АВИАЦИОННАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

3

2011

Журнал основан в 1932 году • Москва

Ежеквартальный научно-технический журнал

Орган Департамента авиационной промышленности
Министерства промышленности и торговли РФ
и
Национального института авиационных технологий

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

САМОЛЕТОСТРОЕНИЕ

Амплитов П.А. Использование квалиметрических критериев для оценки легких экранопланов типа А на ранних этапах проектирования 3

Левин А.В., Мусин С.М., Рыбин А.А. Эксплуатация авиационных систем генерирования электроэнергии нового поколения по состоянию 7

ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИИ

Плихунов В.В., Петров Л.М. Структурные изменения поверхностного слоя конструкционных материалов в процессе вакуумной ионно-плазменной обработки 13

Юрьев В.Л., Грибановский В.А., Старочкина С.В., Афанасьева И.А. Исследование процесса электроалмазного шлифования упругих элементов щеточных уплотнений 17

Плихунов В.В. Численно-экспериментальный метод моделирования процессов массопереноса и определения толщины покрытия при вакуумной ионно-плазменной обработке 21

Орлов Б.С., Скрипкин А.А., Ермольчева Н.В. Оценка маслоемкости колец шарикоподшипников, обработанных дискретным вибрационным резанием 25

МАТЕРИАЛЫ И МЕТАЛЛУРГИЯ

Харитонов Г.М., Хитрова О.И., Яковлев Н.О., Ерасов В.С. Закономерности поведения ВЭ деформаций в авиационных стеклах из линейных и поперечносшитых полимеров при знакопеременных нагружениях 28

Мурашов В.В. Определение пористости углепластиков в авиаконструкциях лазерно-акустическим способом ультразвукового контроля 33

КАЧЕСТВО, НАДЕЖНОСТЬ, РЕСУРС

Белов В.К., Тимофеев А.Н. Анализ характеристик коррозионных повреждений, необходимых для оценки остаточной усталостной долговечности авиационных конструкций 37

Петухов А.Н., Павлов Ю.И., Хаинг Мин. Прочность замковых соединений лопаток компрессора при циклическом нагружении 42

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Пекарш А.И., Климов А.В. К вопросу о стратегическом развитии крупного оборонного предприятия в условиях нестационарности внешней среды 45

Прилепский И.В., Миненков А.А. Основы концептуального моделирования комплексной информационной системы управления единичным и мелкосерийным производством авиаагрегатов 50

Торпачев А.В. Структурный подход к автоматизированному проектированию технологических процессов производства аэрокосмической техники 55

* * *

Крымов В.В., Машков В.Н. Проблемы в подготовке специалистов для предприятий машиностроения . . 61

Вниманию читателей!

Журнал "Авиационная промышленность" включен в официальный список ВАК для изданий, публикация в которых учитывается при защите докторских и кандидатских диссертаций.

AVIATION INDUSTRY

3
2011

Magazine was founded in the year 1932 • Moscow

Quarterly scientific and technical magazine

Publication of Department of the Aviation Industry,
the RF Ministry for Industry and Trade,
and
National Institute of Aviation Technologies

CONTENT

AIRCRAFT ENGINEERING

Amplitov P.A. Application of qualimetrical criteria for the estimation of light wig-crafts type a at early design stages 3

Levin A.V., Musin S.M., Rybin A.A. On-condition use of a new-generation aircraft electric power generating systems 7

TECHNOLOGY PROBLEMS

Plikhunov V.V., Petrov L.M. Structural changes in the surface layer of structural materials during vacuum ion-plasma processing 13

Yuriev V.L., Gribanovsky V.A., Starochkina S.V., Afanasieva I.A. Research on the electrodiamond grinding process of the elastic members of brush seals . . . 17

Plikhunov V.V. Numerically experimental analysis of modeling mass transfer processes and determination of the coating thickness under vacuum ion-plasma processing 21

Orlov B.S., Skripkin A.A., Ermol'cheva N.V. Evaluation of the oil absorption of ball races processed by discrete vibratory cutting 25

MATERIALS AND METALLURGY

Haritonov G.M., Hitrova O.I., Yakovlev N.O., Erasov V.S. Mechanism of behaviour of highly elastic deformation in aircraft windows made of linear and cross-linked polymers under alternating loading 28

Murashov V.V. Determination of the cfrp porosity in aircraft structures using laser-acoustic mode of the ultrasonic inspection 33

QUALITY, RELIABILITY, SERVICE LIFE

Belov V.K., Timofeev A.N. Analysis of the corrosive damage characteristics necessary for assessment of the residual fatigue life of aircraft structures 37

Petukhov A.N., Pavlov Yu.I., Khaing Min. The strength of interlocking joints of compressor blades under cyclic loading 42

ECONOMICS AND ORGANIZATION OF PRODUCTION

Pekarsh A.I., Klimov A.V. On strategic development of a large defence enterprise under instability of external environment 45

Prilepskiy I.V., Minenkov A.A. The fundamentals of conceptual modeling of an integrated data system for controlling single-piece and small branch production of aviation components 50

Torpachev A.V. Structural approach to the computer-aided process planning for manufacturing aerospace engineering 55

* * *

Krymov V.V., Mashkov V.N. Problems in training of specialists for mechanical engineering enterprises 61

http://apniat.ru

САМОЛЕТОСТРОЕНИЕ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КВАЛИМЕТРИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЛЕГКИХ ЭКРАНОПЛАНОВ ТИПА А НА РАННИХ ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

П.А.Амплитов (*Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет*)

Предложена методика объективного критериального сравнения экранопланов с другими транспортными средствами и между собой в рамках существующей системы скоростного транспорта.

Ключевые слова: экраноплан, проектирование, оценка, критерий, эффективность.

APPLICATION OF QUALIMETRICAL CRITERIA FOR THE ESTIMATION OF LIGHT WIG-CRAFTS TYPE A AT EARLY DESIGN STAGES. *P.A.Amplitov.*

Methods for objective criterion comparison of WIG-crafts with other transport vehicles and between them in the framework of the existing system of high-speed transport are offered.

Keywords: WIG-craft, designing, estimation, criterion, efficiency.

Квалиметрия – научная дисциплина, в рамках которой изучаются методология и проблематика комплексной, количественной оценки качества объектов любой природы.

При проектировании новых транспортных средств остро стоит проблема оценки их экономических и потребительских свойств. Существует сложившаяся система скоростного транспорта, включающая автотранспорт, суда на подводных крыльях, суда на воздушной подушке, самолеты и вертолеты. Легкие экранопланы типа А по своим эксплуатационным свойствам находятся между скоростными судами и вертолетами. Они традиционно эксплуатируются над водной поверхностью, обладают скоростями, существенно меньшими самолетных, их экономичность ниже.

Наиболее общим критерием эффективности является критерий, предложенный Д.Л.Томашевичем:

$$\eta = P/B,$$

где P – величина, определяющая общественную полезность или целевую отдачу ЛА; B – затраты на изготовление летательного аппарата и поддержание его работоспособности в период эксплуатации. Так как рассматриваемый критерий имеет вид, аналогичный механическому коэффициенту полезного действия, то можно записать

$$\eta = Э/З, \qquad (1)$$

где Э – полезная работа при выполнении операции (эффективность); З – понесенные затраты при выполнении операции. На разных уровнях исследования и этапах проектирования целесообразно использовать различные выражения для определе-

ния полезной работы и понесенных затрат.

Рассмотрим задачу о перевозке груза массой Q из пункта A в пункт $Б$. Общая протяженность маршрута L. Таким образом, минимально достаточная полезная работа по перевозке груза составит $\sim QL$. Учитывая время нахождения груза в транспортной системе t, можно записать выражение для минимальной условной полезной мощности N, развиваемой системой

$$N \sim QL/t = Qv, \qquad (2)$$

где v – скорость перевозки (рейсовая скорость).

Участвующие в перевозке транспортные средства различаются значениями предельной транспортной эффективности (для массы груза Q)

$$t_{\text{тр.эф}} \sim L_{\max} v_{\text{кр}}. \qquad (3)$$

Пусть в перевозке участвует n транспортных средств. Так как величины дальности L и скорости перевозки v i-го транспортного средства могут отличаться от $L_{\max}$ и $v_{\text{кр}}$, можно говорить, что транспортное средство используется в системе с условным коэффициентом полезного действия

$$\eta_i = \left(\frac{Lv}{L_{\max} v_{\text{кр}}} \right)_i < 1.$$

Тогда выражение (2) можно записать в виде

$$N = QL/t \prod_{i=1}^{n} \eta_i. \qquad (4)$$

Введя в формулу (4) массовые коэффициенты q, показывающие различие затрат на эксплуатацию используемых транспортных средств, получим

$$N = QL/t \prod_{i=1}^{n} q_i \eta_i.$$

Эту формулу можно использовать для сравнения вариантов доставки грузов.

Анализ выражений (2) и (3) дает возможность заключить, что с улучшением потребительских свойств транспортной системы эффективность возрастает и ограничивается только достигнутым техническим уровнем.

Рассмотрим идеальную транспортную систему со следующими характеристиками: груз перевозит единственное транспортное средство, дальность и скорость перевозки оптимальны для используемого транспортного средства, в системе нет простоев. Тогда можно записать обобщенное выражение эффективности:

$$Э = Nt_{\text{тр.эф}} = QLv^2. \qquad (5)$$

В полученном выражении нет значительного числа параметров, таких как масса пустого снаряженного транспортного средства, масса топлива и других, в том числе определяющих потребительские свойства. Однако эти параметры показывают достигнутый технический уровень, и их необходимо учитывать в качестве ограничений для существующих транспортных средств либо как неизвестные – для перспективных. Вводя подобные ограничения, можно получить частные выражения эффективности.

Простота обобщенного выражения эффективности позволяет использовать его на ранних этапах проектирования и при сравнении вариантов между собой, а также для предварительного сравнения с существующими транспортными средствами. Предложенное учеными П.Г.Кузнецовым и Р.Н.Образцовой выражение (5) отображает величину расхода мощности системы услуг за все время пребывания груза в системе от момента сдачи до момента получения перевезенного груза. В качестве обозначения единицы изменения предложено название «тран» [1].

Понесенные затраты можно представить в виде [2]

$$З = \frac{G_{te}}{n} + \left(\bar{G}_t\right)_1,$$

где G_{te} – количество топлива, эквивалентное энергозатратам транспортного средства в течение жизненного цикла, кг; n – число рейсов за жизненный цикл; $\left(\bar{G}_t\right)_1$ – расход топлива на рейс, кг.

Количество эквивалентного топлива складывается из топливного эквивалента затрат на разработку, изготовление и испытание опытных образцов; на создание (модернизацию) инфраструктуры; на прямые и косвенные расходы; на утилизацию.

Для упрощения не будем учитывать G_{te}/n. Тогда

$$З = \left(\bar{G}_t\right)_1. \qquad (6)$$

Подставляя выражения (5) и (6) в выражение (1), получим критерий эффективности

$$\eta = \frac{QLv^2}{\left(\bar{G}_t\right)_1}. \qquad (7)$$

Введем понятие коэффициента добротности конструкции φ, используя выражение [1]:

$$\varphi = k_1 k_2 k_3, \qquad (8)$$

где k_1, k_2, k_3 – соответственно коэффициенты коммерческой отдачи массы машины; транспортных достоинств машины, который в неявном виде отражает плотность компоновки машины и запас топлива с учетом способности к преодолению перегрузок трассы; запаса динамических свойств машины на режиме максимальной скорости относительно рейсовой скорости;

$$k_1 = Q_{max}/G,$$

где Q_{max} – грузоподъемность; G – полная масса (на старте);

$$k_2 = L_{max}\sqrt{H/V},$$

где L_{max} – автономность хода по запасу топлива; H – допустимая «перегрузка» (крутизна преодолеваемых подъемов, балльность моря, высота полета); V – габаритный объем;

$$k_3 = (v_{max}/v)^2,$$

где v_{max} – максимальная скорость движения машины.

В выражение (8) можно вводить дополнительные безразмерные коэффициенты для оценки параметров, важных для исследователя.

Используя формулы (5) и (8), запишем выражение для определения технического качества транспортного средства:

$$K = Эφ. \qquad (9)$$

Подставим в выражение (1) вместо Э значение K и получим выражение для определения технического уровня транспортного средства:

$$\eta = \frac{K}{\left(\bar{G}_t\right)_1}. \qquad (10)$$

Полученные по формулам (7), (8), (10) показатели можно рассматривать как квалиметрические числа для различных видов транспорта.

Рассмотрим влияние некоторых параметров экраноплана на коэффициент добротности конструкции, для этого запишем выражение (5) в виде

$$\varphi = \bar{m}_{кн} L_{max}\sqrt{H_{пол}/V}\left(v_{max}/v_{кр}\right)^2, \qquad (11)$$

где $\bar{m}_{кн}$ – относительная масса коммерческой нагрузки; $H_{пол}$ – высота полета; $v_{кр}$ – крейсерская скорость экраноплана.

Запишем выражения параметров, входящих в формулу (11), и преобразуем их, исключая операции сложения/вычитания. Все постоянные и принятые постоянными величины представим в виде коэффициентов. Также для удобства анализа упростим ряд формул. Будем считать, что при изменении параметров изменяется весовой баланс, но взлетная масса не меняется.

Для определения дальности полета воспользуемся формулой Бреге для летательных аппаратов с поршневыми или турбовинтовыми двигателями:

$$L_{max} = 270\frac{\eta}{c_{e\,кр}}K_{кр}\ln\frac{1}{1-\bar{m}_т} = k_1 K_{кр}\ln\frac{1}{1-\bar{m}_т},$$

где $K_{кр} = f(\lambda) = \frac{c_y}{c_x} \approx \frac{1}{Ac_y}$; $A = \frac{1+\delta}{\pi\lambda_{эф}} \approx \frac{1{,}275}{\pi\lambda}$;

$$c_y = \frac{16p_0}{v_{кр}^2}.$$

Таким образом,

$$L_{\max} = k_2 \frac{\lambda v_{\text{кр}}^2}{p_0} \ln \frac{1}{1-\bar{m}_{\text{т}}}. \qquad (12)$$

Запишем выражение для высоты полета:

$$H_{\text{пол}} = \bar{h} b_a,$$

где $b_a = l/\lambda = \sqrt{m_0 \lambda / p_0} / \lambda = k_3 / \sqrt{\lambda p_0}$.

Тогда

$$H_{\text{пол}} = k_3 \bar{h} / \sqrt{\lambda p_0}. \qquad (13)$$

Габаритный объем определим исходя из следующих допущений: габаритная ширина равна размаху крыла; габаритная длина – величина постоянная, равная длине фюзеляжа $l_{\text{ф}}$; габаритная высота пропорциональна размаху вертикального оперения:

$$V = k_3 \sqrt{\lambda / p_0}\ l_{\text{ф}}\ k_4\ l_{\text{во}},$$

где $l_{\text{во}} = \sqrt{S_{\text{во}}\ \lambda_{\text{во}}}$;

$$A_{\text{во}} = \frac{S_{\text{во}} L_{\text{во}}}{S b_a} = k_5 \frac{l_{\text{во}}^2 \lambda^2}{l^3},$$

где $l_{\text{во}} = k_6 / \sqrt[4]{\lambda p_0^3}$.

Тогда

$$V = k_7 \sqrt[4]{\lambda / p_0^5}. \qquad (14)$$

С учетом формул (12) – (14) формулу (11) можно представить в виде

$$\varphi = k \bar{m}_{\text{кн}} \ln \frac{1}{1-\bar{m}_{\text{т}}} \sqrt{\bar{h}} \sqrt[8]{\lambda^3 / p_0^7}\ v_{\max}^2.$$

Коэффициент добротности конструкции должен быть как можно больше, поэтому запишем выражения для максимизации:

$$\bar{m}_{\text{кн}} \ln \frac{1}{1-\bar{m}_{\text{т}}} \sqrt{\bar{h}} \sqrt[8]{\lambda^3 / p_0^7}\ v_{\max}^2 \to \max, \qquad (15)$$

$$\bar{m}_{\text{кн}} \ln \frac{1}{1-\bar{m}_{\text{т}}} \sqrt{\bar{h}} \sqrt[8]{\lambda / p_0^9}\ v_{\max}^2 \to \max. \qquad (16)$$

Выражение (15) получено в предположении равенства крейсерского аэродинамического качества экраноплана и самолета аналогичной размерности. Если учитывать повышение качества за счет снижения индуктивного сопротивления, выражение примет вид:

$$\bar{m}_{\text{кн}} \ln \frac{1}{1-\bar{m}_{\text{т}}} \bar{h}^{-0,147} \lambda p_0^{-7/8} v_{\max}^2 \to \max, \qquad (17)$$

$$\bar{m}_{\text{кн}} \ln \frac{1}{1-\bar{m}_{\text{т}}} \lambda^{1,1} p_0^{-0,8} v_{\max}^2 \to \max. \qquad (18)$$

Выражения (16) и (18) получены в предположении постоянства абсолютной высоты полета.

Анализ выражения (17) показывает, что необходимо уменьшать удельную нагрузку на крыло и относительную высоту полета, остальные показатели необходимо увеличивать. Это особенно касается относительных масс коммерческой нагрузки и топлива. Их увеличение возможно только при снижении доли веса конструкции в весовом балансе с учетом того, что относительная масса конструкции планера экранопланов значительно выше аналогичного показателя у самолетов (даже у гидросамолетов).

Таким образом, основываясь на модели идеальной транспортной системы, было рассмотрено влияние некоторых параметров экраноплана на его характеристики как элемента такой системы. Особенность модели заключается в использовании при анализе, наряду с прямыми эксплуатационными расходами (расход топлива) и транспортной эффективностью, ряда качеств, определяемых типом транспортного средства и индивидуальных особенностей каждого конкретного аппарата. Именно это позволяет корректно сравнивать транспортные средства между собой. При рассмотрении экраноплана в качестве альтернативы самолету (сравнивая с помощью выражений (15) и (17)) в рамках модели, можно сделать вывод о невозможности замены самолета, ввиду меньшего (на 1...3 порядка) значения коэффициента добротности конструкции экраноплана. В первую очередь, это связано с меньшими, по соображениям безопасности, максимальными скоростями полета экраноплана.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бурдаков В.Д., Смирнов Г.В.** Альтернатива тонно-километрам // Новое в жизни, науке, технике. Сер. Транспорт. 1990. № 4.

2. **Панатов Г.С., Фортинов Л.Г., Терешко В.О.** Оценка энергетической эффективности систем авиационных транспортных машин с помощью интегрального критерия Бартини Baf // Авиационная промышленность. 2000. № 2. С. 61–64.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ПО СОСТОЯНИЮ

А.В.Левин**, докт. техн. наук, **С.М.Мусин**, докт. техн. наук, **А.А.Рыбин
(*ОАО “Агрегатное конструкторское бюро «Якорь»”*)

Предложены принципы построения информационно-диагностических комплексов и средств автоматизированного эксплуатационного контроля централизованных и децентрализованных систем электроснабжения воздушных судов и рассмотрены правила их применения.

Ключевые слова: системы электроснабжения, системы генерирования электроэнергии, диагностика, эксплуатационный контроль, средства контроля.

ON-CONDITION USE OF A NEW-GENERATION AIRCRAFT ELECTRIC POWER GENERATING SYSTEMS. *A.V.Levin, Dr.Techn.Sc, S.M.Musin, Dr.Techn.Sc, A.V.Rybin.*

Principles of constructing information-diagnostic complexes and means for the automated operational control of the centralized and decentralized systems of the aircraft electrical power systems are suggested, rules for their application are considered.

Keywords: electrical power systems, power generating systems, diagnostics, operational control, control tools.

В соответствии с основными направлениями «Концепции развития авиации Российской Федерации» значительно повышаются требования к авиационным комплексам и воздушным судам гражданской авиации. Поэтому необходимо создать авиационные системы электроснабжения и электропитания, эксплуатируемые по состоянию и отвечающие современным требованиям науки и производства.

В настоящее время создана нормативная база в виде стандартов и положений, обеспечивающая эксплуатацию авиационной техники по состоянию: ОСТ 1 027776–2001 «Эксплуатация техническая авиационной техники по состоянию», ОСТ 1 02786–2008 «Типовые условия поставки и послепродажного обеспечения эксплуатации авиационной техники гражданского назначения. Общие требования», «Положение об установлении и увеличении ресурсов и сроков службы газотурбинных двигателей военной авиации, их агрегатов и комплектующих» и др.

