

## СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПО КРИТЕРИЮ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

Г.А. Кулаков<sup>1</sup>, И.И. Усольцева<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ОАО «Авиаагрегат»,  
443009, г. Самара, Заводское шоссе, 55

<sup>2</sup> Самарский государственный технический университет,  
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Проведен анализ системы качества поверхностного слоя применительно к задаче проектирования технологических процессов по критерию долговечности. По шкале уровней качества определен оптимальный алгоритм ее функционирования.*

*Ключевые слова:* качество поверхностного слоя, система, анализ, технологический процесс, закон функционирования, алгоритм

Проблема обеспечения заданных эксплуатационных свойств всегда была актуальной, особенно для авиастроения. Ее актуальность в настоящее время обострилась в связи с усложнением конструкции авиационной техники, условий ее производства и ростом случаев ненадежности в эксплуатации. В настоящее время наблюдается тенденция к резкому увеличению ресурса и срока службы пассажирских и транспортных самолетов (особенно большой грузоподъемности), что объясняется их высокой стоимостью и уникальностью производства.

Анализ отказов нескольких типов транспортных самолетов в течение нескольких лет эксплуатации показывает, что на шасси (с колесами и шинами) приходится до 40% всех отказов, отмеченных при эксплуатации самолета, так как взлет и посадка являются одним из наиболее сложных и потенциально опасных режимов полета. Это объясняется непрерывным ростом конструктивных и эксплуатационных требований при одновременном снижении удельного веса шасси в составе самолета.

При решении проблемы обеспечения эксплуатационных свойств деталей шасси заданные характеристики поверхностного слоя (ПС) формируются на всех стадиях жизненного цикла продукции (ЖЦП):

- конструктор при проектировании назначает материал детали, точность и показатели параметров качества поверхностного слоя (КПС), которые обеспечивают необходимые эксплуатационные свойства исходя из условий их функционирования;
- технолог в соответствии с требованиями чертежа выбирает технологию обеспечения размеров и КПС детали и поддержания этих параметров при ее эксплуатации.

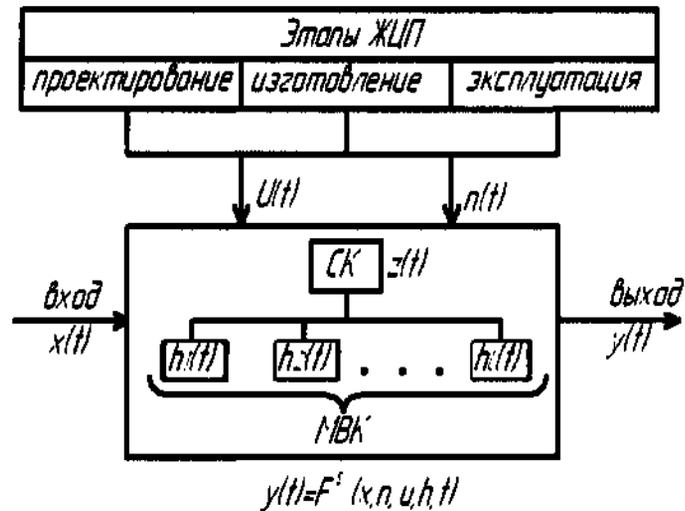
Анализ КПС связан со многими трудностями, одна из которых состоит в многообразии перечня свойств КПС (около 40 наименований), позволяющих оценивать надежность и долговечность деталей. При этом конструктор практически не имеет

*Кулаков Геннадий Алексеевич - генеральный директор ОАО «Авиаагрегат», д.т.н., профессор.*

*Усольцева Ирина Ивановна - доцент кафедры «Автоматизация производств и управление транспортными системами», к.т.н., доцент.*

возможности выявить оптимальное сочетание показателей КПС, поскольку десятки вариантов могут обеспечивать одинаковые эксплуатационные характеристики. Кроме того, необходимо учитывать взаимодействие и взаимовлияние свойств КПС, а также дополнительные критерии оптимизации: точность, себестоимость и т.д.

Идеальной основой решения задачи является использование системного подхода, основанного на структуризации систем и количественном сравнении альтернатив [1]. При этом КПС может быть представлено как сбалансированная система показателей, позволяющая оценить объект с разных сторон, учесть как внутренние (состояние ПС), так и внешние (процессы проектирования, изготовления и эксплуатации) факторы. Такое представление дает целостную картину КПС и позволяет управлять его формированием в соответствии с эксплуатационными свойствами деталей.



