности (роста) комплексного критерия, то относительный комплексный критерий такой замены должен отражаться обратной по отношению к (1) зависимостью.

Так комплексный критерий стоимости  $K_c$  предопределяет эффективность замены базового материала на полученный МГМ, если сумма входящих в него групповых критериев базового материала  $R_i$  ниже, чем ее значение у заменяемого материала, т.е. имеет место обратная (1) зависимость

$$\bar{R}_i(K_c) = \frac{R_{базi}}{R_{МГМi}} \geq 1. \quad (2)$$

Тогда полная критериальная оценка эффективности замены материала на получаемый МГМ определится зависимостью

$$\bar{K}_{инт} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \bar{R}_{i,компл.} (\bar{K}_i) > 1, \quad (3)$$

где  $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$ ,  $\bar{R}_{i,компл.}$  – относительные комплексные критерии,  $\alpha_i$  – коэффициенты значимости соответствующих эксплуатационных характеристик материала, определяемые экспертным путем принятия решений [24 – 27].

Входящие в (3) относительные комплексные критерии  $\bar{R}_{компл.}$  в качестве составляющих включают в себя соответствующие относительные групповые

$$\bar{K}_{компл} = \sum_{i=1}^m \bar{R}_{гр.i} \beta_i, \quad (4)$$

где  $\sum_{i=1}^m \beta_i = 1$ ,  $\beta_i$  – коэффициенты значимости соответствующих критериев  $\bar{K}_{гр.i}$ .

В свою очередь  $\bar{K}_{гр.i}$  включают в себя единичные  $\bar{K}_{ед..i}$ :

$$\bar{K}_{гр.i} = \sum_{i=1}^r \bar{R}_{ед..i} \gamma_i, \quad (5)$$

где  $\sum_{i=1}^r \gamma_i = 1$ ,  $\gamma_i$  – коэффициенты значимости соответствующих критериев  $\bar{K}_{ед..i}$ .

## Выводы

1. Разработан концептуальный подход и реализующая его блок-схема критериальной оценки возможностей повышения эксплуатационных характеристик деталей агрегатов авиационных конструкций, формируемых методами порошковой металлургии и газотермическим напылением.

2. Реализация этого подхода на ранних этапах освоения этих методов позволяет прогнозировать перспективность применения в отечественных гражданских самолетах спеченных материалов, обеспечивающих снижение их массы, повышения ресурса и других факторов, определяющих их конкурентоспособность на международном рынке продаж и услуг.

## Список использованных источников

1. Конструкционные материалы в самолетостроении [Текст] / А.Г. Моляр, А.А. Коцюба, А.С. Бычков, О.Ю. Нечипоренко. – К.: КВИЦ, 2015. – 400 с.

2. Порошковые материалы для авиационной и ракетно-космической техники [Текст] / А.А. Коцюба, А.С. Бычков, О.Ю. Нечипоренко, И.Г. Лавренко – К.: КВИЦ, 2016. – 304 с.

3. Бычков, А.С. Обзор и анализ состояния проблемы повышения эксплуатационных характеристик авиакосмической техники специальными методами порошковой металлургии. Сообщение 1. Стратегические аспекты состояния проблемы [Текст] / А.С. Бычков // Вопросы проектирования и производства летательных аппаратов: Сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 2 (90). Х., 2017. – С. 24 – 39.

4. Бычков, А.С. Обзор и анализ состояния проблемы повышения эксплуатационных характеристик авиакосмической техники специальными методами порошковой металлургии. Сообщение 2. Тактические аспекты состояния проблемы [Текст] / А.С. Бычков // Вопросы проектирования и производства летательных аппаратов: Сб. науч. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3(91). – Х., 2017. – С.22 – 46.

5. Большой толковый словарь русского языка [Текст] / под ред. С.А. Кузнецова. – СПб: «Норинт», 2001. – 1536 с.

6. Инженерное материаловедение в 3 ч.: учеб. пособие. – Ч. 1: Свойства и структура материалов [Текст] / Я.С. Карпов, Ю.А. Николаева, В.В. Остапчук, Е.Г. Попова, И.М. Тараненко. – Х.: Нац. аэрокосмич. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2017. – 96 с.