Информационно-диагностические комплексы и средства автоматизированного контроля авиационного бортового оборудования имеют трехуровневую встроенную систему контроля:

I. Информация, предназначенная для летного и технического персонала, осуществляющего эксплуатацию бортового оборудо-

http://apniat.ru

вания: индикация функционирующего и работоспособного состояния системы, индикация отключения, индикация перехода на резервные каналы, выдача информации на бортовые регистраторы полетных данных и т.п.

II. Регистрация информации, предназначенной для персонала, осуществляющего техническое обслуживание, поиск неисправностей, подлежащих идентификации, и устранение неисправностей. На данном уровне встроенная система контроля (ВСК) имеет внутреннею независимую память и систему тестов, используемую обслуживающим персоналом для поиска неисправностей, или использует наземную контрольно-проверочную аппаратуру, с помощью которой осуществляется поиск неисправностей, а аналогичная система встроенного контроля отсутствует. Система контроля второго уровня должна соответствовать принципу минимальной достаточности, в противном случае будем иметь неработоспособное устройство из-за постоянных сбоев ВСК или ее отказов вследствие сложности контроля объективно неизученного процесса функционирования изделия во взаимосвязи.

III. Регистрация информации, предназначенной для специалистов, осуществляющих послепродажное обслуживание воздушных судов, поиск неидентифицированных эксплуатантом неисправностей, мониторинг ненормируемых параметров и т.п. Встроенная система контроля имеет внутреннюю защищенную независимую память. Регистрируются информационные, технологические, исследовательские и т.п. параметры, в совокупности определяющие техническое состояние оборудования.

Регистрируемая информация второго уровня не доступна персоналу, осуществляющему непосредственную эксплуатацию в аэропортах, а информация третьего уровня не доступна как персоналу, осуществляющему эксплуатацию, так и персоналу, осуществляющему техническое обслуживание.

Эксплуатация по состоянию при контроле уровня надежности имеет ряд аспектов, связанных с методами оценки достигнутого уровня безотказности в эксплуатации по сравнению с расчетным по определенным признакам.

Признаки представляют собой конкретное свойство объекта. Эти свойства выражаются как числовыми, так и нечисловыми значениями. Используя понятия объекта и признака, условимся называть матрицей «Объект-свойство» или «Объект-признак» прямоугольную таблицу, состоящую из признаков, описывающих свойства исследуемой выборки результатов эксплуатации (проектирования, моделирования, модернизации и т.п.).

Введем понятие «расстояние между объектами», отражающее меру сходства, близости объектов между собой по всей совокупности используемых признаков. Примем за расстояние между объектами в пространстве признаков такую величину d_{ij}, которая удовлетворяет следующим аксиомам: $d_{ij} \geq 0$ (неотрицательность расстояния); $d_{ij} = d_{ji}$ (симметрия); $d_{ij} + d_{jk} \geq d_{ik}$ (неравенство треугольника).

Если $d_{ij} \neq 0$, то $i \neq j$ (различимость нетождественных объектов).

Если $d_{ij} = 0$, то $i = j$ (неразличимость тождественных объектов).

Рассмотрим расстояние Махаланобиса [1], которое имеет достаточно специфические свойства. Выражение для данной метрики имеет вид

$$d_{ij} = (X_i - X_j)^T S^{-1} (X_i - X_j), \qquad (1)$$

где X_i и X_j – вектор-столбцы значений переменных для i-го и j-го объектов; T – символ в выражении $(X_i - X_j)^T$ обозначает операцию транспонирования вектора; S – общая внутригрупповая дисперсионно-ковариационная матрица.

В литературе широко представлены интегральные оценки качества изделия, пред-

ставляющие собой отклонение текущего значения параметра цели от среднего значения параметра стандартной цели вычисленной по евклидовой метрике (евклидова расстояния или его квадрат). Основной недостаток – постулирование независимости текущих и стандартных оценок параметров цели. Это приводит к необходимости дополнительного взвешивания оценки экспертом (лицом, принимающим решение), когда оценивается уровень надежности или вводится упреждающий эмпирический допуск на основе экспертного задания уровня значимости и закона распределения параметра контроля работоспособности. Взвешивание оценок – субъективный фактор, а в настоящее время из-за ограниченности информации о состоянии безотказности воздушных судов в «малых» авиакомпаниях является определяющим фактором. В результате имеем либо довольно оптимистические оценки уровня надежности, либо крайне пессимистические, что в значительной степени препятствует переходу на эксплуатацию по состоянию. При применении в ВСК метрики «расстояние Махаланобиса» значительно повышается достоверность оценки работоспособности авиационного оборудования.

Системы электропитания нового поколения разработки и выпуска ОАО «АКБ «Якорь» обладают характеристиками, обеспечивающими их эксплуатацию по состоянию как до безопасного отказа, так и по уровню надежности. Система встроенного контроля – двухуровневая.

Рассмотрим распознавание образов на основе метрики Махаланобиса при мониторинге авиационной системы генерирования СГ-ПСПЧ-Д1 (СГ). Система состоит из генератора, преобразователя, блока коммутации и токовых датчиков. Преобразователь имеет в своем составе функциональные блоки и модули, два микропроцессора и плату ВСК. Конструкция систем генерирования и электропитания позволяет осуществлять их эксплуатацию по состоянию до безопасного отказа. Системы включают не менее двух каналов (один из них резервный); встроенную систему контроля и защиты с выдачей сигналов в централизованную бортовую систему контроля и/или на отдельные индикаторы и сигнализаторы. Корпус изделий в случаях разрушения, задымления, локального возгорания внутренних элементов имеет исполнение, позволяющее локализовать отказ внутри корпуса.

Перечень информации, выдаваемой ВСК, обеспечивает поиск неисправности до конструктивно-сменного блока (генератор, преобразователь, блок коммутации, датчика тока дифференциальной защиты) и силовых линий связи: между генератором и преобразователем данной системы, между преобразователем и ЦРУ, а также дублирующей линии питания преобразователя от генератора другого борта.

Сигналы принятия решения формируются следующим образом: на вход решающего устройства поступают сигналы от датчиков тока дифференциальной защиты фидеров, сигналы о напряжении фаз, состоянии функциональных блоков и модулей, состоянии генератора и блока коммутации. Решающее устройство состоит из четырех вычислителей, каждый из которых принимает сигналы от датчика состояния по трем каналам (рис. 1). При отказе одного из датчиков оценивать состояние объекта может только вычислитель, не получающий этого сигнала.

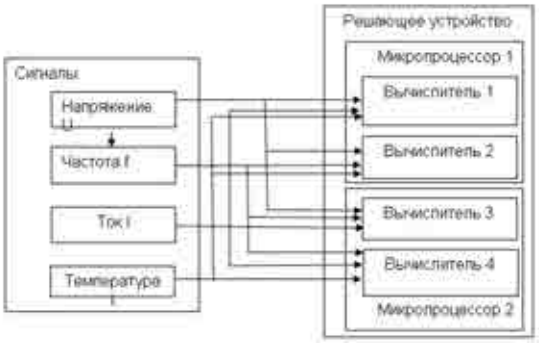


Рис. 1. Схема решающего устройства

Такое построение схемы решающего устройства позволяет определять и идентифицировать отказавший датчик. Каждый вычислитель, используя значение ошибки, вычисляет разницу $r_i = \sqrt{\frac{e_{i1}^2 + e_{i2}^2 + e_{i3}^2}{3}}$, где r_i – разница вычислителя i ($i = 1, \ldots, 4$); e_{ij} – j-я нормализованная оценка ошибки вычислителя i ($i = 1, \ldots, 4$; $j = 1, \ldots, 3$).

При нормальном функционировании датчика состояния СГ разница мала, но, когда отказывает один из датчиков состояния, сложение трех разностей дает ошибку выхода датчика большой. Поэтому одна разность не принимается в рассмотрение, а при наличии четырех разностей проводим идентификацию.

Процесс диагностики отказов. Очевидно, что при отказах датчика состояний существует корреляция в отклонении последовательно вычисленных разностей, поэтому их статистические характеристики не известны. В связи с этим применимы методы системы Махаланобиса–Тагучи (МТС). Первоначально сформируем пространство Махаланобиса, полученное при нормальном режиме функционирования СГ и представляющее собой выборку разностей при этих условиях. Затем оценим возможность попадания новой выборки в нормальные или ненормальные условия путем оценки расстояний Махалонобиса. Процесс диагностики представлен на рис. 2.

Рис. 2. Процесс диагностирования отказов

Выбор нормальных (*исходных*) *данных*. Подготовка данных, соответствующих нормальному режиму функционирования СГ, проводится при имитационном полунатурном или натурном моделировании, стендовых испытаниях; при этом проводим набор статистики. За норму принимаем нахождение ошибки в 3-сигмовом интервале (табл. 1). Примем допущение, что внутри уровня диагностические параметры остаются постоянными.

Таблица 1

Уровни принятия решения

Уровень	Ошибка поддержания величины напряжения			Уровень регулирования напряжения, В
I	–σ	–2σ	–3σ	114
II	0	0	0	116
III	+σ	+2σ	+3σ	118

Для идентификации отказов проводим оценку ошибок, используя три различных метода. Во всех методах для повышения представительности статистики используем группы, каждая из которых включает по 10 точек с интервалом 0,001 с. Каждая группа данных оценивается ее средним значением, что позволяет практически оценить шум датчика e_{ij}^k, где k – номер группы статистики измерений; i – номер вычислителя; j – номер ошибки i-го вычислителя.

Метод А. Рассматриваются средние значения по оценкам первой и второй групп измерений $e_{ij}^{(1)} = \frac{1}{10}\sum_{l=1}^{10} e_{il}$ и $e_{ij}^{(2)} = \frac{1}{10}\sum_{l=11}^{20} e_{il}$.

Метод В. Рассматривается среднее значение по оценке первой группы измерений $e_{ij}^{(1)} = \frac{1}{10}\sum_{l=1}^{10} e_{il}$.

http://apniat.ru

Метод С. Рассматриваются средние значения по оценкам первой и третьей групп измерений $e_{ij}^{(1)} = \frac{1}{10}\sum_{l=1}^{10} e_{il}$ и $e_{ij}^{(3)} = \frac{1}{10}\sum_{l=21}^{30} e_{il}$.

Отказы датчика состояний и агрегатов СГ объективно идентифицируются по оценкам ошибок.

Далее оценим функциональность трех стандартных множеств, полученных с помощью методов А…С. Основное внимание уделим только датчику тока. Интервалы 1, 2, 3-го вычислений достаточно велики и изменяются пропорционально увеличению значения отказа, определяющим фактором принимаем разницу между значением отказа датчика тока и его нормальным значением. Наряду с этим, разброс значений у третьего вычислителя при появлении отказа датчика тока должен оставаться малым (чем меньше, тем лучше). Результаты сравнения отношения «сигнал/шум» по методам А…С с общим значением для всех трех вычислителей приведены в табл. 2.

Таблица 2

Отношение «сигнал/шум» по методам А...С

Метод	Отношение «сигнал/шум», дБ, для вычислителя				
	1	2	3	4	суммарное
А	45,7	33,1	2,9	38,6	120,3
В	26,8	26,3	3,9	27,5	84,5
С	46,4	29,3	2,8	34,2	112,7

Видим, что наилучшим методом идентификации отказов в ГС является метод А.

При определении отказов с помощью оценки ошибок по методу А используется стандартное множество, состоящее из 24 опытов (4×3×2×1) для четырех вычислителей. Для оптимизации возможности распознавания исключаем сильно коррелированные члены методом разбиения на единичные значения. Такое разбиение может быть выполнено на любой матрице [2].

Одними из основных статистических методов оценки качества функционирования СГ при ее эксплуатации по состоянию как многомерной системы с различными характеристиками является расстояние Махаланобиса. Систему Махаланобиса к оценке качества функционирования применяем в три этапа.

Этап 1. Построение пространств Махаланобиса:

определение состава характеристик системы генерирования;

идентификация совокупности параметров системы генерирования, соответствующих нормальному, частичному, аварийному и ненормальному режимам работы системы и аксиомам применимости расстояний Махаланобиса;

сбор данных о возможных состояниях системы генерирования, включая возникновение отказов ее элементов и влияния отказов функционального оборудования;

оценка расстояний Махаланобиса с использованием матрицы отрицательных корреляций;

определение порога допустимого ухудшения качества электроснабжения.

Этап 2. Диагностика системы генерирования воздушного судна:

получение на основании результатов моделирования или эксперимента текущего набора данных и сопоставление его с параметрами СГ, соответствующими допустимому состоянию системы;

оценка расстояний Махаланобиса для текущего набора данных. Если оценка расстояния выше порога, то этот набор данных классифицируется как недопустимый, в противном случае – система признается пригодной.

Этап 3. Улучшение качества системы генерирования:

http://apniat.ru

оценка отношения фактического значения показателя к требуемому для эксплуатируемой системы генерирования;

уточнение характеристик эксплуатируемой системы генерирования в целях улучшения ее качества за счет изменения отношения фактического значения показателя к требуемому.

Процесс перехода на эксплуатацию по состоянию воздушных судов имеет ряд ограничений по его реализации и требует значительного объема исследовательских работ по анализу влияния потери безопасности изделия (системы) на безопасность полета, по достаточности числа бортовых средств индикации работоспособности, анализу примененных методов обеспечения локализации отказов изделий и систем из-за нераспространения последствий типа разрушение, дымление и др., организации системы контроля уровня надежности изделий и систем и т.д.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Варжапетян А.Г., Анохин В.В. и др.** Системы управления. Инжиниринг качества. М.: Вузовская книга, 2001. 320 с.

2. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1984. 832 с.

ТРЕБОВАНИЯ К АВТОРАМ СТАТЕЙ, НАПРАВЛЯЕМЫХ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ

Необходимо выслать в адрес редакции:

– статью в виде файла формата MS Word (*.doc). Текст статьи должен быть набран 14 шрифтом через 1,5 интервала между строками. Формульные выражения выполняются только в «Редакторе формул» (MathType или Equation Editor). Иллюстрации выполняют в графических редакторах в виде файлов (*.tif, *.jpg) и в черно-белом варианте;

– акт экспертизы, подтверждающий возможность публикации в открытой печати;

– аннотацию и ключевые слова на русском и английском языках;

– сведения об авторах (фамилия, имя, отчество полностью, год рождения, ученая степень, место работы, контактный телефон).

Публикация в журнале бесплатная.

Телефон редакции: (499) 317-86-66.
E-mail: ap.red@yandex.ru

СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ ВАКУУМНОЙ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ*

***В.В.Плихунов**, канд. техн. наук, **Л.М.Петров**, докт. техн. наук*
(*ОАО "Национальный институт авиационных технологий"*)

Исследовано влияние воздействия потоков газовой и металлической плазмы на нанорельеф и наноструктуру титанового сплава ВТ6 и стали 30ХГСА. Оценка рельефа исходной поверхности на наноуровне и его изменений при ВИП обработке позволяет обосновать изменение поверхностной наноструктуры и нанорельефа конструкционных материалов в зависимости от энергетических параметров ВИП обработки.

Ключевые слова: структурные изменения, наноструктура, нанорельеф, энергетические параметры.

STRUCTURAL CHANGES IN THE SURFACE LAYER OF STRUCTURAL MATERIALS DURING VACUUM ION-PLASMA PROCESSING. *V.V.Plikhunov, Cand.Techn.Sc, L.M.Petrov, Dr.Techn.Sc.*

The influence of gas and metal plasma streams effect on the nanorelief and nanostructure of BT6 titanium alloy and 30ХГСА steel has been investigated. Estimation of the initial surface relief at the nanolevel and its changes during vacuum ion-plasma processing makes it possible to justify the change in the surface nanostructure and nanorelieif of structural materials subject to energy parameters of vacuum ion-plasma processing.

Keywords: structural changes, nanostructure, nanorelief, energy parameters.

ВИП обработка обеспечивает повышение работоспособности поверхностного слоя деталей из конструкционных материалов за счет процессов модифицирования поверхности и нанесения покрытий, способствующих формированию поверхностной структуры и свойств различного функционального назначения. Наиболее важными задачами при обеспечении качества формируемых свойств в этих процессах являются оценка эффективности технологических воздействий этих процессов, а также воспроизводимость поверхностных структур. При ВИП обработке изменения поверхностной структуры и свойств конструкционных материалов происходят при воздействии высокоэнергетических потоков газовой и металлической плазмы. Результаты таких воздействий зависят от множества трудно контролируемых параметров: химического и фазового состава, структурного состояния материала подложки, а также энергетических характеристик потоков газовой и металлической плазмы.

Обеспечение качества и воспроизводимости формируемых структур и свойств

* Исследования выполнены при финансовой поддержке аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2011 гг.)», проект 2.1.2/11644.

особенно актуально для процессов модифицирования поверхности и нанесения покрытий, когда под воздействием потоков газовой и металлической плазмы происходят плазмохимические поверхностные реакции с образованием оксидных, нитридных или карбидных соединений. При формировании этих соединений необходимо четкое соблюдение соотношений компонентов этих реакций на протяжении всего процесса их создания. Технология проведения этих процессов многоэтапная, состоит из основных и вспомогательных технологических процедур и включает как этапы подготовки обрабатываемой поверхности (очистка и активация), так и этапы конденсации и диффузионного насыщения. В этих процессах под воздействием потоков газовой и металлической плазмы происходят первичные структурные изменения исходного поверхностного слоя конструкционных материалов, сопровождающиеся формированием на наноуровне новой структуры поверхности и рельефа.

Переход от структур изолированных кластеров и наночастиц к массивным кристаллическим структурам в процессах нанесения покрытий и модифицирования поверхности при ВИП обработке требует применения методов исследования с широким структурным диапазоном от 10 нм и выше. Значительные структурные изменения в процессах ВИП обработки происходят на основных этапах (очистка, активация, конденсация) технологических процессов нанесения покрытий и создания модифицированных слоев. На этих этапах под воздействием потоков газовой и металлической плазмы осуществляется ионное травление исходной поверхности с последующим созданием как буферных пограничных слоев, так и основных функциональных. Вследствие этого в создаваемом композите металл–покрытие происходит плавный переход получаемых структур от наноуровня к макроуровню. Проведенные исследования показали, что наиболее информативным методом оценки проведения технологических этапов очистки и активации поверхности является метод контактной разности потенциалов, позволяющий по изменению величины приведенного поверхностного потенциала судить об эффективности воздействия потоков газовой и металлической плазмы на обрабатываемую поверхность [1, 2]. Однако этим методом невозможно получить информацию об изменении рельефа исходной поверхности на технологическом этапе очистки и активации.

Результатом воздействия потоков газовой и металлической плазмы на поверхность являются структурные изменения как поверхностного слоя обрабатываемого металла, так и его рельефа. Ускоренный поток газовой плазмы, воздействуя на исходную поверхность, удаляет оксидные и адсорбированные слои, а также осуществляет ионное травление обрабатываемой поверхности [3]. При этом степень структурных поверхностных изменений зависит от энергии ионных потоков, времени их воздействия, а формируемый рельеф поверхности может изменяться в широком нанометрическом диапазоне.

Исходный рельеф обрабатываемой поверхности формируется в процессе инструментального технологического воздействия при изготовлении деталей, и контроль его, как правило, осуществляется с помощью профилометра на базе 10 мм с закруглением индентора радиусом от 1 до 5 мкм, поэтому оценить поверхностную структуру рельефа, находящуюся на наноуровне, невозможно.

В настоящее время для исследования поверхностных наноструктур применяются различные модели сканирующих туннельных микроскопов (СТМ) [4]. Однако использование этих СТМ для оценки эффективности технологических воздействий, применяемых при поверхностной обработке, затруднено, так как нельзя обеспечить

повторяемости сканирования одного и того же фрагмента исследуемой поверхности после разных технологических воздействий. А для объективной оценки необходимо многократное сканирование исследуемой поверхности сканом размером 5×5 мкм с повторным отклонением от первичного скана ± 1 мкм. Исследования с помощью СТМ показали, что предварительное воздействие потока газовой плазмы приводит к созданию наноструктурного рельефа поверхности и формированию покрытий с высокой адгезионной прочностью.