Р и с. 1 Качество поверхностного слоя как «черный ящик»

Формально система КПС может быть представлена как «черный ящик» (рис. 1), обладающий рядом свойств и имеющий определенный закон функционирования  $F^{\wedge}$ . Входными сигналами системы  $x(t) \{x, e XJ = \{ \dots, k_x \}$  являются сведения о свойствах материала детали, его термообработке, требования чертежа к точности и параметрам КПС. На выходе системы - совокупность функциональных качеств (ФК) детали (изделия)  $y(t) \{y, e YJ = \{ \dots, k_y \}$ . Управляющие сигналы  $U_m \{U_m, e UJ = \{ \dots, k_u \}$  связаны с направленными конструктивно-технологическими воздействиями на объект в процессе его жизненного цикла. Воздействия внешней среды  $n(t) \{n, e NJ = \{ \dots, k_n \}$  определяются условиями эксплуатации и неучтенными факторами при изготовлении и ремонте объекта. Также система КПС обладает множеством внутренних (собственных) характеристик  $h(t) \{h, e HJ = \{ \dots, k_h \}$ , которые должны отражаться в законе функционирования  $F$ . Таким образом, метод получения выходных характеристик системы описывается оператором вида  $y(t) = F(x, n, u, h, t)$ , который представляет функционирование системы во време-

ни. Зная совокупность элементов системы и взаимосвязи между ними (структуру), можно осуществлять целенаправленное управление КПС детали.

Описание закона функционирования системы наряду с аналитическими и другими способами в ряде случаев может быть получено через процесс последовательной смены состояний системы. Состояние системы - это множество значений характеристик системы  $z(t)$  в данный момент времени  $t$ . В этом случае для описания системы можно использовать уравнение наблюдения (1) и уравнение состояния (2):

$$y(t) = g(z(t), x(t)); \quad (1)$$

$$\dot{z}(t) = f(z(t), x(t)); T \in [t_0, t] \quad (2)$$

здесь  $g$  - функционалы (глобальные уравнения системы), задающие текущие значения выходного сигнала  $y(t)$  и внутреннего состояния  $z(t)$ . Если в описание системы введены функционалы, то она уже не рассматривается как «черный ящик», и математическая модель вида

$$Y(t) = f[g(z(t), x, n, \mu, h, t)]$$

позволяет определить характеристики системы. Однако для многих систем определение глобальных уравнений не представляется возможным.

Главная цель системного анализа - выявление внутреннего состояния системы - системного качества (СК). Оно отражает общие существенные связи и охватывает всю систему в целом. СК определяется исходя из сущности предмета исследования и является причиной проявления внутренних характеристик системы. Для определения СК необходимо выявить структуру системы КПС, под которой понимается строение и закон функционирования системы. В зависимости от выбранного алгоритма функционирования (модели) могут различаться как СК, так и требуемый и реально достигаемый системой результат (ФК). Согласно системному анализу, оценка правильности принятого решения может быть произведена по показателям качества и эффективности процесса функционирования системы.

Целью системы КПС является обеспечение внешних свойств - требуемого функционального качества (ФК), которое определяется исходя из служебного назначения детали, систематизации условий ее функционирования (внешней среды), оценки перспектив развития авиационной техники. Для выявления функционального качества применительно к шасси проведен анализ статистики и физики отказов шасси. Наиболее распространенными в эксплуатации отказами являются усталостные трещины, износ, коррозия, разрушение и другие причины. В связи с этим основными характеристиками ФК применительно к шасси являются такие эксплуатационные показатели, как усталостная долговечность, износостойкость, коррозионная стойкость и герметичность.

Для разработки СК в работе использованы два подхода: феноменологический и физический. В обоих случаях процедура сводится к описанию формальной структуры системы КПС через параметры (характеристики, свойства) состояния, уточнению их числа и выделению среди них определяющих, позволяющих количественно оценивать ФК. Для выбора оптимального решения проведен системный анализ трех алгоритмов.