7. Качество и сертификация промышленной продукции: учеб. пособие [Текст] / А.Г. Гребенников, А.К. Мялица, В.М. Рябченко, К.Б. Трофимов, В.Я. Фролов. – Х.: «ХАИ», 1998. – 396 с.

8. Андрианов, Ю.М. Квалиметрические аспекты управления качеством новой техники [Текст] / Ю.М. Андрианов, М.В. Лопатин. – Л.: ЛГУ, 1983. – 288 с.

9. Суббето, А.И. Квалиметрия: в 6-ти частях. Ч. II. Экспертная квалиметрия [Текст] / А.И. Суббето. – Л.: ВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1981. – 65 с.

10. ДСТУ ISO 9004-1-95. Управління якістю та елементи системи якості. Ч.1. Настанови. – К.: Держстандарт України, 1995. – 49 с.

11. Бурдаков, В.Д. Квалиметрия транспортных средств [Текст] / В.Д. Бурдаков. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 160 с.

12. Авиационные правила. Часть 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории [Текст]. – М.: МАК, 1993. – 483 с.

13. Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. посібник / Під заг. ред. В.В. Панасюка. Т.9. Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій [Текст] / О.П. Осташ, В.М. Федірко, В.М. Учанін, С.А. Бичков, О.Г. Моляр та інші.; під ред. О.П. Осташа, В.М. Федірка. – Львів: СПОЛОМ, 2007. – 1068 с.

14. Гудков, А.И. Внешние нагрузки и прочность летательных аппаратов [Текст] / А.И. Гудков, П.С. Лешаков. М.: Машиностроение, 1968. – 470 с.

15. Гладкий, В.Ф. Прочность, вибрации и надежность конструкции летательных аппаратов [Текст] / В.Ф. Гладкий. – М.: Наука, 1975. – 456 с.

16. Волков, Л.И. Надежность летательных аппаратов [Текст] / Л.И. Волков, А.М. Шишкевич. – М.: Высшая школа, 1975. – 293 с.

17. Анцелиович, Л.Л. Надежность, безопасность и живучесть самолета [Текст] / Л.Л. Анцелиович:– М.: Машиностроение, 1985. – 296 с.

18. Прялин, М.А. Оценка технологичности конструкций [Текст] / М.А. Прялин, В.М. Кульчев. – К.: Техніка, 1985. – 120 с.

19. Руководство по технологичности самолетных конструкций [Текст] / Под ред. П.Н. Беянина. – М.: НИАТ, 1983. – 720 с.

20. Кривов, Г.А. Система управления качеством производства авиационной техники [Текст] / Г.А. Кривов, В.А. Матвиенко, В.А. Резников. – К.: Техніка, 2004. – 272 с.

21. Технологичность конструкций [Текст] / под ред. С.Л. Ананьева, В.П. Купровича. – М.: Дом техники, 1959. – 452 с.

22. Технология самолетостроения [Текст] / А.Л. Абибов, А.М. Бирюков, В.В. Бойцов и др; под ред. А.Л. Абибова. – М.: Машиностроение, 1982. – 551 с.

23. Кондаков, Н.И. Логический словарь–справочник. [Текст] / Н.И. Кондаков. – М.: Наука, 1975. – 717 с.

24. Теория выбора и принятия решений [Текст] / Н.М. Макаров, Т.М. Виноградская, А.А. Рубчинский и др. – М.: Наука, 1982. – 326 с.

25. Эддоус, М. Методы принятия решений: пер. с англ. [Текст] / М. Эддоус, Р. Стэнсфилд. – М.: Аудит, ЮНИТИ, 1997. – 590 с.

26. Ларичев, О.И. Качественные методы принятия решений. Вербальный анализ решений [Текст] / О.И. Ларичев, Е.М. Мошкович. – М.: Наука, 1996. – 208 с.

27. Кини, Р.Л. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения [Текст] / Р.Л. Кини, Х. Райфа. – М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.

*Поступила в редакцию 24.11.2017.*

*Рецензент: канд. техн. наук, О.Ю. Нечипоренко,  
ГП «Антонов», г. Киев.*