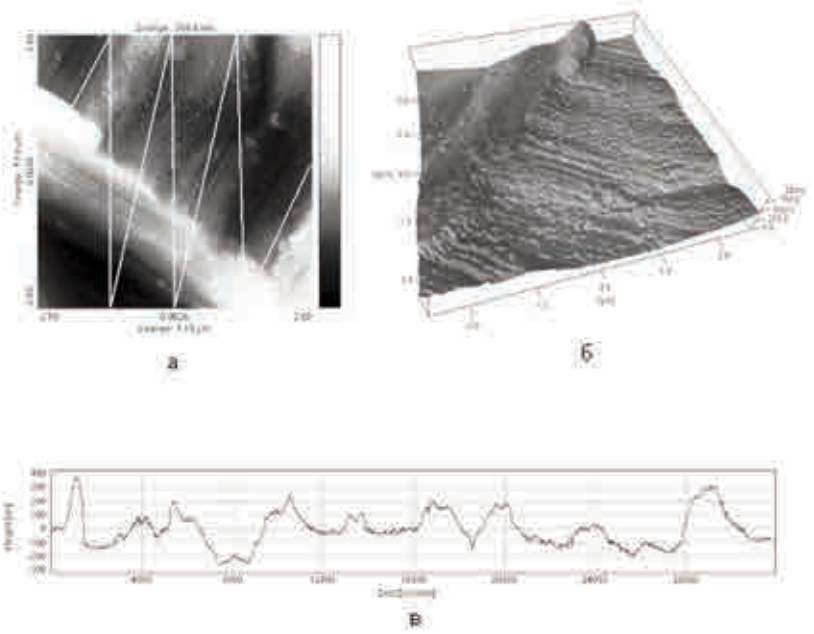


Рис. 1. Скан 5×5 мкм (*а*), наноструктура (*б*), нанорельеф (*в*) фрагмента полированной поверхности образца сплава ВТ6

Применение СТМ позволяет оценить изменение наноструктуры и нанорельефа после технологических воздействий плазменных потоков на исследуемую поверхность.

Ионное травление газовой плазмой Ar данной поверхности в течение 10 мин улучшает четкость наноструктуры. По изменению нанорельефа определили, что воздействие плазмы позволяет осуществить регулированное травление оксидного слоя на 10 нм.

Исследования образца сплава ВТ6 с полированной поверхностью показали, что исходное значение шероховатости, полученное с помощью профилометра, составляет $Ra = 0{,}02$ мкм, а после исследования на СТМ – $Ra = = 0{,}097$ мкм, при этом было зафиксировано максимальное значение шероховатости до 0,3 мкм (рис. 1,*в*). Наноструктура исследованного образца представляет собой развитую выпуклую поверхность с отдельными возвышенностями (рис. 1,*б*). Такие различия в значениях шероховатости исходной поверхности, измеренные на микро- и наноуровнях, свидетельствуют о необходимости дополнительной оценки значений шероховатости поверхности с помощью СТМ на наноуровне, так как влияние плазменных потоков на поверхность осуществляется на наноуровне при контакте подложки с атомами и ионами плазмы.

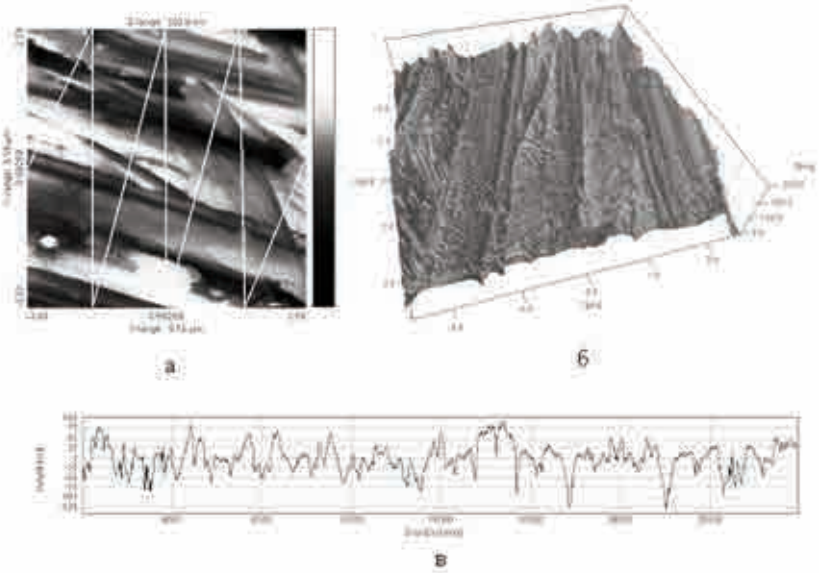


Рис. 2. Скан 5×5 мкм (*а*), наноструктура (*б*), нанорельеф (*в*) фрагмента поверхности образца сплава ВТ6 после ионного травления и нанесения Ti (2 с)

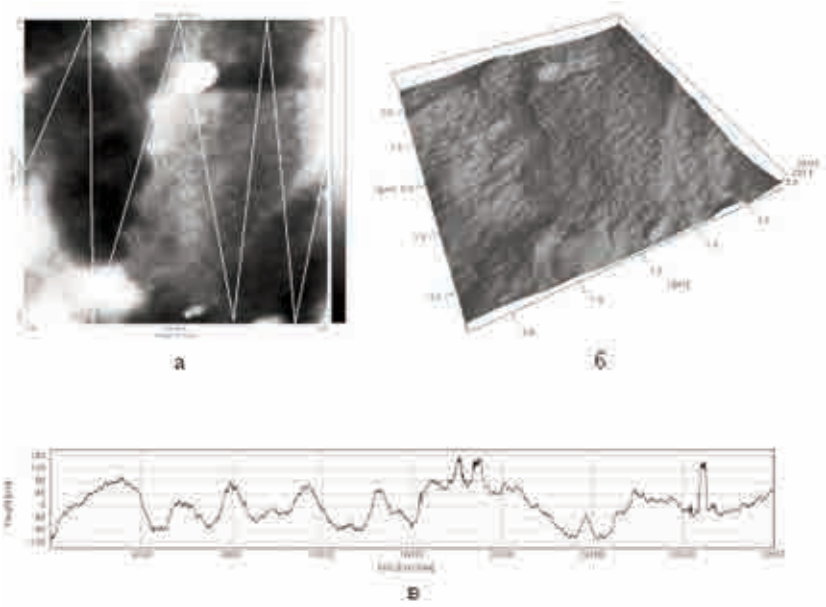


Рис. 3. Скан 5×5 мкм (*а*), наноструктура (*б*), нанорельеф (*в*) фрагмента поверхности образца сплава ВТ6 после ионного травления (10 мин) и нанесения TiN (5 мин)

Ионное травление поверхности, обрабатываемой газовой плазмой Ar с энергией потока 500 эВ в течение 1 мин при температуре подложки 500 ˚С, приводит не только к удалению оксидной пленки и адсорбированных элементов, но и к интенсивному растраву поверхности, о чем свидетельствуют сформированные наноструктура и нанорельеф (рис. 2,*б*,*в*).

Уменьшение энергии потока Ar до 200 эВ и нанесение нитрида титана в течение 5 мин при температуре 350 ˚С не ухудшает поверхности, и формируемые в процессе создания покрытий наноструктура и нанорельеф сглаживают исходный рельеф поверхности, при этом Ra = 0,027 (рис. 3).

Таким образом, по изменению поверхностных наноструктуры и нанорельефа можно судить об эффективности осуществления этапов технологических процессов ВИП обработки и на этом основании управлять структурными изменениями поверхностного слоя конструкционных материалов, реализуя атомарно-кластерный наноструктурный механизм. Управление энергетическими технологическими параметрами процессов позволит формировать заданный уровень эксплуатационных свойств.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ильин А.А., Плихунов В.В., Петров Л.М., Иванчук С.Б., Гаврилов А.С., Спектор В.С.** Вакуумная ионно-плазменная обработка конструкционных материалов авиационной техники // Авиационная промышленность. 2007. № 1. С. 31–34.

2. **Ильин А.А., Плихунов В.В., Петров Л.М.** Формирование энергетического состояния поверхности конструкционных материалов при вакуумной ионно-плазменной обработке // Авиационная промышленность. 2011. № 2. С. 28–33.

3. **Петров Л.М., Иванчук С.Б., Сарычев С.М., Федорова Т.В.** Подготовка поверхности титановых сплавов при вакуумной ионно-плазменной обработке / Сб. трудов VI Всеросс. с междунар. участием науч.-техн. конф. «Быстрозакаленные материалы и покрытия». 4–5 дек. 2007 г. М.: МАТИ–РГТУ им. К.Э. Циолковского. С. 321–325.

4. **Плихунов В.В., Петров Л.М., Зеленков В.В., Иванчук С.Б., Соколов И.В.** Структурные изменения поверхности титановых сплавов при ионном травлении газовой плазмой аргона / Сб. трудов Междунар. конф. «Ti–2009 в СНГ». 2009 г. Украина, г. Одесса. С. 343–347.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОАЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЩЕТОЧНЫХ УПЛОТНЕНИЙ

***В.Л.Юрьев**, докт. техн. наук, **В.А.Грибановский**, канд. техн. наук, **С.В.Старочкина**, **И.А.Афанасьева** (ОАО "Институт технологии и организации производства")*

Приведены результаты исследования по подбору параметров алмазного электрохимического шлифования плоских образцов щеточных уплотнений.

Ключевые слова: щеточное уплотнение, алмазное электрохимическое шлифование, повышение жесткости.

RESEARCH ON THE ELECTRODIAMOND GRINDING PROCESS OF THE ELASTIC MEMBERS OF BRUSH SEALS. *V.L.Yuriev, Dr.Techn.Sc, V.A.Gribanovsky, Cand.Techn.Sc, S.V.Starochkina, I.A.Afanasieva.*

Results of research on selection of electrochemical diamond grinding parameters for flat samples of brush seals are presented.

Keywords: brush seal, electrochemical diamond grinding, stiffening effect.

Для увеличения КПД газотурбинного двигателя необходимо повышать эффективность работы его узлов. Один из способов этого – снижение утечек воздуха, достигаемое за счет совершенствования уплотнений. На современных авиационных газотурбинных двигателях применяются щеточные уплотнения (ЩУ), имеющие более высокую уплотняющую способность по сравнению с лабиринтными.

При изготовлении ЩУ есть ряд проблем, одна из которых – чистовая обработка внутреннего сопрягаемого диаметра упругого уплотнительного элемента (УЭ).

На сопрягаемой поверхностности упругих элементов ЩУ, контактируемой с ротором, не допускаются изменения микроструктуры поверхностного слоя торцевых поверхностей проволочек относительно основы металла щетин, наличие зон пластической деформации проволочек, так как это ведет к снижению упругости УЭ, не допускается наличие заусенцев, острых кромок, что может быть причиной повышенного износа ротора в месте его контакта с уплотнением. Также не допускается значительного отклонения щетин от оси (границ) уплотнения и отклонения (загиба) кончиков щетины.

Шероховатость поверхности должна соответствовать *Ra* 0,2–0,8 мкм, а отклонение от круглости посадочного диаметра должно ограничиваться допуском на этот диаметр [1]. Однако на рабочей поверхности ЩУ могут быть дефекты, связанные со способом и режимами обработки упругого уплотнительного элемента: зоны пластической деформации щетин; оплавление кончиков щетин (может иметь место при электроэрозионной обработке); значительное отклонение щетин от оси (границ) уплотнения; отклонение (загиб) кончиков щетин; значительное отклонение от круглости посадочного диаметра [2].

Вопрос точности выполнения сопрягаемого внутреннего диаметра ЩУ связан с выбором способа выполнения чистовой операции, которая обеспечила бы необходи-

http://apniat.ru

мое качество обработанной поверхности. Известны [3] три варианта сопряжений ЩУ с ротором: по посадке с натягом; по посадке с зазором и с достаточно широким допуском на внутренний диаметр УЭ (d±0,12 мм); по посадке с зазором и с жестким допуском на внутренний диаметр УЭ (d+0,05 мм). В последнем случае предполагается дальнейшая притирка ЩУ с валом-имитатором на специальном стенде.

При выборе способов обработки внутренних диаметров ЩУ считаем перспективным способ алмазного электрохимического шлифования с наложением тока прямой полярности на обрабатываемую деталь при использовании алмазных токопроводящих кругов (круг – катод, деталь – анод). Были проведены экспериментальные исследования по подбору параметров алмазного электрохимического шлифования ЩУ на плоских образцах. ЩУ имеют недостаточную жесткость уплотняющего элемента (гибкость щетин не позволяет с необходимой точностью получить заданный размер), поэтому авторами использован прием временного повышения жесткости УЭ путем заливки межпроволочного пространства специальным скрепляющим составом, который, затвердевая, фиксировал щетины в рабочем положении. После шлифования состав удаляется.

Процесс шлифования исследовался по трем схемам обработки (рис. 1).

По схеме 1 реализовали встречное шлифование, когда направление продольной подачи противоположно направлению вращения круга в нижней точке касания детали; по схеме 2 – попутное шлифование, когда направление продольной подачи совпадает с направлением вращения круга в нижней точке касания детали, при этом щетины имели наклон в сторону направления продольной подачи; по схеме 3 – то же, что и по схеме 2, но при этом щетины имели наклон в сторону, противоположную направлению продольной подачи.

Выбор схемы обработки при алмазном шлифовании проводился на образцах без скрепления щетин и без наложения тока при одних и тех же режимах резания. В качестве СОТС применяли раствор эмульсола.

Анализ экспериментальных исследований схем обработки показал, что при шлифовании по схеме 1 (см. рис. 1) имела место значительная деформация щетин вдоль оси проволоки (рис. 2,*а*), что является недопустимым дефектом; наблюдалось значительное отклонение крайних щетинок от оси уплотнения (рис. 2,*б*), наличие зон пластической деформации на торце (на кончиках) щетин (рис. 2,*в*), заусенцев на обработанной плоскости (рис. 2,*г*) и отклонения от прямолинейности обработанных щетин (рис. 2,*д*).

Шлифование образцов ЩУ по схеме 2 (см. рис. 1) позволило устранить деформацию щетин вдоль оси проволоки, но не повлияло на остальные дефекты. Кроме того, было обнаружено некоторое удлинение сечения среза на торцах щетин, что может объясняться изменением угла наклона щетин α под действием сил резания и появлением эффекта «размазывания» металла на

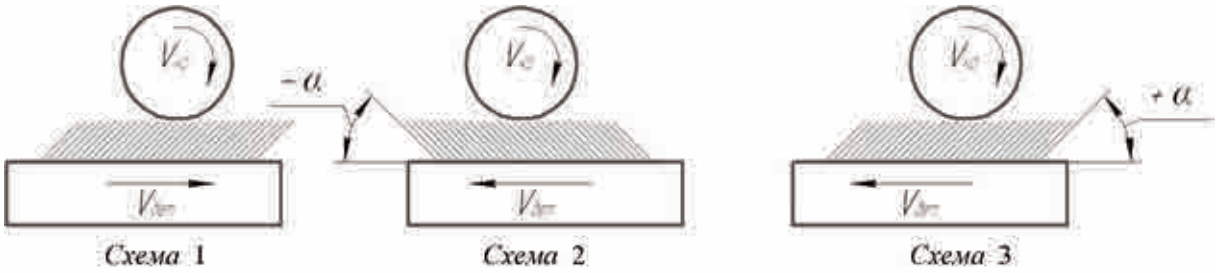


Рис. 1. Схемы взаимных перемещений детали и шлифовального круга

http://apniat.ru

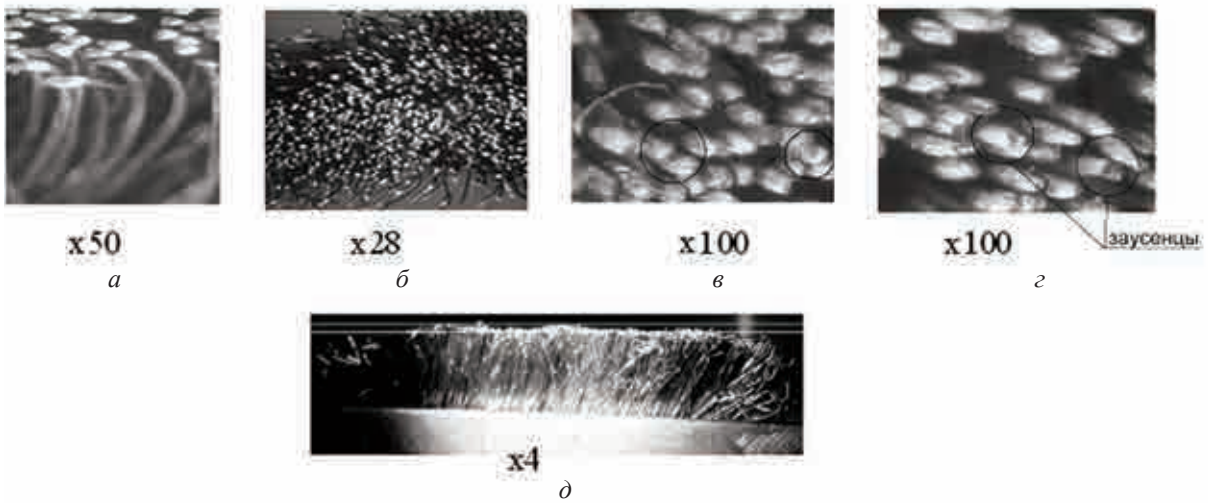


Рис. 2. Образец ЩУ без заливки при шлифовании по схеме № 1

обрабатываемой поверхности при обработке материалов с высокой вязкостью.

Шлифование образцов по схеме 3 (см. рис. 1) позволило снизить как деформацию щетин вдоль оси проволоки, так и эффект удлинения среза на щетинах, но не повлияло на остальные дефекты.

Использование в образцах нитроцеллюлозного лака в качестве скрепляющей массы позволило значительно снизить число и величину дефектов.

При подборе режимов алмазного электрохимического шлифования исследовались «условная» производительность съема обрабатываемого металла; остаточная деформация упругих элементов щетины после шлифования, определяемая величиной отклонения щетин до и после обработки; качество обработанной поверхности щетин (отсутствие заусенцев на обработанной плоскости, зон пластической деформации на торце щетин, значительного отклонения крайних щетинок от оси уплотнения, деформации щетин вдоль ее оси, оплавленных кончиков щетин на торце).

«Условная» производительность съема определялась при принятом допущении, что шлифуемая поверхность является непрерывной в пределах образца и однородной по материалу. В действительности же проволоки уложены дискретно с определенным промежутком, и площадь снимаемого объема металла пропорциональна площади среза проволочки диаметром $d_{пр}$, расположенной под углом α (см. рис. 1), и плотности упаковки проволочек в 1 мм^2. По сути, процесс съема металла УЭ является прерывистым процессом.

«Условная» производительность съема [7]:

$$П = S\,t\,b,$$

где S – продольная подача, мм/мин; t – глубина резания, мм; b – ширина обрабатываемой поверхности, мм.

Величина «условной» производительности съема использовалась при относительной оценке процесса на разных режимах шлифования, основным же параметром оценки являлось качество обработанной поверхности.

Согласно рекомендациям по алмазному электрохимическому шлифованию жаропрочных сталей и сплавов [4, 5, 6] была выбрана скорость резания 21 м/с, а также диапазон переменных параметров режимов резания: продольная подача 0,114 – 0,250 м/мин, глубина резания 0,01 – 0,1 мм, напряжение при обработке 3 – 15 В. «Условная» производительность съема составила 2 – 50 мм^3/мин. В качестве электролита использовался водный раствор солей: калий азотнокислый (KNO_3) – 10 % и натрий фосфорнокислый ($Na_3PO_3 \cdot 12H_2O$) – 3 %.

Объем растворившегося материала на аноде (детали) зависит от силы проходящего электрического тока, которая определяется плотностью тока и площадью растворяемой в зоне касания поверхности, что снижает долю механического съема металла.