В первом алгоритме на основе метода проектирования сложных систем реализована процедура разработки обобщенного критерия (СК) с позиции многокритериальной оптимизации [2]. Рассмотрено множество альтернатив (вариантов) построения системы КПС (рис. 2). Каждая альтернатива  $A(I, C)$  характеризуется совокупно-

стью свойств:  $a_1^f, a_2^f, \dots, a_n^f$ ;  $a_1^c, a_2^c, \dots, a_n^c$ . В свою очередь, совокупности альтернатив соответствует вектор

$$q(A) = \{q_1(A), q_2(A), \dots, q_n(A)\}.$$



Р и с. 2. Система качества поверхностного слоя с позиции многокритериальной оптимизации

Задача принятия решения по выбору одной из альтернатив формально сводилась к отысканию оператора  $\langle p \rangle$ , который называется интегральным критерием, или СК. Интегральный критерий присваивал каждому решению по выбору альтернативы соответствующее значение эффективности  $E$ . Это позволило упорядочить множество решений по степени предпочтительности.

В соответствии с теорией полезности было выполнено объединение параметров КПС  $q$ , путем аддитивной свертки компонентов векторного критерия, что позволило представить обобщенный критерий в виде суммы взвешенных нормированных частных критериев:

где  $b_i$  - коэффициент, отражающий ценность (полезность)  $i$ -того параметра, для определения которого используется метод ранжирования.

В итоге получен закон функционирования системы и построен обобщенный критерий КПС (СК) для оценки долговечности:

$$E = 0,29H_M + 0,21cx_{ост} + 0,23(R_a, R_z, S_m) + 0, (\% + 0,07(r, W_a) + 0,06(h, h_a) + 0,05(R_{max}, S, r', W_{max}, S_w) + 0,04H_{max},$$

где  $H_M$  и  $h$  - соответственно величина микротвердости деформированного поверхностного слоя и глубина его распространения;  $a_{ост}$  и  $h_a$  - величина остаточных напряжений на поверхности и глубина их залегания соответственно;  $t_p$  - относительная опорная длина профиля;  $S_m$  и  $S$  - средний шаг неровностей по средней линии и по их выступам соответственно;  $z$  и  $z'$  - средний радиус закругления неровностей соответственно по их выступам и впадинам;  $R_a, R_z, R_{max}$  - высоты неровностей профиля;  $W_a, W_{max}, S_w$  - средняя и максимальная высоты волнистости и ее шаг соответственно;  $H_{max}$  - погрешность формы поверхности.

Установлено, что доминирующая роль в плане влияния на усталостную долговечность принадлежит деформационному упрочнению  $H_u$ , остаточным напряжениям  $\sigma_{\text{ост}}$  среднему шагу  $S_m$  и высотам  $R_a$ ,  $R_z$  неровностей профиля.

Во втором алгоритме использованы возможности дисперсного анализа для построения СК при проектировании технологических процессов (ТП) по критерию долговечности [3]. В качестве МВК здесь рассматривались финишные методы обработки, которые оказывают существенное влияние как на абсолютные значения предела выносливости  $G.I$  и долговечности  $N^*$ , так и на вид и показатель наклона кривой выносливости. Выявлена роль каждой операции в совокупном технологическом процессе, а также установлена связь параметров, характеризующих кривую выносливости с последовательностью операций ТП.

Кривые выносливости строились по результатам усталостных испытаний стандартных образцов, обработанным по различным вариантам технологического процесса, включающим такие методы обработки, как шлифование, тонкое точение, алмазное выглаживание, суперфиниширование, пневмодинамическое упрочнение, хромирование. Для сокращения количества параметров, определяющих характер кривой выносливости, применялся корреляционный анализ. В качестве СК, позволяющего выбрать наилучший маршрут обработки, в данном случае использована обобщенная функция желательности Харрингтона:

$$j = \frac{1}{1 + D^k}$$

где  $j$  - частная функция желательности.