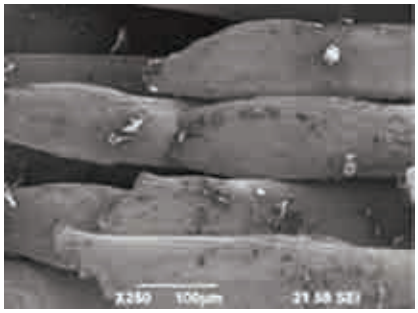
Шлифование производилось на модернизированном станке 3Г71Ам алмазным токопроводящим кругом ∅150×10×5 мм прямого профиля (АС15 125/100 М2-01 – Г5 % К4); использовался специальный источник технологического тока.

Серия экспериментов включала неоднократные рабочие проходы и один выхаживающий проход.

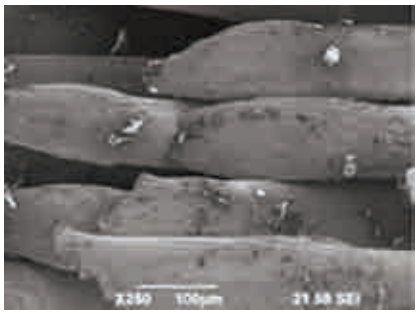
В результате экспериментальных исследований алмазного электрохимического шлифования выявлены некоторые особенности обработки упругих элементов (щетины) ЩУ. Так, повышение напряжения технологического тока до 10 – 15 В приводило к оплавлению кончиков щетин, характерному для электроэрозионной обработки, и появлению на торцевой поверхности щетин «апельсиновой корки» (характерное изменение структуры сплава на никелевой основе за счет неравномерного роста зерен при перегреве). Обработка щетин по схеме попутного шлифования, при котором направление подачи совпадает с направлением наклона щетин (схема 2) приводит к некоторому удлинению сечения среза щетин (рис. 3,*а*), тогда как при обработке по схеме 3 эффект удлинения сечения среза щетин отсутствовал (рис. 3,*б*).

При уменьшении технологического тока с 6 до 3 В появлялось некоторое число заусенцев. Увеличение продольной подачи до 0,25 м/мин при глубине резания до 0,05 мм позволило увеличить производительность. При этом эффект «апельсиновой корки» на обработанной поверхности не появлялся. Однако наблюдались одиночные заусенцы на торцевой поверхности щетин, наличие которых может объясняться недостаточностью объема электролита, подаваемого в зону резания. Установлено, что наиболее оптимальными являются следующие режимы алмазного электрохимического шлифования: скорость резания 21 м/с; продольная подача 0,25 м/мин, глубина резания 0,05 мм, величина технологического напряжения 6 В, сила технологического тока 2 А. При таких режимах не происходило оплавления кончиков щетин, не выявлены зоны пластической деформации, обеспечена прямолинейность в допустимых пределах. Наличие заусенцев отмечалось в единичных случаях.

Анализ результатов экспериментальных исследований алмазного электрохимического шлифования упругих элементов образцов щеточного уплотнения позволил сделать вывод о целесообразности использования процесса алмазного электрохимического шлифования для чистовой обработки внутреннего диаметра ЩУ, при этом необходимо использование приема временного закрепления щетин путем заливки их



а



б

Рис. 3. Образцы после алмазного электрохимического шлифования (×250) по схеме 2 *S* = 0,25 м/мин; *t* = 0,05 мм; *U* = 3 В (*а*) и по схеме 3 *S* = 0,25 м/мин; *t* = 0,05 мм; *U* = 6 В (*б*)

http://apniat.ru

скрепляющим составом на основе нитроцеллюлозного лака, который впоследствии удаляется.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пейчев Г.И., Кондратюк Э.В. и др.** Сравнительный анализ щеточного и лабиринтного уплотнений ГТД // Вестник двигателестроения. Украина. 2009. № 1. С. 66–70.

2. **Proctor M.P. and others.** Brush Seals for Cryogenic Applications. M.: «National Aeronautics and Space Administration», 1996.

3. **Копурдратюк Э.В., Зиличихис С.Д., Гребенников М.А., Каминская Л.А.** Проблемы формирования внутреннего диаметра уплотнительного элемента щеточного уплотнения ГТД // Вестник двигателестроения. 2009. № 2.

4. **Коул Р.Р.** Экспериментальное исследование электролитического шлифования // Труды американского общества инженеров-механиков. Сер. В. № 2. 1986.

5. **Мамай А.В., Дубров Г.Д., Сохно В.С.** Металлоабразивные круги для электрохимического шлифования труднообрабатываемых сплавов / Материалы науч.-техн. семинара «Электрофизическая и электрохимическая чистовая размерная обработка труднообрабатываемых сплавов». Л.: ЛФНТП, 1979.

6. **Квашенкин Е.В., Нейман Н.В, Перлов С.В., Пет Л.А.** Станок электроабразивного шлифования деталей 4СЭШ-1 // Сб. «Наука – производству». Уфа: ОАО НИИТ, 2003.

7. **Маслов Е.Н.** Теория шлифования материалов. М.: Машиностроение, 1974.

ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ МАССОПЕРЕНОСА И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЯ ПРИ ВАКУУМНОЙ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ

***В.В.Плихунов**, канд. техн. наук* (*ОАО “Национальный институт авиационных технологий”*)

На основе экспериментальных данных, полученных с помощью специальных образцов-свидетелей, построена математическая модель процессов массопереноса и роста покрытия, позволяющая определить толщину покрытия на поверхности детали, движущейся в плазменном потоке по произвольной траектории.

Ключевые слова: численно-экспериментальный метод исследования, образцы-свидетели, плазменные потоки, массоперенос, толщина покрытия, вектор-функция максимальной скорости роста покрытия, линии уровня, градиент, линии наискорейшего убывания функции, аппроксимация.

NUMERICALLY EXPERIMENTAL ANALYSIS OF MODELING MASS TRANSFER PROCESSES AND DETERMINATION OF THE COATING THICKNESS UNDER VACUUM ION-PLASMA PROCESSING.

V.V.Plikhunov, Cand.Techn.Sc.

Based on experimental data obtained using special reference specimens, a mathematical model of mass transfer processes and coating growth has been constructed. It permits to determine coating thickness on the surface of a part moving through the plasma stream in an arbitrary path.

Keywords: numerically experimental analysis, reference specimens, plasma streams, mass transfer, coating thickness, vector function of the maximum rate of coating growth, level lines, gradient, lines of the quickest function decrease, approximation.

Основной задачей вакуумной ионно-плазменной (ВИП) обработки является создание качественных функциональных покрытий, обеспечивающих повышение служебных характеристик деталей при эксплуатации. Важнейшей характеристикой любого покрытия – его толщина, которая совместно с другими характеристиками опре-

деляет функциональные возможности покрытия и его качество. Актуальность задачи создания покрытий равномерной толщины и повышения производительности технологических процессов нанесения покрытий является очевидной и определяет ряд направлений научных исследований, необходимых для их решения. К числу этих направлений, в первую очередь, следует отнести экспериментальное и математическое моделирование процессов массопереноса и формирования толщины покрытия при ВИП обработке. Сложность теоретического описания этих процессов приводит к необходимости создания численно-экспериментальных методов исследования, позволяющих на основе объективных данных эксперимента проводить математическое моделирование изучаемого процесса. В работе [1] описан метод экспериментального исследования плазменных потоков при ВИП обработке, аппаратную основу которого составляют универсальные образцы-свидетели (рис. 1) и комплекс приборного оснащения, обеспечивающие получение информации о толщине наносимого покрытия, процентном содержании материала покрытия и направлении плазменных потоков. Экспериментальные данные, полученные с помощью этого метода, являются исходной информацией для математического моделирования процессов массопереноса и формирования толщины покрытия при ВИП обработке.

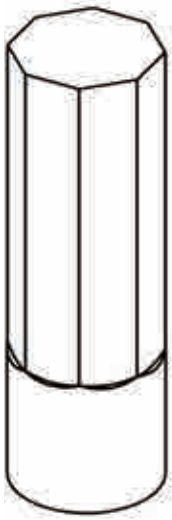


Рис. 1. Образец-свидетель для экспериментального исследования распределения плазменных потоков

В рабочем объеме камеры с помощью источника плазмы создается плазменный поток, осуществляющий массоперенос вещества, формирующего покрытие. Для простоты изложения рассмотрим источник плазмы, создающий осесимметричный плазменный поток. Расположим универсальные образцы-свидетели (далее образцы) в горизонтальной плоскости, проходящей через ось симметрии источника плазмы. После проведения процесса нанесения покрытия на образцы и обработки результатов измерения толщины покрытия на призматических гранях образцов получим график распределения толщины покрытия для каждого образца, который показывает, как изменяется толщина покрытия на боковой поверхности образца. На рис. 2 представлен типовой график распределения толщины покрытия для i-го образца. Этот график характеризуется наличием оси симметрии, расположенной под

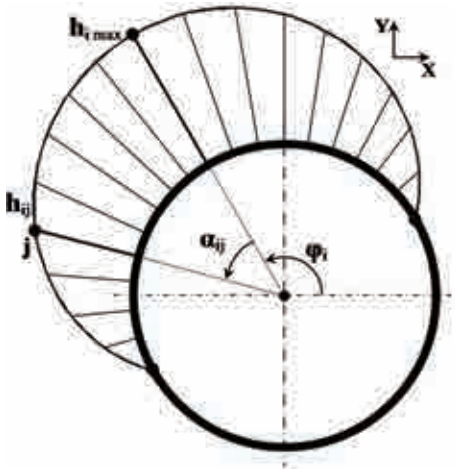


Рис. 2. Распределение толщины покрытия по поверхности цилиндрического образца

углом φ_i в системе координат XOY, и проходящим через эту ось максимумом толщины покрытия $h_{i\,\max}$. С высокой степенью точности функция толщины покрытия описывается для i-го образца формулой

$$h_{ij} = h_{i\,\max} \cdot \cos \alpha_{ij}, \qquad (1)$$

где i – номер образца; j – номер точки на поверхности i-го образца; $h_{i\,\max}$ – максимальное значение толщины для i-го образца (получено экспериментально); α_{ij} – угол, отсчитываемый по часовой стрелке от направления $h_{i\,\max}$, определяемого углом φ_i.

http://apniat.ru

Угол α_{ij} изменяется в интервале ±90°, при других значениях считается, что толщина покрытия в формуле (1) равна нулю. Это допущение хорошо описывает распределение толщины при малых значениях давления газа в камере ($P \leq 0{,}133$ Па) и отсутствии опорного напряжения на образцах. Влияние этих факторов может быть учтено с помощью коэффициентов, полученных при экспериментах. Экспериментальное значение толщины покрытия $h_{i\,\max}$ получено за время работы катода t. Тогда максимальная скорость роста покрытия

$$V_{i\,\max} = h_{i\,\max}/t. \qquad (2)$$

Соотношение (2) справедливо для случая линейной зависимости толщины покрытия от времени его нанесения. В случае нелинейного характера этой зависимости соотношение (2) примет вид:

$$V_{i\,\max} = \frac{\partial h_{i\,\max}}{\partial t}. \qquad (3)$$

После получения экспериментальных значений $V_{i\,\max}$ для всех образцов, размещенных в камере, и проведения аппроксимации методом наименьших квадратов получим аналитическую функцию максимальной скорости роста покрытий V, определенную в любой точке пространства вакуумной камеры. На рис. 3 представлено семейство изолиний, на каждой из которых величина V имеет одинаковое значение. Изолинии построены в горизонтальной плоскости, проходящей через ось симметрии стандартного катода, используемого при нанесении покрытий на установке «Радуга» [2]. Семейству изолиний соответствует семейство «градиентных» линий (линии наискорейшего убывания функции V) [3], которые определяют в точках пространства направление вектор-функции максимальной скорости роста покрытия $\boldsymbol{W}$. Направление вектор-функции $\boldsymbol{W}$ в исследуемой точке перпендикулярно изолинии, проходящей через эту точку. Построение «градиентных» линий производится с помощью выражения для градиента $\boldsymbol{g}$ функции V:

$$\boldsymbol{g} = -\operatorname{grad} V = -\frac{\partial V}{\partial x}\cdot \boldsymbol{i} - \frac{\partial V}{\partial y}\cdot \boldsymbol{j}, \qquad (4)$$

где $\boldsymbol{i}, \boldsymbol{j}$ – базисные векторы декартовой системы координат XOY.

На рис. 3 пунктиром показано семейство «градиентных» линий, положение которых определяется выражением (4).

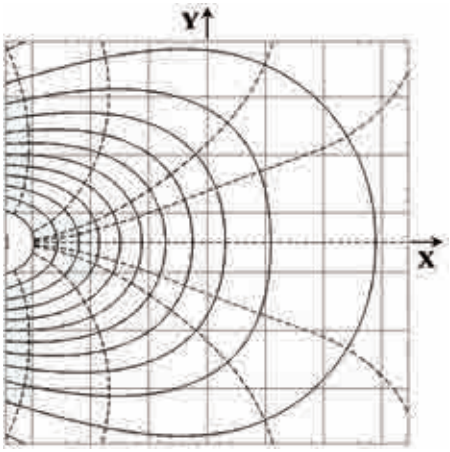


Рис. 3. Изолинии (*сплошные*) и «градиентные» линии (*пунктирные*), определяющие интенсивность и направление процесса массопереноса от стандартного катода установки «Радуга»

Таким образом, процесс роста покрытий на поверхности детали, находящейся в пространстве вакуумной камеры, определяется вектор-функцией $\boldsymbol{W}$. Величина (модуль) этой вектор-функции равна значению функции V, определяющей семейство изолиний $V = \text{const}$. Направление вектор-функции $\boldsymbol{W}$ определяется направлением наискорейшего убывания функции V, а семейство «градиентных» линий, показывающих это направление, строится с помощью формулы (4).

Кроме изолиний и «градиентных» линий, необходимо рассмотреть движение обрабатываемой детали (образца) в пространстве вакуумной камеры. Пусть T_k – траектория движения точки k находящейся на поверхности детали (рис. 4). Рассмотрим на этой траектории произвольное положение точки k_m и соседнее с ним положение k_{m+1}. Точка k в положениях k_m и k_{m+1} имеет внешние нормали к поверхности детали $\boldsymbol{n}_{k,\,m}$ и $\boldsymbol{n}_{k,\,m+1}$

http://apniat.ru

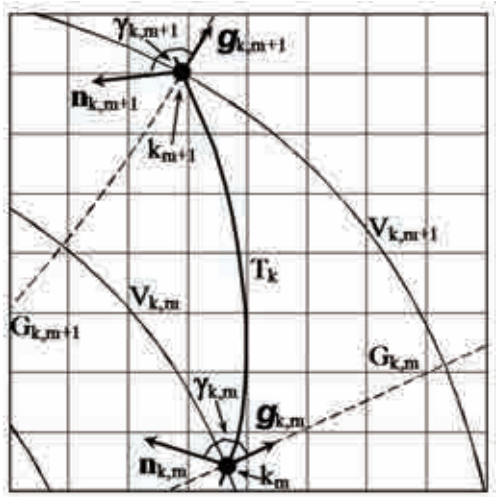


Рис. 4. Взаимодействие точки *k*, находящейся на поверхности движущейся детали, с плазменным потоком

соответственно. Линии уровня, пересекающие траекторию точки k в положениях k_m и k_{m+1}, обозначим $V_{k,\,m}$ и $V_{k,\,m+1}$, а соответствующие им «градиентные» линии $G_{k,\,m}$ и $G_{k,\,m+1}$. Скорости роста покрытия $v_{k,\,m}$ и $v_{k,\,m+1}$ в положениях k_m и k_{m+1} определяются величиной и направлением вектор-функции $\boldsymbol{W}$, а также направлением внешней нормали к поверхности детали в этих точках и могут быть определены из следующих соотношений:

$$v_{k,\,m} = V_{k,\,m} \cdot |\cos\gamma_{k,\,m}|; \qquad (5)$$

$$v_{k,\,m+1} = V_{k,\,m+1} \cdot |\cos\gamma_{k,\,m+1}|, \qquad (6)$$

где $\gamma_{k,\,m}$ – наименьший из углов между векторами $\boldsymbol{n}_{k,\,m}$ и $\boldsymbol{g}_{k,\,m}$; $\gamma_{k,\,m+1}$ – наименьший из углов между векторами $\boldsymbol{n}_{k,\,m+1}$ и $\boldsymbol{g}_{k,\,m+1}$.

Углы γ изменяются в интервале $0 \le \gamma \le \pi$. Будем считать, что при $\gamma = \pi/2$ значение скорости роста покрытия равно нулю. Это допущение хорошо согласуется с экспериментальными данными при низком давлении газа в камере и отсутствии опорного напряжения на обрабатываемой детали.

При переходе точки k из положения k_m в положение k_{m+1} на траектории своего движения эта точка поверхности получает прирост толщины покрытия $h_{k,\,m,\,m+1}$:

$$h_{k,\,m,\,m+1} = \left(\frac{v_{k,\,m} + v_{k,\,m+1}}{2}\right) t_{k,\,m,\,m+1}, \qquad (7)$$

где $t_{k,\,m,\,m+1}$ – время прохождения точкой k траектории между k_m и k_{m+1}.

В соотношении (6) выражение в круглых скобках определяет среднее значение скорости роста покрытия на участке траектории между k_m и k_{m+1}.

Суммируя значения прироста толщины покрытия, получаемые с помощью формулы (7) для всех M положений точки k на траектории движения, получим значение толщины покрытия в точке k на поверхности детали:

$$h_k = \sum_{m=1}^{M} h_{k,\,m,\,m+1}. \qquad (8)$$

Отметим, что в случае замкнутых траекторий движения точки k, положение k_{m+1} совпадает с положением k_1.

Точность результатов, получаемых по формуле (8), определяется числом положений M точки k на траектории своего движения. В случае нанесения покрытия на неподвижный объект задача определения толщины покрытия в любой точке на его поверхности упрощается и решается без рассмотрения траекторий движения точек поверхности.

Представленный численно-экспериментальный метод определения толщины покрытия при ВИП обработке реализован с помощью программного модуля, разработанного в лаборатории «Математическое моделирование технологических процессов» Национального института авиационных технологий. Численное моделирование ряда задач показало хорошее соответствие результатов моделирования экспериментальным данным и определило основные направления исследований по расширению возможностей метода. Перспективность представленного численно-экспериментального метода определяется тем фактом, что наиболее сложные для теоретического описания физико-химические процессы, происходящие при взаимодействии обрабатываемой детали с плазменными потоками, пред-

ставлены экспериментальными данными, которые являются основой для последующего математического моделирования, обеспечивающего создание управляемых и прогнозируемых технологий ВИП обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Плихунов В.В.** Экспериментальный метод исследования плазменных потоков при вакуумной ионно-плазменной обработке // Авиационная промышленность. 2011. № 2. С. 18–21.

2. **Ильин А.А., Плихунов В.В., Петров Л.М., Иванчук С.Б., Гаврилов А.С., Спектор В.С.** Вакуумная ионно-плазменная поверхностная обработка конструкционных материалов авиационной техники // Авиационная промышленность. 2007. № 1. С. 31–34.

3. **Краснов М.А., Кисилев А.И., Макаренко Г.И.** Векторный анализ. М.: Наука, 1978. 160 с.

ОЦЕНКА МАСЛОЕМКОСТИ КОЛЕЦ ШАРИКОПОДШИПНИКОВ, ОБРАБОТАННЫХ ДИСКРЕТНЫМ ВИБРАЦИОННЫМ РЕЗАНИЕМ

***Б.С.Орлов**, канд. техн. наук, **А.А.Скрипкин**, докт. техн. наук,*
***Н.В.Ермольчева** (Саратовский государственный технический университет)*

Приведены зависимости объемных параметров микрорельефа поверхности колец шарикоподшипников методом дискретного вибрационного резания от режимов обработки и других технологических факторов.

Ключевые слова: частично регулярный микрорельеф, параметры микрорельефа, дискретное вибрационное резание, маслоемкость, шарикоподшипник.

EVALUATION OF THE OIL ABSORPTION OF BALL RACES PROCESSED BY DISCRETE VIBRATORY CUTTING. *B.S.Orlov, Cand.Techn.Sc, A.A.Skripkin, Dr.Techn.Sc, N.V.Ermol'cheva.*

Dependencies for formation of volumetric microrelief parameters of ball race surfaces by a discrete vibratory cutting method on process conditions and other manufacturing factors are presented.

Keywords: partially regular microrelief, microrelief parameters, discrete vibratory cutting, oil absorption, ball bearing.

Наличие необходимого количества смазки в шарикоподшипниковом узле является обязательным условием для обеспечения надежности и долговечности эксплуатации изделия.

Для быстровращающихся деталей, к которым относятся упорные кольца шарикоподшипника, количество удерживаемой на поверхности смазки зависит от объема масляных канавок на трущихся поверхностях – беговых дорожках изделия.

Объем масляных канавок, определяющих одну из важнейших характеристик трущихся в условиях смазки поверхностей – маслоемкость, практически не может быть рассчитан для поверхностей с нерегулярным микрорельефом. С созданием поверхностей с регулярным микрорельефом возможен аналитический расчет этой величины.

Ранее были получены формулы для расчета объемных характеристик частично регулярного микрорельефа на цилиндрических поверхностях деталей методом дискретного вибрационного резания (ДВР) [1]. Рассмотрим с помощью устройства для вибрационной резки поверхностей [2] процесс образования частично регулярного микрорельефа в виде сер-

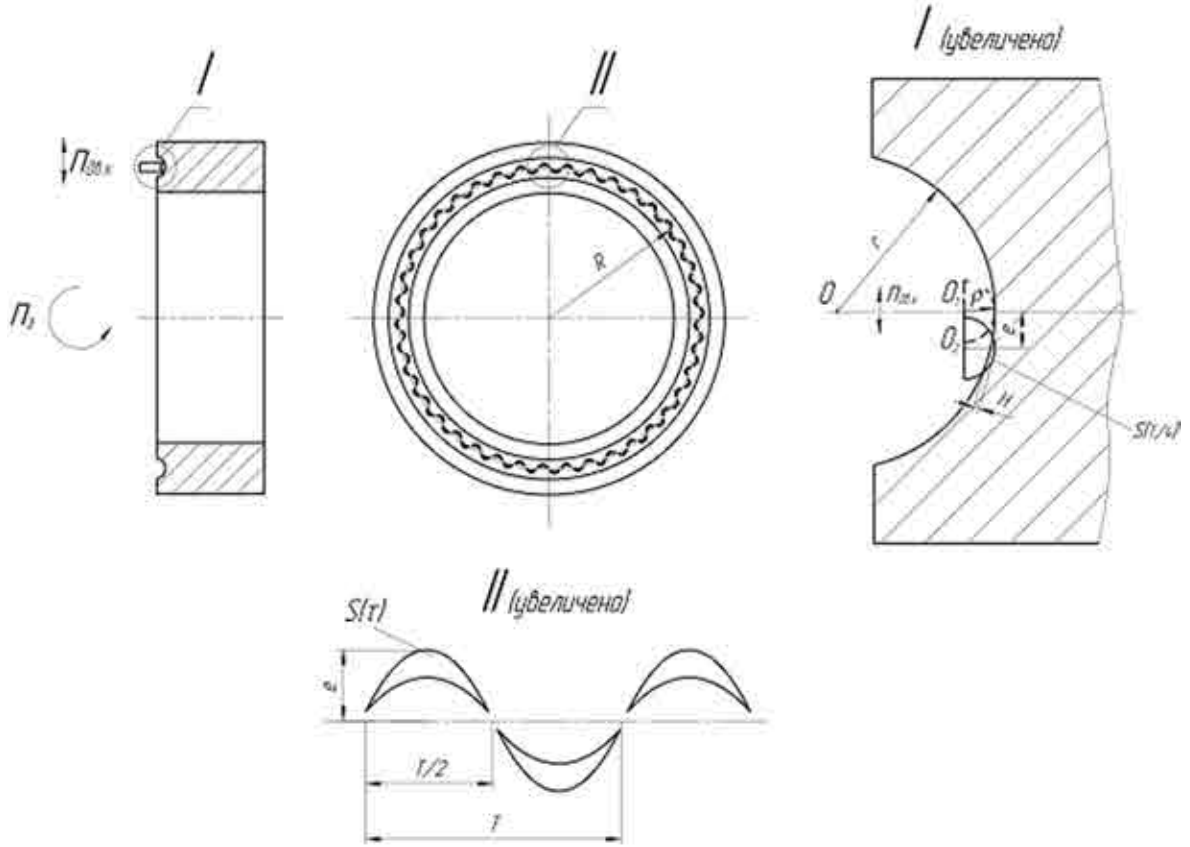


Рис. 1. Схема формирования микрорельефа на беговых дорожках подшипника

повидных микролунок на тороидальных поверхностях беговых дорожек упорных колец шарикоподшипников, обработанных ДВР в предположении участия в резании режущей части резца, выполненной в виде полусферы радиусом ρ (рис. 1).

Установка резца при наладке осуществляется в среднем положении его осцилляции (по оси OO_1) до соприкосновения с обрабатываемой поверхностью беговой дорожки (или с зазором 1–2 мкм). Тогда при амплитуде осцилляции $e = O_1O_2$ максимальная глубина микролунки в крайних положениях резца определяется по формуле, полученной с помощью геометрических расчетов из рис. 1:

$$H = \frac{\left(\rho + \sqrt{e^2 + (r-\rho)^2}\right)^2 - r^2}{2\sqrt{e^2 + (r-\rho)^2}}, \qquad (1)$$

где r – радиус беговой дорожки подшипника; e – амплитуда осцилляции резца.

За полупериод осцилляции резца $T/2$ глубина микролунки h на беговой дорожке кольца подшипника изменяется от 0 до H и определяется по формуле

$$h = H \cdot \sin\frac{2\pi}{T}\tau. \qquad (2)$$

Объем микролунки

$$V = \int_0^{T/2} S(\tau) v d\tau, \qquad (3)$$

где $S(\tau)$ – площадь поперечного сечения микролунки; v – окружная скорость вращения поверхности беговой дорожки.

Так как площадь сечения микролунки в любой момент времени τ, определяемая в соответствии с рис. 1 как разница площадей двух сегментов, имеет вид:

$$S(\tau) = \frac{4}{3}\sqrt{2\rho h}\left[h - r + \sqrt{r^2 - 2\rho h}\right], \qquad (4)$$

то объем микролунки за время полупериода осцилляции резца

$$V = \frac{4}{3} T v \int_0^{\frac{T}{2}} \sqrt{2\rho H \sin\frac{2\pi}{T}\tau} \times$$

$$\times \left[H \sin\frac{2\pi}{T}\tau - r + \sqrt{r^2 - 2\rho H \sin\frac{2\pi}{T}\tau}\right] d\tau. \qquad (5)$$

Приведение интеграла в уравнении (5) к стандартной форме, для которой имеются таблицы, довольно сложно, поэтому он может быть вычислен по формуле Симпсона, что в большинстве практических случаев допустимо.

В итоге

$$V = \frac{4}{9} T v \sqrt{2\rho H}\left[H - r + \sqrt{r^2 - 2\rho H}\right]. \quad (6)$$

Так как $T = \frac{60}{n_{\text{дв.х.}}}$, $v = \frac{\pi n_з d_з}{60} = \frac{\pi R n_з}{30}$ [3], получим

$$V = \frac{8\pi R}{9i}\sqrt{2\rho H}\left[H - r + \sqrt{r^2 - 2\rho H}\right], \quad (7)$$

где $i = \frac{n_{\text{дв.х}}}{n_з} = [i] + \{i\}$ – число циклов осцилляции резца за один оборот заготовки; $[i]$ – целая часть числа i; $\{i\}$ – дробная часть числа i; R – радиус подшипника.

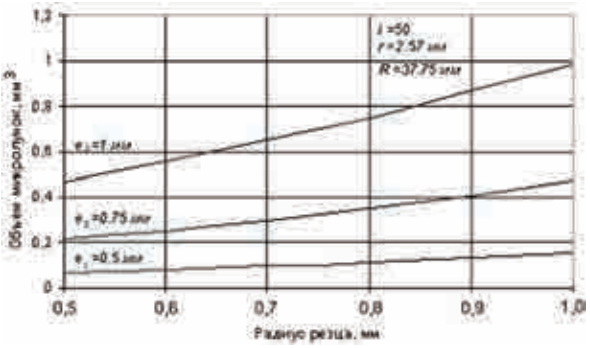


Рис. 2. Зависимости объема микролунок от радиуса вершины резца

Объем всех микролунок на поверхности беговой дорожки за один оборот заготовки при $\{i\} = 0$ определяется как

$$V_\Sigma = \frac{16\pi R}{9i}\sqrt{2\rho H}\left[H - r + \sqrt{r^2 - 2\rho H}\right]. \quad (8)$$

На основании полученной формулы (8) были построены зависимости объема микролунок от радиуса резца и числа циклов осцилляции резца за один оборот заготовки (рис. 2, 3).

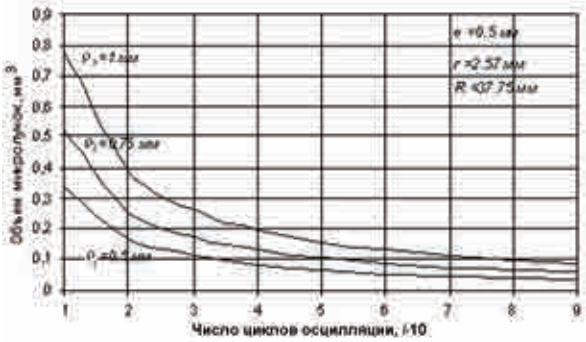


Рис. 3. Зависимости объема микролунок от числа циклов осцилляции резца за один оборот заготовки

Удельный объем микролунок, представляющий собой отношение объема микролунок к площади поверхности их расположения, характеризует степень обеспеченности поверхности смазкой, то есть ее маслоемкость, которая влияет на эксплуатационные свойства подшипника (износостойкость, долговечность и др.). Произведенные расчеты удельного объема микролунок для упорного подшипника типа 1118-2902840 показали возможность его получения более 0,0016 мм^3/мм^2, что согласуется с оптимальными значениями для поверхностей трения [3].

Полученные зависимости параметров микрорельефа дают возможность решать задачи технологического обеспечения дискретного вибрационного резания для обработки колец шарикоподшипников с требуемыми параметрами ЧРМР.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Орлов Б.С., Скрипкин А.А., Ермольчева Н.В.** Аналитический расчет объемных характеристик микрорельефа поверхностей при дискретном вибрационном резании // Авиационная промышленность. 2010. № 3. С. 35–38.

2. **Пат. 96810 РФ.** Устройство для вибрационной обработки поверхностей / Б.С.Орлов, Д.В.Черепанов, А.А.Скрипкин, Н.В.Ермольчева. Бюл. № 23, 2010.

3. **Шнейдер Ю.Г.** Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплутационные свойства. Л.: Машиностроение, 1972. 250 с.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТАЛЛУРГИЯ

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ВЭ ДЕФОРМАЦИЙ В АВИАЦИОННЫХ СТЕКЛАХ ИЗ ЛИНЕЙНЫХ И ПОПЕРЕЧНОСШИТЫХ ПОЛИМЕРОВ ПРИ ЗНАКОПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЖЕНИЯХ

***Г.М.Харитонов**, канд. техн. наук, **О.И.Хитрова** (ФГУП "ЛИИ им. М.М. Громова"), **Н.О.Яковлев**, **В.С.Ерасов**, канд. техн. наук (ФГУП "ВИАМ" ГНЦ РФ)*

Изложены результаты экспериментальных исследований закономерностей развития и восстановления высокоэластических (ВЭ) деформаций при знакопеременном нагружении авиационных стекол из линейных и поперечносшитых полимеров и полимеров с частично сшитой структурой.

Ключевые слова: оргстекло, знакопеременное нагружение, высокоэластическая деформация, повышенная температура, модуль упругости.

MECHANISM OF BEHAVIOUR OF HIGHLY ELASTIC DEFORMATION IN AIRCRAFT WINDOWS MADE OF LINEAR AND CROSS-LINKED POLYMERS UNDER ALTERNATING LOADING.

G.M.Haritonov, Cand.Techn.Sc, O.I.Hitrova, N.O.Yakovlev, V.S.Erasov, Cand.Techn.Sc.

Results of experimental investigation into the mechanism of highly elastic deformation development and rebound under alternating loading of the aircraft windows made of linear and cross-linked polymers as well as polymers with partially linked structure are presented.

Keywords: plexiglas, alternating loading, highly elastic deformation, elevated temperature, modulus of elasticity.

Особенности упруго-высокоэластического поведения стекол из линейных полимеров при знакопеременных нагружениях влияют на напряженное состояние самолетного органического остекления, подвергающегося нагреву в полете и на земле [1]. Однако наиболее важная область повышенных рабочих температур органического остекления самолетов ($t_c \pm 30$) °С оказалась не исследованной. Также оказались не исследованными зависимости «точек перехода»[1] от температуры, величин начальных заданных деформаций $\varepsilon(0)_{1,2}$ в первом и втором полуциклах и от времени выдержки $\tau_в$ при $\varepsilon(0)_{1,2} = \text{const}$.

Для решения возникших вопросов и сравнения особенностей поведения ВЭ деформаций в стеклах из линейных и поперечносшитых полимеров авторами были проведены эксперименты со стандартными образцами стекол СО-120 (линейный полимер, $t_c \approx 120$ °С) и ВОС-2 (поперечносшитый полимер с частично сшитой структурой, $t_c \approx 145$ °С). Выполнялись циклические нагружения (сжатие – выдержка при $\varepsilon(0)_1 = \text{const}$ и заданном времени $\tau_в$ – ступенчатая разгрузка – растяжение – выдержка

[1] Величина снижения начальных деформаций, при которых прекращается релаксация напряжении при разгрузке и начинается восстановление ВЭ деформаций.

при $\varepsilon(0)_2 = \text{const}$ – ступенчатая разгрузка) до $\varepsilon(0)_{1,2} = (\pm 2{,}5;\ \pm 5;\ \pm 8)\cdot 10^{-3}$ при температурах 20...90 °С для стекол СО-120 и 20...130 °С для ВОС-2.

Выше указанных температур (до 120 °С для СО-120 и до 145 °С для ВОС-2) выполнялись полуциклы растяжения до тех же величин $\varepsilon(0)_1$. Первый полуцикл сжатия заменялся полуциклом растяжения, поскольку упруго-высокоэластическое поведение и характеристики стекол при знакопеременном нагружении зависят только от номера полуцикла и в реальном полете второй полуцикл нагружения реализуется при температурах остекления ниже $(t_c - 30)$ °С.

Циклы, полуциклы нагружения до начальных заданных $\varepsilon(0)$ выполнялись с временными выдержками $\tau_в = 30$, 300, 600 с при каждом значении $\varepsilon(0)$ и заданной температуре со скоростью деформирования $d\varepsilon/d\tau = 0{,}17\cdot 10^{-3}$ 1/с. Интервал между циклами, полуциклами в однозначных нагружениях составлял не менее 30 мин.

Результаты экспериментов подтвердили влияние ВЭ деформаций, возникших в 1-м полуцикле нагружения, на величины модулей упругости во 2-м полуцикле (E_2). Максимальное снижение величин модулей E_2 составило у стекла СО-120 18 % при 70 °С и у стекла ВОС-2 – 16 % при 105 °С (рис. 1), что связано с продолжением восстановления ВЭ деформаций в процессе нагружения во 2-м полуцикле.

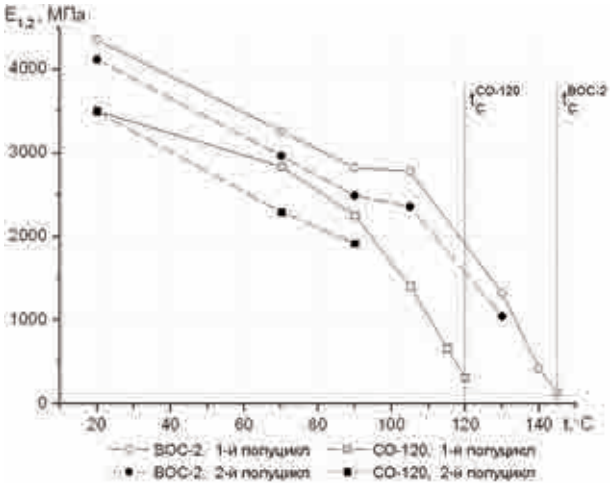


Рис. 1. Зависимости модулей упругости в 1-м и 2-м полуциклах нагружения от температуры

Полная ВЭ деформация ε_p в органических стеклах состоит из мгновенной ε'_p, развивающейся в процессе нагружения, и временной ε''_p, развивающейся при $\varepsilon(0) = \text{const}$, деформаций.

Полноту перехода начальных заданных деформаций в ВЭ деформации за время нагружения до $\varepsilon(0)$ и выдержки при $\varepsilon(0) = \text{const}$ можно представить в виде отношения деформаций $\varepsilon_p/\varepsilon(0)$ (рис. 2). Величины деформаций $\varepsilon(0)_1$ слабо влияют на полноту их перехода в ВЭ деформации в стекле СО-120, в стекле ВОС-2 их влияние более заметно при $t = 90...\ 130$ °С. На полноту перехода влияет и время выдержки $\tau_в$, так в стекле СО-120 при уменьшении выдержки с 600 до 30 с полнота перехода снижается на ~10 % при 115 °С и на 30...40 % при 105 °С. В стекле ВОС-2 влияние выдержки на полноту перехода оказывается менее су-

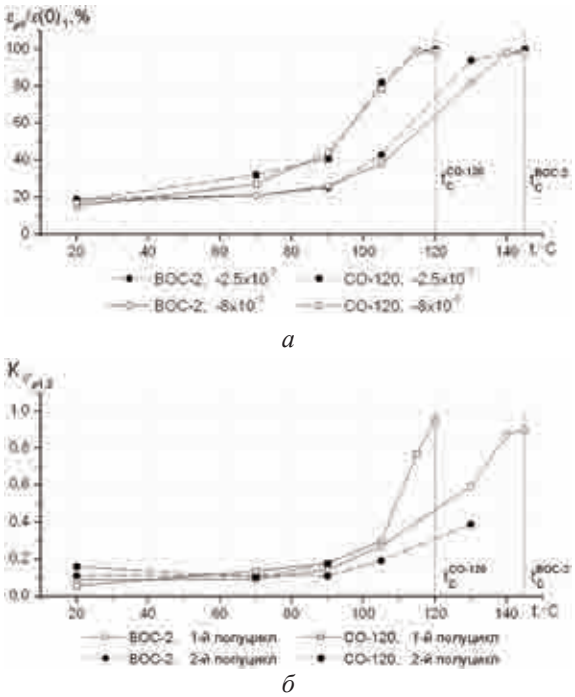


Рис. 2. Зависимости полноты перехода начальных заданных деформаций $\varepsilon(0)_1$ в ВЭ деформации при выдержке 600 с (*а*) и коэффициентов $K_{\varepsilon'p1,2}$ (*б*) от температуры

щественным (≤ 20 %). При $t \geq (t_c - 5)$ °C влияние деформации $\varepsilon(0)_1$ и $\tau_в$ практически прекращается.

Во 2-м полуцикле нагружения изменение полноты перехода деформаций $\varepsilon(0)_2$ с ростом температуры имеет схожий характер с изменением в 1-м полуцикле, отличаясь несколько по влиянию начальных деформаций и времени $\tau_в$.

Доля мгновенных деформаций в полных ВЭ деформациях составляла в первых полуциклах нагружения в стекле СО-120 ~25...45 % при $t = 20...70$ °C и увеличивалась до 87...96 % при 120 °C, в стекле ВОС-2 при $t = 20...90$ °C она находилась в пределах 22...40 % и увеличивалась до 92...96 % при $t = 145$ °C. На соотношение величин ε'_{p1} и ε_{p1} оказывали влияние также деформации $\varepsilon(0)_1$ и длительность выдержки $\tau_в$. С приближением температуры стекол к t_c влияние $\varepsilon(0)_1$ и $\tau_в$ существенно снижалось.