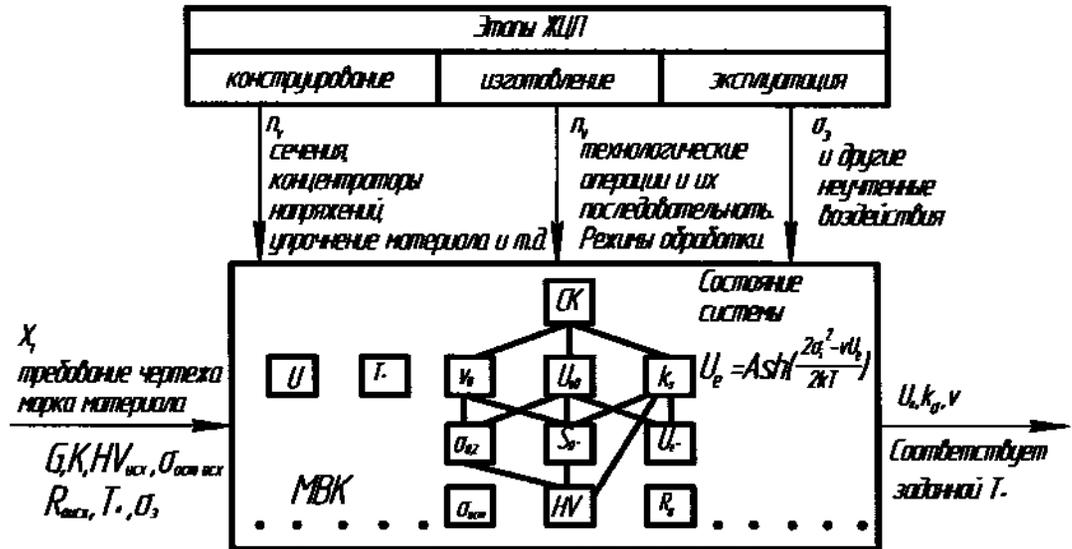
Установлено, что максимальному значению  $D$  соответствует технологический процесс, обеспечивающий наибольшую долговечность.

Для описания поведения КПС в третьем случае использована эргодинамическая теория прочности [4, 5]. Установлен фундаментальный факт: механическое разрушение тела происходит при накоплении в деформируемых объемах металла критической величины плотности внутренней энергии, величина которой не зависит от условий процесса нагружения и является физической константой материала, хорошо совпадающей с их полной теплотой (энтальпией) плавления. Процессы повреждаемости и долговечность (ФК) описываются следующими структурными параметрами: начальной плотностью внутренней энергии  $U_0$ , коэффициентами перенапряжения  $\kappa$  и неравномерности распределения скрытой энергии по объему  $v$ , энергией активации процесса разрушения  $U$  и температурой саморазогрева  $\Gamma^*$  (рис. 3). Как при эксплуатации, так и при технологическом воздействии происходит изменение структурного состояния, в первую очередь, локальных объемов материала детали, расположенных в ее поверхностном слое. Следовательно, эргодинамические параметры являются собственными свойствами системы КПС, отражают ее внутреннее состояние и могут выступать в роли СК. Установлены связи структурных параметров с МВК, а именно характеристиками, получаемыми при механических испытаниях на разрыв, и с твердостью по Виккерсу (микротвердостью), что позволило изучить процесс их формирования при технологическом воздействии.

Сравнение альтернатив системы КПС проводилось по шкале уровней качества (см. таблицу), построенной в зависимости от сложности свойств системы.

Первичным и самым простым качеством системы является ее устойчивость. Наиболее сложным - самоорганизация. Все рассматриваемые алгоритмы систем обладают достаточной структурной устойчивостью, сбалансированностью и стойкостью к внешним воздействиям. При изменении внешних воздействий, например,

свойств материала, конструкции детали или характера нагружения в рамках ФК, у первой системы изменятся только коэффициенты, отражающие полезность параметров, у второй - величины функций желательности технологических операций, в третьей системе - энергия активации процесса разрушения.



Р и с. 3. Система качества поверхностного слоя с позиции эргодинамического подхода

Закон функционирования:

$$t_* = \frac{1}{K_3} \left\{ \ln \frac{[1 - \exp(K_2 U_{e*} - K_1)]}{[1 + \exp(K_2 U_{e*} - K_1)]} - \ln \frac{[1 - \exp(K_2 U_{e0} - K_1)]}{[1 + \exp(K_2 U_{e0} - K_1)]} \right\}.$$

#### Шкала уровней качества и свойства систем

Уровень	4	Самоорганизация	Адаптируемость
	3	Способность	Оперативность
			Результативность
			Ресурсоемкость
	2	Управляемость	Точность
			Наблюдаемость
			Связность
	1	Устойчивость	Стойкость к воздействиям
			Сбалансированность
			Структурная устойчивость

Следующим уровнем шкалы качества системы является управляемость. Она обеспечивается, прежде всего, наличием прямой и обратной связи. Все рассматриваемые алгоритмы представляют детерминированные модели, описывающие системы, внутренние характеристики которых легко наблюдаемы. Используя первые два алгоритма, можно упорядочить решения по степени предпочтительности, в то время как последний алгоритм позволяет рассчитать функциональное качество в единицах измерений долговечности, что свидетельствует о его лучшей управляемости.