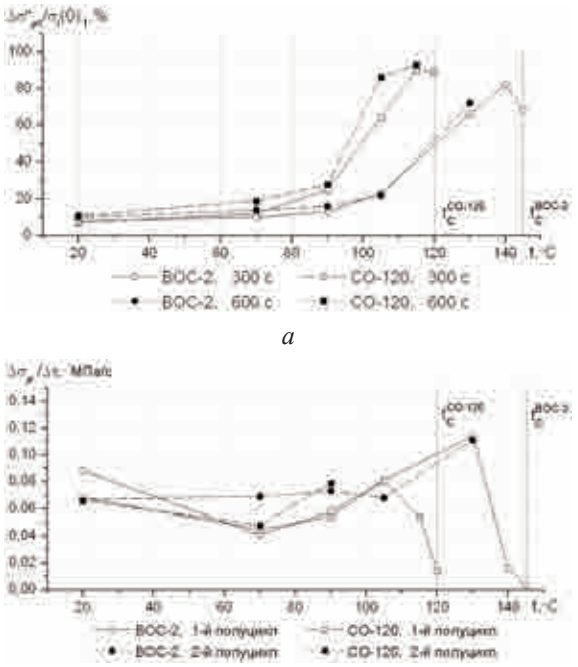
Во вторых полуциклах доля мгновенных деформаций составляла 30...50 % при $t = 20...90$ °C у стекла СО-120 и от 40 до 60 % при 20...105 °C у стекла ВОС-2, повышаясь до ≤ 80 % при $t = 130$ °C. Влияние деформаций $\varepsilon(0)_2$ и времени $\tau_в$ было примерно таким же, как в 1-м полуцикле нагружения.

Мгновенные ВЭ деформации в полуциклах нагружения до $\varepsilon(0) \leq \pm 8 \cdot 10^{-3}$ при заданной температуре имеют линейную зависимость от начальных деформаций вида

$$\varepsilon'_{p1,2} = \alpha_{1,2} + K_{\varepsilon'_{p1,2}} \varepsilon(0)_{1,2}.$$

На рис. 2,*б* представлены зависимости $K_{\varepsilon'_{p1,2}} = f(t\,°C)$ в первом и втором полуциклах нагружения стекол СО-120 и ВОС-2, которые при известной температуре и начальной деформации позволяют определить мгновенную деформацию в стекле при его нагружении.

Временные ВЭ деформации при данных температурах и $\tau_в$ линейно зависят от величин деформаций $\varepsilon(0)$ в соответствующем полуцикле нагружения.



а

б

Рис. 3. Изменение отношений релаксировавших напряжений к начальным напряжениям в 1-м полуцикле (*а*) и средней скорости релаксации напряжений (*б*) в зависимости от температуры

Влияние температуры на развитие временных деформаций заметно возрастает при $t \geq (t_c - 50)$ °C. На рис. 3,*а* показано изменение с ростом температуры отношений релаксировавших напряжений σ''_{p1} к начальным напряжениям $\sigma_i(0)_1$, в первых полуциклах нагружения стекол СО-120 и ВОС-2 при $\varepsilon(0)_1 = -8 \cdot 10^{-3}$ и длительности выдержки $\tau_в = 300$ и 600 с. Как можно заметить, максимальной полноты (82…88 %) релаксация достигает при $t = (t_c - 5)$ °C. Во втором полуцикле нагружения изменение отношений $\sigma''_{p2}/\sigma_i(0)_2$ имеет схожий с первым полуциклом характер, несколько отличаясь величинами.

Приведенные результаты показывают, что изменение полноты релаксации напряжений с повышением температуры в линейном и поперечносшитом с частично сшитой структурой полимерах происходит практически одинаково.

Интересный характер имеют зависимости от температуры средних скоростей ре-

лаксации напряжений на начальных участках выдержки $\tau_в = 0...5$ с в первом и втором полуциклах нагружения до $\varepsilon(0)_{1,2} = \pm 8 \cdot 10^{-3}$ стекол СО-120 и ВОС-2 (рис. 3,*б*). Видно, что скорости релаксации имеют максимум при $t \approx (t_c - 15)$ °С.

По результатам нагружения образцов стекол при нескольких значениях температуры в диапазонах $20...t_c$ и начальных напряжений $\sigma_i(0)_{1,2}$, соответствующих деформациям $\varepsilon(0)_{1,2} \approx (\pm 2{,}5;\ \pm 5;\ \pm 8) \cdot 10^{-3}$, были получены кривые релаксации $\sigma_\tau(\tau_р)_{1,2}$. По этим кривым для ряда выбранных значений $\tau_р$ при каждой температуре были построены линейные зависимости напряжений $\sigma_{\tau_{1,2}} = K_{\sigma_{1,2}} \sigma_i(0)_{1,2}$, а также зависимости коэффициентов $K_{\sigma_{1,2}} = f(t\ °C)$ для каждого выбранного значения времени $\tau_р$, и $K_{\sigma_{1,2}} = f(\tau_р)$ для каждой температуры, при которой определялись кривые релаксации. Указанные зависимости позволяют определять напряжения σ_τ при любых известных начальных напряжениях для любых температур в диапазоне $20...(t_c - 5)$ °С и моментов времени $\tau_р$ без необходимости существенного увеличения числа экспериментов для получения кривых релаксации.

Таким образом, результаты, полученные в экспериментах, показали, что с повышением температуры стекол СО-120 и ВОС-2 выше $(t_c - 50)$ °С происходит значительное ускорение релаксационных процессов. Интенсивность этих процессов в органических стеклах определяется величиной начальных деформаций и температурой. При температурах $t \geq (t_c - 15)$ °С ускорение релаксации происходит за счет более интенсивного роста мгновенных ВЭ деформаций, а при $t > (t_c - 5)$ °С начальные деформации практически полностью переходят в мгновенные ВЭ деформации. Очевидно, что при $t \geq t_c$ начальные деформации будут почти полностью переходить в мгновенные.

Полноту восстановления ВЭ деформаций при разгрузке можно характеризовать отношением разности ВЭ и остаточной (полученной при снижении нагрузки до нуля) деформаций к ВЭ деформации в соответствующем полуцикле нагружения:

$$\Pi_{\varepsilon_{восст1,2}} = \left(\frac{\varepsilon_{p1,2} - \varepsilon_{ост1,2}}{\varepsilon_{p1,2}} \right),$$

то есть при $\varepsilon_{ост} = \varepsilon_p$ восстановления не происходит, а при $\varepsilon_{ост} = 0$ ВЭ деформации восстанавливаются полностью.

На рис. 4,*а* показана зависимость от

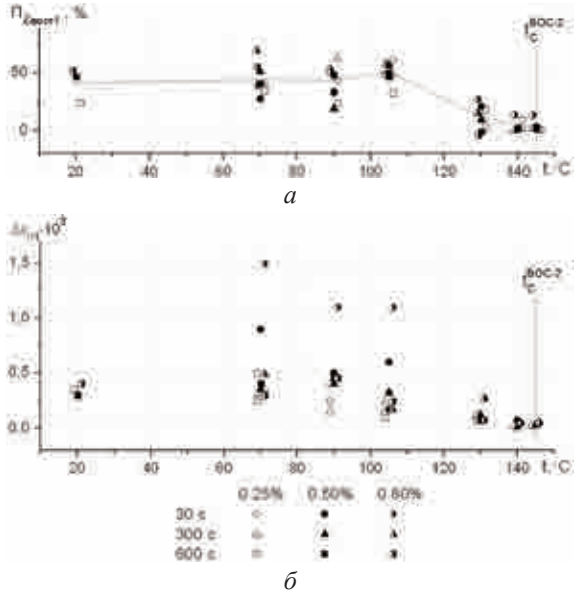


Рис. 4. Зависимости полноты восстановления ВЭ деформаций (*а*) и разностей $\Delta\varepsilon_{П1}$, полученных при разгрузке в первых полуциклах нагружения (*б*) от температуры

температуры полноты восстановления ВЭ деформаций при разгрузке в первых полуциклах нагружения стекла ВОС-2.

Начальные деформации и время выдержки $\tau_в$ оказывали незначительное влияние (в пределах погрешности определения величин $\Pi_{\varepsilon\,восст}$) на полноту восстановления ВЭ деформаций.

Во вторых полуциклах нагружения изменение полноты восстановления ВЭ деформаций с повышением температуры имеет несколько другой характер, чем в первых полуциклах. У стекла СО-120 с увеличением температуры с 20 до 90 °С полнота восстановления снижается с ~35 % до 20…

25 %, у стекла ВОС-2 с повышением температуры до ≤105 °С сохраняется на уровне ~20 %, а при 130 °С снижается до 10 %, как и в первых полуциклах.

Приведенные результаты получены при одинаковых температурах нагружения и разгрузки. В сверхзвуковых полетах деформации $\varepsilon(0)_1$ достигают наибольших величин примерно при максимальной температуре наружной поверхности остекления, а разгрузка происходит при быстром снижении температуры на режиме торможения, что способствует сокращению времени разгрузки и уменьшению скорости восстановления ВЭ деформаций.

«Точки перехода», определяющие окончание релаксации при разгрузке, представим в виде разностей деформаций:

$$\Delta\varepsilon_{П\,1,2} = \varepsilon_{П\,1,2} - \varepsilon(0)_{1,2},$$

где $\varepsilon_{П\,1,2}$ – значение деформации при разгрузке в соответствующем полуцикле нагружения, при котором заканчивается релаксация и начинается восстановление ВЭ деформаций.

На рис. 4,*б* показано изменение $\Delta\varepsilon_{П\,1}$ с ростом температуры, полученное при разгрузке стекла ВОС-2 в первых полуциклах нагружения от различных деформаций $\varepsilon(0)_1$ с разным временем $\tau_в$. Характер изменения значений $\Delta\varepsilon_{П\,1}$ у обоих стекол примерно одинаков: с повышением температуры стекла СО-120 до 105 °С, а стекла ВОС-2 до 90° «точки перехода» соответствуют $\Delta\varepsilon_{П\,1} \approx (0{,}3...0{,}4)\cdot 10^{-3}$. При повышении температуры до $t \le (t_с - 5)$ °С релаксация прекращается раньше при больших значениях $\varepsilon_{П\,1}$, а при $t \approx t_с$ релаксации практически не происходит, так как восстановление ВЭ деформаций начинается одновременно с началом разгрузки независимо от величин $\varepsilon(0)_1$ и времени $\tau_в$.

Во вторых полуциклах при разгрузке релаксация в обоих стеклах продолжается до меньших значений деформаций $\varepsilon_{П\,2}$, что сокращает время восстановления ВЭ деформаций. В диапазонах температуры 20...90 °С (СО-120) и 20...130 °С (ВОС-2) характер изменения величин $\Delta\varepsilon_{П\,2}$ остается таким же, как в первых полуциклах.

В проведенных экспериментах в основном подтвердились ранее полученные зависимости для линейных полимеров при $t = 20...(t_с - 30)$ °С, установлены закономерности поведения ВЭ деформаций в стеклах из линейных и поперечносшитых (с частично сшитой структурой) полимеров при условиях нагружения, близких к нагружению остекления самолетов в эксплуатации во всем диапазоне повышенных рабочих температур вплоть до $t \le (t_с + 30)$ °С. Принципиальных различий в поведении стекол из линейных и поперечносшитых полимеров при рассмотренных условиях нагружения не отмечено.

Полученные данные позволяют доработать методику моделирования результирующих и «остаточных» температурных напряжений [2] в целях повышения точности получаемых результатов, возможности ее применения к изделиям остекления из линейных и поперечносшитых полимеров при температурах вплоть до $t \le (t_с + 30)$ °С.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Харитонов Г.М., Хитрова О.И., Ерасов В.С. и др.** Влияние эксплуатационных условий нагружения на упругопластические характеристики авиационного органического остекления // Авиационная промышленность. № 2. 2006. С. 43–48.

2. **Харитонов Г.М., Хитрова О.И. и др.** Температурные напряжения в авиационном органическом остеклении, работающем в области упругопластических деформаций // Авиационная промышленность. 2007. № 4. С. 53–57.

http://apniat.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРИСТОСТИ УГЛЕПЛАСТИКОВ В АВИАКОНСТРУКЦИЯХ ЛАЗЕРНО-АКУСТИЧЕСКИМ СПОСОБОМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ

***В.В.Мурашов**, докт. техн. наук* (*ФГУП “ВИАМ” ГНЦ РФ*)

Пористость углепластика определяется по корреляционной связи объемного содержания пор с нормированной величиной энергии структурного шума. Относительная погрешность определения пористости углепластика предложенным методом не более ±5 %.

Ключевые слова: пористость, углепластики, ультразвуковой метод отражения, лазерно-акустический способ, корреляционная связь.

DETERMINATION OF THE CFRP POROSITY IN AIRCRAFT STRUCTURES USING LASER-ACOUSTIC MODE OF THE ULTRASONIC INSPECTION. *V.V.Murashov, Dr.Techn.Sc.*

The CFRP porosity is determined by the previously defined correlation between the pores volume content and the standardized energy value of the structural sound. The relative error of the CFRP porosity determination by the suggested method is no more than ±5 %.

Keywords: porosity, carbon fiber reinforced plastics (CFRPs), ultrasound reflection method, laser-acoustic mode, correlation.

Отклонение состава препрега от нормы, нарушение сроков или условий его хранения, несоблюдение режима формования (времени и величины приложенного давления, скорости нагрева) приводит к повышенной пористости углепластиков (УП). Иногда появление повышенной пористости носит случайный характер, и тогда пористость в УП – непредсказуемый фактор.

И акустические, и физико-механические характеристики материала определяются составом и структурой материала, поэтому между ними существует корреляционная связь. Однако теснота корреляционной связи при использовании традиционных параметров диагностики (скорости прохождения и затухания ультразвуковых колебаний) не всегда достаточна для определения степени пористости УП. Поэтому необходимы были принципиально новые информативные параметры диагностики свойств полимерных композиционных материалов (ПКМ), притом такие, которые могут быть определены с высокой точностью и достоверностью непосредственно в детали или конструкции из ПКМ без их разрушения, а также комплексные параметры диагностики для установления более тесных корреляционных связей их с определяемыми характеристиками ПКМ. В ВИАМе были проведены такие исследования и разработки [1, 2].

Для определения пористости УП выбран лазерно-акустический способ ультразвукового метода отражения. Этот метод неразрушающего контроля основан на возбуждении импульсов упругих колебаний в объекте контроля с помощью луча лазера, приеме импульсов, прошедших контролируемый объект и отраженных от поверхности раздела двух сред, отличающихся характеристическими импедансами (от границ объекта контроля или неоднородностей), приеме отраженных импульсов и анализе параметров принятых сигналов.

Для получения мощных широкополосных ультразвуковых импульсов применено лазерное термооптическое возбуждение звука – оптико-акустический эффект [3]. Амплитуда и временная форма (и соответственно частотный спектр) термооптически

http://apniat.ru

возбуждаемого ультразвукового импульса определяется временной зависимостью интенсивности поглощенного лазерного импульса и теплофизическими параметрами поглощающей среды (коэффициентом поглощения света, коэффициентом теплового расширения, тепло- и температуропроводностью). При этом амплитуда термооптически возбуждаемых ультразвуковых импульсов может достигать сотен мегапаскалей в спектральном диапазоне 0,1 – 20 МГц.

Сигнал оптико-акустического генератора частично отражается от верхней поверхности объекта контроля (ОК), а частично входит в него и распространяется в нем в виде продольной волны. Ультразвуковой сигнал, распространяющийся вглубь ОК, доходит до противоположной стороны ОК, отражается и регистрируется приемным преобразователем. Кроме того, при распространении в материале ОК сигнал рассеивается на неоднородностях структуры. Часть этого сигнала, рассеянная в обратном направлении, попадает на приемник и тоже регистрируется с некоторой временной задержкой относительно прихода эталонного сигнала. Время прихода рассеянной волны соответствует определенной глубине залегания структурных неоднородностей в ОК (преимущественно пор). Частотный спектр акустических импульсов (спектральный диапазон 1 – 10 МГц), рассеянных в обратном направлении всей толщиной контролируемой конструкции, несет информацию о неоднородностях структуры в целом, что позволяет проводить контроль материала готовых деталей и конструкций из УП при одностороннем доступе.

Спектр акустического сигнала, рассеянного на неоднородностях структуры, состоит из регулярной (гладкой) и нерегулярной (шумовой) компонент. Гладкая часть определяется спектральной чувствительностью пьезоприемника в акустическом преобразователе и может быть определена сглаживанием реального спектра сигнала. Нерегулярная часть (как и во временной форме акустического сигнала) определяется рассеянием на неоднородностях структуры композита (в первую очередь, порах) и ее полная энергия может служить характеристикой пористости среды.

В ВИАМе разработана методика определения пористости УП лазерно-акустическим способом ультразвукового контроля [4]. В качестве параметра диагностики пористости материала использована полная нормированная энергия шумовой компоненты

$$W_{н} = \frac{\int_{f_{min}}^{f_{max}} \left[S(f) - S_{o}(f)\right]^{2} df}{\int_{f_{min}}^{f_{max}} S_{o}^{2}(f)\, df},$$

где $S(f)$ – спектр импульсов, рассеянных структурой в обратном направлении; $S_0(f)$ – спектр зондирующего импульса; f – частота ультразвуковых колебаний; f_{min} и f_{max} – граничные частоты спектрального диапазона.

Реальный спектр акустического сигнала в образце с большим содержанием пор отличается характерными осцилляциями, определяемыми структурными шумами, связанными с наличием пор (рис. 1). Гладкая кривая получена путем аппроксимации экспериментального спектра.

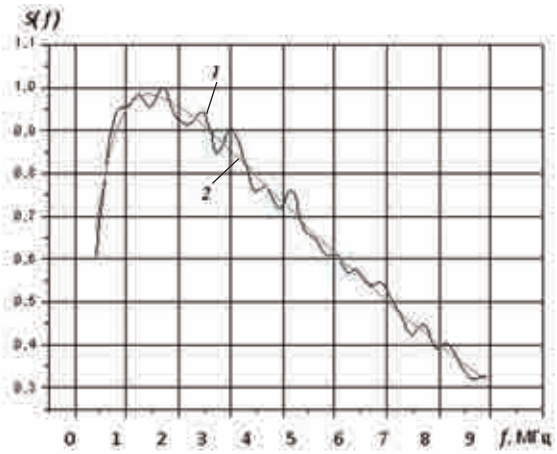


Рис. 1. Амплитудный спектр акустического сигнала в пористом образце из углепластика:
1 – реальный спектр; *2* – сглаженная кривая спектра

Нормированная энергия шумовой компоненты рассеянного в обратном направлении акустического сигнала наилучшим образом коррелирует с пористостью материала, поэтому данная характеристика была выбрана в качестве параметра диагностики. Пористость углепластика определяется по ранее установленной корреляционной связи объемного содержания пор $V_п$ с нормированной величиной энергии $W_н$ структурного шума:

$$V_п = \varphi(W_н).$$

На рис. 2 показана зависимость энергии $W_н$ шумовой компоненты акустического сигнала в относительных единицах, рассеянного в обратном направлении, от объемной пористости материала $V_п$. Между пористостью материала и энергией шумовой компоненты существует довольно тесная корреляционная связь (коэффициент корреляции $R = 0{,}95$), что и позволяет использовать энергию шумовой компоненты в качестве параметра диагностики, определяемого при неразрушающих испытаниях деталей и конструкций из углепластиков. Связь объемной пористости материала с энергией структурного шума определяется выражением $V_п = 290{,}66\, W_н^2 + 0{,}2934\, W_н$.

Относительная погрешность определения предложенным методом пористости углепластика не более ±5 % (погрешность в абсолютных величинах для пористости 2 % не превышает ±0,1 %, то есть результат определения пористости должен находиться в интервале 1,9 – 2,1 %).

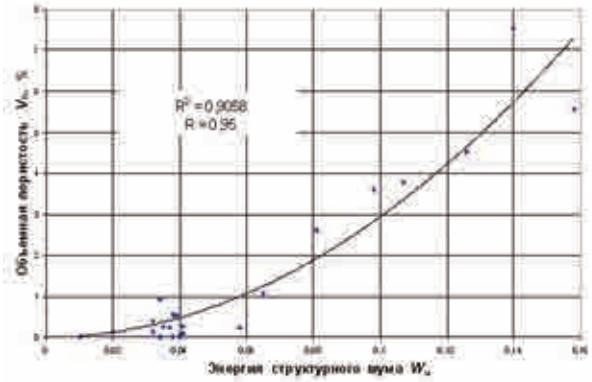


Рис. 2. Корреляционная связь объемного содержания в углепластике ВКУ-17КЭ0,1 с энергией структурного шума

Энергия структурного шума в дефектной области углепластика может на порядок превосходить энергию в бездефектной области. Поэтому производить корректную диагностику пористости в дефектных участках УП не представляется возможным. Следовательно, диагностику УП можно проводить только на тех деталях и конструкциях, которые успешно прошли дефектоскопический контроль, то есть не имеют дефектов типа расслоений, инородных включений и т.п.

Полученная связь пористости с энергией структурного шума в УП с различным содержанием матрицы позволяет по измеренным значениям энергии структурного шума определять пористость и, что особенно важно, низкие ее значения (до десятых долей процента).

Энергия структурного шума $W_н$ определяется для предварительной оценки пористости материала. Если пористость находится в интервале 0 – 1 %, можно переходить к определению содержания армирующего волокна в УП и плотности его в соответствии с установленными корреляционными связями. При пористости материала свыше 1 % возрастает погрешность определения объемного содержания армирующего волокна в УП и плотности его, так как возрастающее количество пор в материале все больше и больше влияет на результаты определения параметра диагностики. При пористости материала свыше 2 % определение содержания волокна и плотности УП по предложенной методике становится некорректным.

Итак, созданное в ВИАМе новое научное направление в диагностике физико-механических свойств и состава ПКМ позволяет определять упругие и прочностные свойства, пористость, плотность, содержание матрицы и наполнителя, степень отверждения матрицы углепластиков в конструкци-

http://apniat.ru

ях планера самолета и других изделиях ответственного назначения лазерно-акустическим способом ультразвукового контроля.

Использование лазерного возбуждения импульсов упругих колебаний длительностью не более 0,05 мкс дает возможность проводить спектральный анализ принятых акустических сигналов в широкой полосе частот от 0,1 МГц до 10 МГц, что позволяет повысить точность и достоверность диагностики свойств и состава ПКМ неразрушающим методом.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пат. 2196982 РФ.** Способ определения физико-механических характеристик и состава полимерных композиционных материалов в конструкциях ультразвуковым методом / Е.Н.Каблов, В.В.Мурашов, А.Ф.Румянцев, Г.М.Гуняев, А.П.Тищенко, М.П.Уральский. Опубл. 20.01.2003. Бюл. № 2.

2. **Пат. 2214590 РФ.** Способ определения физико-механических характеристик полимерных композиционных материалов и устройство для его осуществления / Е.Н.Каблов, Г.М.Гуняев, А.А.Карабутов, В.В.Мурашов, И.М.Пеливанов, Н.Б.Подымова, А.Ф.Румянцев. Опубл. 20.10.2003. Бюл. № 29.

3. **Karabutov A.A., Murashov V.V., Oraevsky A.A., Podymova N.B.** Nondestructive characterization of layered composite materials with a laser optoacoustic sensor // Conf.: Nondestructive Evaluation of Materials and Composites II (San Antonio, Texas, march–april 1998). San Antonio: Published by SPIE – The International Society for Optical Engineering. V. 3396. P. 103–111.

4. **Мурашов В.В., Румянцев А.Ф.** Определение пористости углепластиков лазерно-акустическим способом в авиационных конструкциях // Сб. докл. науч. техн. конф. «Гидроавиасалон–2008« (Геленджик, сент. 2008). М.: ЦАГИ, 2008. Ч. I. С. 287–291.

5. **Мурашов В.В., Румянцев А.Ф., Иванова Г.А., Файзрахманов Н.Г.** Диагностика структуры, состава и свойств полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2008. Вып. 1. С. 17–24.

6. **Мурашов В.В., Румянцев А.Ф.** Диагностика состава и свойств полимерных композитов в деталях и конструкциях // Контроль. Диагностика. 2008. № 8. С. 13–17.

***Уважаемые читатели*!**

Начинается подписка
на журнал «Авиационная промышленность» на 2012 г.

Подписаться на журнал можно в почтовых отделениях России
по каталогу Роспечати и в редакции по счету.

Стоимость годовой подписки **8000 руб.**

Подписной индекс **85240**

Контактный тел.: **(499) 317-86-66**

E-mail: **ap.red@yandex.ru**

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОЙ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В.К.Белов**, докт. техн. наук, **А.Н.Тимофеев
(*ФГУП "СибНИА им. С.А. Чаплыгина"*)

Определены основные параметры коррозионных повреждений, измерения которых необходимы для расчета остаточного ресурса конструкции. Для повышения точности оценки в дополнение к глубине повреждения следует учитывать и площадь повреждения.

Ключевые слова: авиационные конструкции, коррозия, критерий повреждений, ресурс.

ANALYSIS OF THE CORROSIVE DAMAGE CHARACTERISTICS NECESSARY FOR ASSESSMENT OF THE RESIDUAL FATIGUE LIFE OF AIRCRAFT STRUCTURES. *V.K.Belov, Dr.Techn.Sc, A.N.Timofeev.*

Basic parameters of corrosive damages, the measurements of which are necessary for calculation of the residual life of a structure, have been determined. To improve assessment accuracy further to the damage depth, the damage area should be considered.

Keywords: aircraft structures, corrosion, damage criterion, life time.

Требования обеспечения прочности при наличии коррозии, производственных дефектов и случайных повреждений определены современными Нормами летной годности [1].

Выполнение требований Норм возможно лишь при наличии соответствующих методов и средств оценок возможных повреждений. Для каждого элемента конструкции, возможность коррозии которого не исключена, необходимо заранее установить или иметь возможность определить в процессе эксплуатации допустимые пределы коррозии.

Естественным критерием коррозионного состояния по условию прочности авиационных конструкций является ресурсная характеристика – остаточная усталостная или коррозионно-усталостная долговечность, предопределяемая местоположением, видом и размерами повреждения. Решение данной задачи затруднено тем, что кроме учета, присущего явлению усталости рассеяния, необходимо принять во внимание случайный характер коррозии и случайность ее распределения по планеру, в частности из-за возможности повреждения или дефекта защитного покрытия. Случайный характер коррозии проявляется в многообразии видов коррозии и конфигураций повреждений; они могут иметь различную форму в плане, в сечении, различные соотношения глубины и размеров по поверхности.

Экспериментальными исследованиями показано, что для повреждений типа язвенной и расслаивающей коррозий и им подобных, характеризуемых отсутствием начальных для финального усталостного разруше-

ния коррозионных трещин, данную сложность для практических приложений можно устранить, применяя обобщающие конфигурационные характеристики повреждения [2]. Рассмотрим правомерность данного подхода, анализируя напряженно-деформированное состояние (НДС) зон повреждений и результаты дополнительно поставленных экспериментов. Анализ НДС проводился методом конечных элементов.

Практически все случаи одиночных коррозионных повреждений реальных конструкций можно рассматривать как повреждение на поверхности или повреждение на кромке элемента. Расчетные модели повреждений в плоских элементах толщиной δ представлены на рис. 1. Коррозионная язва на поверхности имитировалась поверхностной выемкой в виде среза эллипсоида вращения, кромочная – выемкой на кромке в виде половины аналогичного эллипсоида, характеризуемого глубиной *h*, полушириной на поверхности пластины *a* и длиной в направлении оси образца 2*b*.

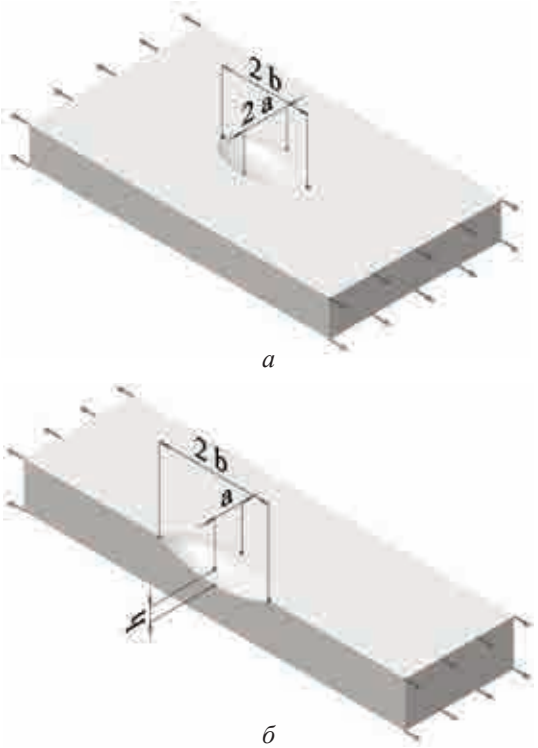


Рис. 1. Модели поверхностной (*а*) и кромочной (*б*) коррозионных язв

Таблица 1

Распределение концентрации напряжений по сечению миделя поверхностной язвы

h	*a*	Тип язвы	Коэффициент концентрации напряжения при относительном расстоянии по контуру язвы					
			0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
0,1	0,2	П	1,88	1,86	1,82	1,76	1,65	1,41
		С	1,75	1,74	1,72	1,71	1,63	1,45
		Э	1,36	1,34	1,33	1,32	1,29	1,23
	0,4	П	1,53	1,51	1,48	1,43	1,36	1,22
		С	1,53	1,52	1,49	1,45	1,39	1,21
		Э	1,22	1,22	1,22	1,21	1,18	1,13
	0,8	П	1,32	1,30	1,29	1,26	1,22	1,14
		С	1,32	1,30	1,28	1,27	1,22	1,14
		Э	1,15	1,15	1,16	1,15	1,14	1,12
0,2	0,4	П	1,95	1,92	1,87	1,81	1,70	1,52
		С	1,82	1,84	1,82	1,77	1,65	1,47
		Э	1,38	1,39	1,39	1,37	1,35	1,29
	0,8	П	1,64	1,61	1,58	1,53	1,45	1,29
		С	1,61	1,60	1,58	1,53	1,45	1,30
		Э	1,30	1,32	1,30	1,28	1,26	1,22
	1,6	П	1,50	1,47	1,45	1,40	1,33	1,24
		С	1,48	1,47	1,45	1,41	1,35	1,20
		Э	1,28	1,28	1,26	1,25	1,23	1,20
0,4	0,8	П	2,16	2,10	2,05	1,98	1,87	1,62
		С	2,06	2,04	2,00	1,96	1,90	1,68
		Э	1,55	1,54	1,52	1,50	1,48	1,45
	1,6	П	2,00	1,96	1,89	1,80	1,70	1,53
		С	2,00	1,97	1,90	1,81	1,71	1,55
		Э	1,52	1,51	1,49	1,46	1,44	1,42
	3,2	П	1,96	1,90	1,83	1,74	1,65	1,52
		С	1,96	1,92	1,85	1,76	1,66	1,52
		Э	1,52	1,50	1,48	1,46	1,43	1,40
0,6	1,2	П	2,45	2,40	2,31	2,22	2,11	1,86
		С	2,36	2,32	2,25	2,19	2,11	1,97
		Э	1,68	1,66	1,63	1,62	1,61	1,63
	2,4	П	2,42	2,35	2,22	2,12	2,00	1,85
		С	2,41	2,36	2,24	2,11	2,01	1,87
		Э	1,68	1,66	1,63	1,60	1,59	1,59
	4,8	П	2,40	2,35	2,25	2,10	1,98	1,85
		С	2,42	2,36	2,24	2,11	1,97	1,85
		Э	1,68	1,66	1,63	1,60	1,59	1,60

Примечания. 1. П – язва типа параболоида вращения; С – сфероид; Э – эллипсоид вращения с удлинением 2.

2. Геометрические характеристики – безразмерные величины, отнесенные к толщине образца.

http://apniat.ru

Удлинение язв определялось как отношение b/a. Рассмотрены величины удлинения 2 и 1, последнее соответствует случаю сфероида. Дополнительно для величины удлинения 1 проведены расчеты для моделей язв типа параболоидов вращения.

Ширина полосы во всех случаях расчетных оценок принималась равной восьмикратной ширине миделя дефекта, длина модельного образца – 3,6 ширины. Полосы подвергались растяжению равномерно по поверхности торца распределенным единичным напряжением.

Были использованы тетраэдральные параболические конечные элементы, всего в расчетной модели содержалось от 8 до 12 тысяч элементов. Материал – изотропный идеально упругий, коэффициент Пуассона 0,33.

В табл. 1 представлены результаты расчетов первого главного напряжения (коэффициента концентрации напряжений) по поперечному сечению миделя поверхностной язвы в зависимости от относительного расстояния от центра по контуру язвы до ее края.

Данные расчетов показывают:

– изменение конфигурации язвы от параболоида к сфероиду при равных глубинах и диаметрах на поверхности мало меняет поле напряжений, при пологих язвах различия практически исчезают;

– максимальную концентрацию напряжений преимущественно определяет относительная глубина язвы, но с увеличением поперечного размера язвы концентрация для не слишком больших глубин существенно снижается и по этой причине глубина как параметр не может одна определять поле напряжений на дефектах разных конфигураций. Ситуация сходна с объемом – при удлинении язвы объем увеличивается, а концентрация напряжений снижается.

Аналогичные расчеты были сделаны и для случаев кромочных повреждений – распределения напряжений имели незначительные расхождения с данными табл. 1 для поверхностных язв.

Экспериментальные исследования усталостной долговечности расчетных моделей выполнили испытаниями образцов двух типов, показанных на рис. 1 с центральным или кромочным положениями повреждения, отнулевым циклическим растяжением.

Методики моделирования коррозионных повреждений, испытаний и обработки результатов, а также типовые виды язв приведены в работах [2–4]. Исследования сопротивления усталости алюминиевых сплавов с коррозией проводились на образцах, аналогичных показанным на рис. 1, с отнулевым циклическим растяжением. Испытывались две партии образцов. Материал первой партии – штамповка сплава В95пчТ2, вторая партия образцов была получена фрезерованием плиты того же сплава до нужной толщины.

Удлинения язв находились в диапазоне от 0,8 до 2, толщина образцов изменялась от 1,8 до 4 мм.

На рис. 2 представлены результаты испытаний – зависимости циклической долговечности N по моменту образования трещины от относительной площади сечения язвы $f = F/\delta^2$, где F – площадь миделя язвы, для трех уровней максимального брутто-напряжения отнулевого цикла σ_{max}.

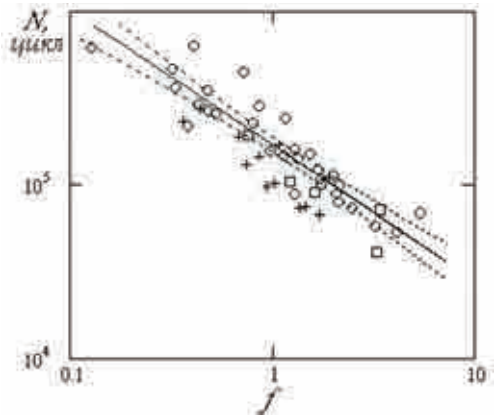
Металл с повреждением в условиях циклического нагружения сохраняет значительную долю несущей способности, с увеличением размеров язвы долговечность монотонно снижается. Несмотря на значительные различия в конфигурации и неровности поверхности язв, разброс результатов относительно невелик и позволяет уверенно выделить влияние уровня циклических нагрузок.

Линии регрессии можно представить в виде

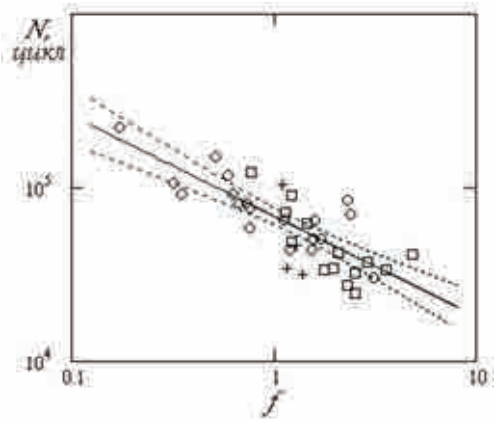
$$\log N + z_j \log f = \log Q_j,$$

где z_j и Q_j – параметры линий регрессии,

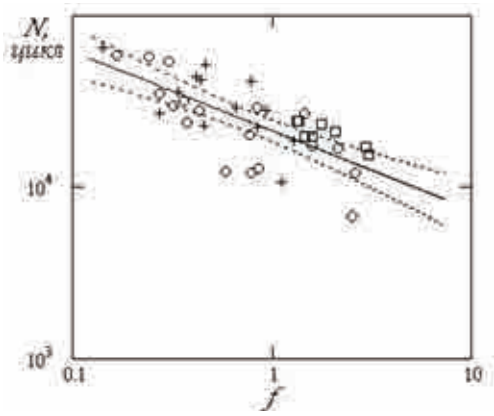
http://apniat.ru



а



б



в

○, □ – повреждение на поверхности штамповки и фрезерованной плиты;
+ – повреждение на кромке;
- - - - — границы 95 %-ной доверительной области

Рис. 1. Результаты усталостных испытаний сплава В95пчТ2 при σ_{max} = 98 (*а*), 132 (*б*), 176 (*в*) МПа

j определяет уровень (случай) циклических напряжений в испытаниях.

Подобные по виду зависимости получаются при использовании в качестве определяющего параметра и ряда других геометрических характеристик повреждения, в частности, относительной глубины или объема корродированного металла [5].

Применение безразмерной величины *f* позволяет строить единые линии регрессии для полос различных толщин. Результаты испытаний двух полуфабрикатов практически совпадают.

Для кромочных язв, представляющих половину соответствующих центральных, в качестве параметра приняли удвоенную фактическую относительную площадь. Результаты (как и следовало ожидать в соответствии с анализом НДС) показывали наличие единой регрессионной зависимости для обоих видов повреждений.

В сложившейся практике [6–9] коррозионное повреждение принято оценивать относительной глубиной проникновения коррозии. Такой подход, исходя из результатов анализа НДС, имеет веские основания, так как параметр «глубина» в значительной степени определяет концентрацию напряжений в дефектах. Преимущество первого или второго параметра повреждения по результатам эксперимента определяем величиной коэффициента корреляции между значениями параметра и соответствующими им циклическими долговечностями образцов (табл. 2). Параметр *f* имеет существенно более сильную связь с долговечностью.

В работе [3] представлены результаты специальных экспериментов с варьированием формы модельных повреждений, когда

Таблица 2

Коэффициенты корреляции для поверхностных и кромочных язв в плоских образцах сплава В95пчТ2

σ_{max}, МПа	Коэффициенты корреляции при			
	поверхностной язве		язве на кромке	
	f	*h*	*f*	*h*
98	–0,92	–0,88	–0,85	–0,70
132	–0,80	–0,50	–0,70	–0,23
176	–0,86	–0,82	–0,72	–0,64

http://apniat.ru

применение данного параметра дает существенное улучшение оценки. Более высокое значение коэффициента корреляции между циклической долговечностью и площадью сечения питтинга в сравнении с глубиной отмечено и в работе [8]. Однако параметры «относительная глубина», «объем» и «относительная площадь сечения» по результатам экспериментов с простейшими моделями язв часто практически равноценны [2, 5].

Данный факт имеет простое объяснение: для исчерпывающей характеристики геометрически правильных трехмерных тел типа параболоидов вращения или сфероидов необходимы, учитывая симметрию, два независимых измерения [3, 4]. Условие конфигурационного подобия снимает необходимость определения относительной площади сечения. Глубина язвы однозначно определяет и площадь сечения миделя, и объем, и другие возможные характеристики. Небольшие отклонения конфигураций модельных язв, как показывают расчеты НДС, в условиях естественного усталостного рассеяния долговечности не могут иметь существенного влияния на результаты испытаний и потому параметры «глубина», «площадь сечения миделя», «объем (масса)» или любой другой параметр, характеризующий размеры дефекта, оказываются на практике эквивалентными. Однако диаметром по поверхности $2a$ (см. рис. 1) мера повреждения определяется хуже, так как края язвы на поверхности обычно растравлены, потому невозможно точно определить сам объект измерения. Для характеристик язв с существенным различием конфигураций одного измерения, естественно, недостаточно.