Способность определяет возможности системы по достижению желаемого результата на основе имеющихся ресурсов в заданный период времени (это потенциальная эффективность). Для применения первых алгоритмов в условиях изменяющихся внешних воздействий необходимо постоянное проведение экспериментальных исследований, что повышает ресурсоемкость систем. Последний алгоритм позволяет, имея справочные материалы и средства вычислительной техники, рассчитать долговечность (СК) и получить желаемый результат при наименьших затратах.

Самоорганизующаяся система адаптируется к любой ситуации для повышения эффективности функционирования. Имеются свидетельства самоорганизации третьей системы КПС, что подтверждается изменением ее структуры и алгоритма функционирования при сохранении СК для случая, когда характеристикой ФК является износостойкость [6].

В качестве критерия эффективности функционирования систем использован один из показателей исхода операции (ПИО), отражающий степень достижения цели. ПИО определялся сверткой совокупности показателей результативности  $Y_r$ , ресурсоемкое™  $YR$  и оперативности  $YQ$  (третьем уровне шкалы качества):

$$\hat{Y} = 0,327 Y_r + 0,47 YR + 0,21 YQ.$$

Коэффициенты весомости находились экспертным методом.

Результативность операции рассматривалась как степень достижения запланированного уровня ФК - долговечности. Ресурсоемкость и оперативность - соответственно объем ресурсов всех видов (людских, материально-технических и т.д.) и время для подготовки и проведения расчета ФК.

Установлено, что система КПС, построенная на физических представлениях о пластической деформации и разрушении твердого тела, отличается наиболее высокими общесистемными свойствами, уровнем качества и эффективностью функционирования. Она позволяет описать КПС как закономерный процесс смены его состояний на всех этапах ЖЦП. Однако ее применение для решения технических задач широкого класса требует проведения дальнейших исследований.

В общем случае в зависимости от поставленной частной задачи (ФК) система параметров состояния и закон функционирования должны выбираться исходя из раскрытия содержания СК, удобства их измерения, а также удовлетворения другим требованиям (экономическим, метрологическим и т.д.).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Системный анализ в управлении: Учебное пособие / В.С. Анфилов, А.А.Емельянов, А.А. Кукушкин; Под ред. А.А.Емельянова. - М.: Финансы и статистика. 2002. - 368 с.
2. Кулаков Г.А. Формирование качества поверхностного слоя деталей с позиции системного подхода // Оптимизация технологических процессов по критериям прочности: Межвуз. темат. науч. сб. -Уфа, 1989.-С. 33-44.

3. *Бойцов Б.В., Кравченко Б.А., Кулаков Г.А., Тушинская М.Г.* Выбор оптимального технологического цикла с использованием обобщенной функции Харрингтона // ВИНТИ. - М.: 1983. - №2461-83. ДСП. -С.1-8.
4. *Федоров В.В.* Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел. - Ташкент: Фан,1979.-168с.
5. *Федоров В.В.* Кинетика повреждаемости и разрушения твердых тел. - Ташкент: Фан, 1985. - 168с.
6. *Федоров С.В.* Применение метода эргодинамики деформируемых тел для описания совместности трибосистем //Трение и износ. - 1993. - Т. 14. - № 6. - С. 1010-1024.

*Статья поступила в редакцию 27 августа 2009 г.*

**UDC 621.81:004.94**

## **SYSTEM ANALYSIS OF SURFACE LAYER QUALITY AT PRODUCTION METHODS PROJECTING DEPENDING ON THE SERVICE LIFE**

***G.A.Kulakov, L.I. Usoltzeva***

Samara State Technical University,  
244, Molodogvardeyskaya str.. Samara, 443100

*The analysis of surface layer quality system has been carried out relating to the problem of production methods projecting depending on the service life. Optimal algorithm of its functioning has been determined by the quality scale.*

**Key words:** *surface, layer quality, system, analysis, production methods, functioning law, algorithm.*