Улучшение корреляции с циклической долговечностью для язв более произвольной формы, включая и вытянутые в плане, при применении параметра «относительная площадь сечения» можно объяснить с общих позиций статистических теорий усталости [10, 11]: с увеличением ширины неглубоких язв максимум концентрации напряжений несколько снижается, но в противовес этому объем сильно напряженного металла растет пропорционального ширине, что в какой-то мере компенсирует снижение первого фактора. Аналогичен механизм взаимокомпенсации противодействующих факторов при удлинении язвы: здесь объем напряженного металла возрастает с удлинением. Однако с увеличением глубины язв изменения концентрации становятся все менее зависимыми от ширины и удлинения.

Таким образом, очевидна необходимость наличия в определяющем циклическую долговечность параметре язвы, по меньшей мере, двух составляющих: глубины и некоей протяженности максимально нагруженной зоны по сечению. Данная условная «ширина» язвы, учитывая небольшое снижение концентрации к краю, должна быть меньше длины контура. Для негладкого, изрезанного рельефа язвы определение линии такого идеализированного контура представляет большую сложность и предопределяет субъективизм оценки. Применение в качестве параметра площади сечения, для идеального параболоида составляющей 2/3 произведения глубины на диаметр по поверхности и для реальных конфигураций, площадь которых можно измерить с практически необходимой точностью, представляется допустимым компромиссом между необходимым в теории и возможным на практике. Работоспособность такого предложения подтверждается результатами всех испытаний.

Наилучшим по точности и надежности параметром, определяющим циклическую долговечность металла с коррозией, является относительная площадь сечения миделя коррозионного дефекта. Зависимости циклической долговечности от данного параметра можно рассматривать как характеристику материала и применять для расчетных оценок долговечности как для поверхностных, так и кромочных повреждений.

http://apniat.ru

ЛИТЕРАТУРА

1. **Авиационные правила.** Часть 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории. М.: МАК, 2004.

2. **Дубинин В.В., Тимофеев А.Н., Паулова Л.П.** К вопросу оценки допустимой величины локальных коррозионных поражений в регулярных зонах силовой конструкции // Вопросы авиационной науки и техники. Сер. Аэродинамика и прочность летательных аппаратов. Вып. 1: Сопротивление усталости и живучесть авиационных конструкций. Новосибирск: ОНТИ СибНИА, 1991. С. 136–142.

3. **Тимофеев А.Н.** Критерии коррозионного состояния авиационных конструкций // Научный вестник НГТУ. 2008. № 4. С. 141–154.

4. **Тимофеев А.Н., Корелина О.В.** Резервы работоспособности конструкций авиационной техники с коррозионными повреждениями // Авиационная промышленность. 2010. № 3. С. 43–49.

5. **Зубарев А.П., Лапаев А.В., Лапаев В.П.** Использование обобщенного параметра коррозионного поражения для оценки долговечности элементов конструкций с коррозионными поражениями // Научный вестник МГТУ ГА. 2007. № 119. С. 30–32.

6. **ОСТ 1 02506–84.** Лопатки компрессоров авиационных газотурбинных двигателей Использование лопаток, поврежденных коррозией.

7. **ОСТ 1 02569–85.** Двигатели газотурбинные. Методы расчета пределов выносливости деталей.

8. **Birt E.A., Nelson L.J., Brown K., Jones L.D. et al.** Correlation of fatigue life with potential NDE corrosion metrics // Insight. 2007. Vol. 49. № 7. P. 402–408.

9. **Акопян К.Э., Бутушин С.В., Гришин А.Н., Лапаев А.В., Семин А.В., Шапкин В.С.** Теория и практика оценки коррозионных повреждений элементов конструкции планера воздушных судов. М.: ЗАО «Научный центр по поддержанию летной годности воздушных судов ГосНИИ ГА», 2010. 288 с.

10. **Афанасьев Н.Н.** Статистическая теория усталостной прочности металлов. Киев: Изд-во АН УССР, 1953. 128 с.

11. **Когаев В.П.** Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. М.: Машиностроение, 1977. 232 с.

ПРОЧНОСТЬ ЗАМКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

А.Н.Петухов**, докт. техн. наук, **Ю.И.Павлов**, канд. техн. наук, **Хаинг Мин
(*“МАТИ” – РГТУ им. К.Э. Циолковского*)

Рассмотрены особенности разрушений замковых соединений лопаток компрессора при циклическом нагружении. Освещены вопросы сопротивления малоцикловой усталости замков лопаток при повышенных температурах.

Ключевые слова: прочность, лопатки компрессора, замковые соединения, малоцикловая усталость.

THE STRENGTH OF INTERLOCKING JOINTS OF COMPRESSOR BLADES UNDER CYCLIC LOADING. *A.N.Petuhov, Dr.Techn.Sc, Yu.I.Pavlov, Cand.Techn.Sc, Khaing Min.*

Destruction characteristics of the interlocking joints of compressor blades under cyclic loading are examined. Problems of resistance of the blade interlocks to low-cycle fatigue at elevated temperatures are discussed.

Keywords: strength, compressor blade, interlock, low-cycle fatigue.

Увеличение ресурса двигателей до $10\cdot10^3 \div 50\cdot10^3$ ч сопровождается ростом числа циклов нагружения лопаток в процессе эксплуатации. Поэтому задача стендовых циклических испытаний – выявить слабые места конструкции и определить параметры основных процессов разрушения, ответственных за несущую способность этого узла [1], в частности сопротивление малоцикловой усталости замковых соединений.

Авторы исследовали замковые соединения из сплава ВТ8 при циклическом нагру-

http://apniat.ru

жении отнулевым циклом растяжения. Испытания проводились также после наработки более $5 \cdot 10^7$ циклов при температуре $T_{исп}$ 20 – 450 °С и частоте 0,1 Гц. Так как при эксплуатации ГТД процессы повреждения замковых соединений от малоцикловой или многоцикловой усталости на различных режимах могут чередоваться, часть соединений перед испытаниями на малоцикловую усталость была испытана в условиях симметричного изгиба при одновременном воздействии осевой статической составляющей. Повышенные вибрационные нагрузки от резонансных или срывных и т.п. колебаний лопаток чаще наблюдаются на переходных частотах вращения ротора. Вызванные ими повреждения в замковом соединении могут затем либо получить развитие на других режимах, либо законсервироваться до повторного выхода на эти режимы.

Полученные результаты показывают, что минимальная долговечность при нормальной температуре характерна для замковых соединений без защитных покрытий или покрытых ВАП (рис. 1). Покрытие серебром увеличивает долговечность в 1,5÷2 раза, так как оно обладает более низким коэффициентом трения. Вследствие этого увеличиваются амплитуды относительных перемещений между хвостовиком лопатки и диском, интенсифицируются процессы абразивного износа в зоне контакта, залечивающие повреждения от фреттинга. Аналогичные явления наблюдаются и при испытаниях замковых соединений на многоцикловую усталость.

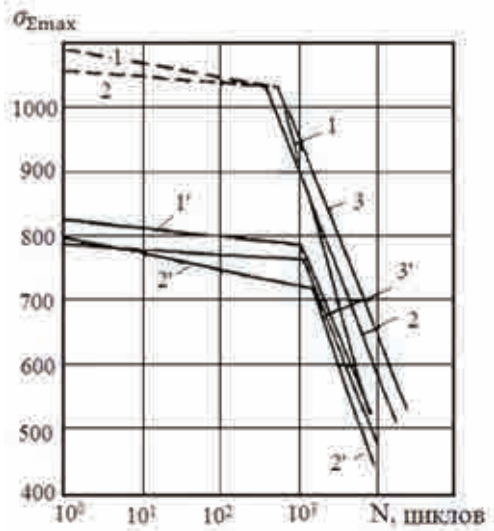


Рис. 1. Кривые малоцикловой усталости замковых соединений (*1*, *2*, *3* при $T_{исп}$ = 20 °С; *1'*, *2'*, *3'* при $T_{исп}$ = 450 °С):
1 и *1'* – покрытие ВАП; *2* и *2'* – покрытие серебром; *3* и *3'* – ультразвуковое упрочнение, покрытие ВАПЗ

При напряжениях испытания $\sigma_{\Sigma max}$ менее 600 МПа долговечность составляет более $2 \cdot 10^3$ циклов. Эффективность поверхностного упрочнения ультразвуком сохраняется при $T_{исп}$ = 450 °С [2].

Влияние на сопротивление малоцикловой усталости при повышенных температурах в диапазоне долговечности до 10^4 циклов проявляется и в резком снижении $\sigma_{\Sigma max}$ (на 40 % при $T_{исп}$ = 450 °С). У хвостовиков, упрочненных ультразвуком (УЗУ), отмечается снижение прочности при $T_{исп}$ = 300 °С, что вызвано процессами разупрочнения пластически деформированного слоя. Однако при $\sigma_{\Sigma max}$ = 600 МПа и долговечности более 10^3 циклов в исследованном диапазоне долговечность упрочненных хвостовиков увеличивается. При температуре 450 °С минимальная долговечность отмечается при напряжениях менее 700 МПа у замковых соединений, покрытых серебром.

Выдержки при $\sigma_{\Sigma max}$ в течение 300 – 600 с сопровождаются снижением сопротивления малоцикловой усталости при долговечности до 10^3 циклов. Максимальное снижение прочности (около 10 %) отмечается при нормальной температуре у хвостовиков, упрочненных УЗУ, по сравнению с 5 %-ным снижением прочности при 450 °С. Выдержки при $\sigma_{\Sigma max}$ не оказывали влияния на прочность хвостовиков, покрытых серебром, а влияния на долговечность длительности выдержек в 300 или 600 с не обнаружено при всех исследованных вариантах.

Предварительные испытания показали, что многоцикловая усталость замковых со-

http://apniat.ru

единений оказывает наибольшее влияние на циклическую долговечность упрочненных хвостовиков. Долговечность их в результате повреждения контактной площадки фреттинг-коррозией уменьшалась и при $\sigma_{\Sigma max} < 900$ МПа примерно в 1,5 – 2 раза.

В механизме повреждения фреттинг-коррозией титановых сплавов отсутствует принцип суперпозиции.

Анализируя разрушения замковых соединений при МЦУ, можно выделить три слабых звена, определяющих несущую способность соединения:

– выступ диска в зоне концентрации напряжений – радиус перехода от контактной грани ко дну паза;

– хвостовик в зоне интенсивного повреждения фреттинг-коррозией площадки контакта с выступом диска;

– хвостовик в зоне радиуса перехода от ножки к хвостовику.

Обобщенная кривая малоцикловой усталости показана на рис. 2.

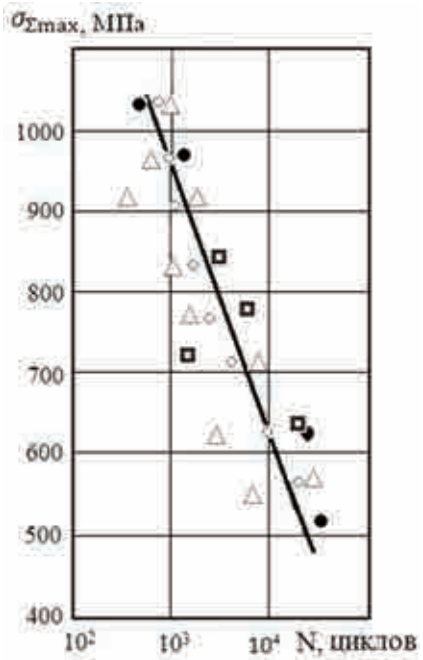


Рис. 2. Обобщенная кривая малоцикловой усталости замковых соединений:
△ – разрушение по контактной грани лопатки; □ – разрушение выступа диска; • – разрушение по ножке лопатки; ○ – среднее значение долговечности

Разрушение выступа диска (теоретический коэффициент концентрации напряжений α_σ равен 3,0) происходило только при нормальной температуре в широком диапазоне напряжений 900 – 600 МПа при долговечности N, равной $10^3 - 10^4$ циклов, и в случаях, когда площадки контакта хвостовиков имели покрытия или были упрочнены. В изломах выступов диска отмечались характерные для МЦУ признаки.

Преобладающими для всех замковых соединений были разрушения по контактным граням хвостовиков ($K_\sigma^{фр} \geq 3{,}5$). Они наблюдались во всем диапазоне $\sigma_{\Sigma max}$ при долговечности $N \geq 5 \cdot 10^2$ циклов. Разрушение начиналось от поврежденной фреттинг-коррозией поверхности, основная трещина усталости распространялась по нормали к поверхности контакта, а затем по траектории действия главных максимальных напряжений. При долговечности около 10^4 циклов одновременно возможны оба вида разрушений (см. рис. 2).

Разрушение по радиусу перехода от ножки к хвостовику ($\alpha_\sigma = 1{,}5...2{,}0$) возникало при $N > 5 \cdot 10^2$ циклов и чаще при повышенных температурах. При однократном нагружении срезались площадки контакта.

Кривую малоцикловой усталости для замкового соединения (см. рис. 2) можно рассматривать как кривую равновероятностного разрушения узла по слабым звеньям: уменьшение вероятности разрушения от фреттинг-усталости повышает вероятность разрушения межпазового выступа или ножки от геометрического концентратора напряжений, но долговечность соединения в целом не увеличивается.

При проведении технологических и конструкторских работ, направленных на повышение несущей способности замкового соединения и надежности конструкции, необходимо учитывать геометрические (концентраторы напряжений) и эксплуата-

ционные слабые звенья узла, возникающие от повреждения фреттинг-коррозией.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Петухов А.Н.** Сопротивление усталости деталей ГТД. М.: Машиностроение, 1993. 229 с.

2. **Петухов А.Н.** Механизм фреттинга и фреттинг-усталость высоконагруженных и малоподвижных соединений ГТД и ЭУ. М.: ЦИАМ, 2008. 204 с.

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

К ВОПРОСУ О СТРАТЕГИЧЕСКОМ РАЗВИТИИ КРУПНОГО ОБОРОННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

А.И.Пекарш, *канд. техн. наук,* ***А.В.Климов*** (*Комсомольское-на-Амуре авиационное производственное объединение им. Ю.А. Гагарина*)

Рассмотрены научно-практические подходы к разработке стратегии развития крупного предприятия оборонно-промышленного комплекса в условиях экономической нестабильности.

Ключевые слова: стратегическое планирование, портфель заказов, оборонно-промышленный комплекс, маркетинговая стратегия, государственный оборонный заказ.

ON STRATEGIC DEVELOPMENT OF A LARGE DEFENCE ENTERPRISE UNDER INSTABILITY OF EXTERNAL ENVIRONMENT. *A.I.Pekarsh, Cand.Techn.Sc, A.V.Klimov.*

Theoretical and practical approaches to working out a strategy for development of a large enterprise of defense industry complex under conditions of economic instability are considered.

Keywords: strategic planning, backlog of orders, defense industry complex, marketing strategy, state defense order.

Одна из причин нестабильного характера экономических процессов, свойственных рыночным отношениям, – жесткая конкуренция на всех уровнях экономической системы. В условиях неравномерности экономического развития отдельных стран и регионов это вызывает кризисы, большая часть которых имеет циклический характер. Главным уроком кризиса 2008 – 2009 гг. стала необходимость изменения научно-практических подходов к разработке стратегии развития каждого крупного оборонного предприятия по основным направлениям.

Существенное расширение горизонта планирования развития предприятий

Необходимость расширения горизонта планирования проиллюстрируем на примере ОАО «Комсомольское-на-Амуре авиационного производственного объединения им. Ю.А. Гагарина» (КнААПО). В настоящее время наблюдается тенденция увеличения продолжительности выпуска самолетов, обусловленная повышением сложности выпускаемой продукции со стремлением предприятия к максимальному использованию создаваемых технологических заделов.

Такая тенденция показывает усиление роли стратегического планирования, поскольку для крупного предприятия существенно возрастают затраты на освоение производства, которые необходимо окупить путем продажи готовой продукции. Следовательно, ошибки целеполагания, обусловливающие невыполнение маркетинговых планов, могут привести к катастрофическим для предприятия последствиям.

В ОАО «КнААПО» планирование осуществляется на различные перспективы. Планы *стратегического уровня* связаны с выполнением проекта по созданию самолета пятого поколения – перспективного авиационного комплекса фронтовой авиации (ПАК ФА), а также с программой создания регионального самолета «Сухой Суперджет-100» (SSJ-100). Планы *среднесрочного уровня* предполагают создание семейства боевых самолетов Су-35 (Су-35С – при поставках на экспорт). Программа рассчитана до 2015 г.

Планы *краткосрочного уровня* учитывают выпуск в рамках государственного оборонного заказа (для МО РФ) одноместного многоцелевого истребителя Су-27СМ; поставку на экспорт многоцелевого истребителя – двухместного Су-30МК2; ремонт и модернизацию истребителей Су-33 (корабельного базирования), состоящих на вооружении ВМФ МО РФ.

Стратегическое планирование должно охватывать весь жизненный цикл продукции и обеспечивать своевременность подготовки производства к выпуску продукции к тому моменту, когда на нее возникнет спрос на рынке.

Реализация стратегии развития предприятия через управление портфелем заказов

В отечественной практике формирование портфеля заказов обычно осуществляется при планировании работы предприятия. В качестве основного критерия оптимизации портфеля заказов используется максимум размера прибыли. Структура портфеля заказов не однородна и должна учитывать номенклатуру продукции, создаваемую по ГЗ; гражданского назначения, которая производится в рамках реализации маркетинговой стратегии предприятия; военного назначения, создаваемую на основе заключенных экспортных контрактов в рамках военно-технического сотрудничества РФ с иностранными государствами и др.

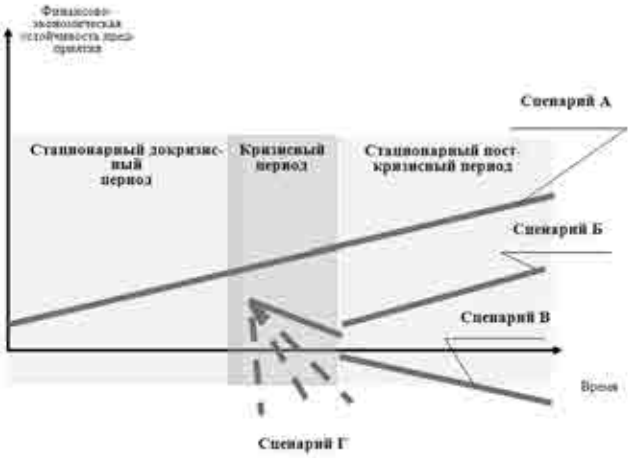
Итак, чтобы возложить на портфель заказов функции обеспечения стабильности предприятия на стратегическую перспективу, необходимо при его формировании учитывать риски стратегического характера.

Учет рисков стратегического характера при формировании стратегии развития крупного оборонного предприятия

Практика показывает, что в течение всего срока, на который составляется стратегический план, на предприятие будут воздействовать различные дестабилизирующие факторы. В последние годы обозначилась необходимость учета стратегических рисков: риски потенциала развития предприятия, определяемого составом портфеля заказов; риски разрывов процесса ресурсного обеспечения; риски различного рода диспропорций в развитии предприятия; риски ошибок стратегического управления, в том числе в части целеполагания; риски невозможности достижения стратегических целей. Обобщить эти риски можно, рассмотрев типовые сценарии развития предприятий в условиях последнего кризиса (см. рисунок) [6–8].

Сценарий **А** – наиболее благополучный вариант развития ситуации, характеризуемый фактически полным отсутствием воздействия кризиса на развитие предприятия. Приемлемым является и сценарий **Б** – кратковременное снижение темпов развития во

http://apniat.ru



Возможные сценарии развития крупного предприятия в условиях нестабильности внешней экономической среды

время кризиса с последующим восстановлением положительной динамики. Из неблагополучных самым критичным является сценарий **Г**, который характеризуется интенсивной дестабилизацией предприятия, вплоть до банкротства или распада на более мелкие, с последующим поглощением другими компаниями и, как правило, неизбежной сменой собственника. Сценарий **В** менее опасен, дает возможность в посткризисный период выполнить возложенную на предприятие миссию, хотя и в меньшем объеме.

Необходимость учета стратегических рисков особенно наглядно проявилась в последние годы. Большие издержки экономики в кризисный период обусловили многочисленные попытки построения моделей, которые помогли бы распознать нарастание предкризисных явлений и дали бы экономистам время на их преодоление. В мировой экономической литературе описываются различные способы построения системы индикаторов-предвестников, однако в РФ эта система имеет свои особенности, определяемые спецификой развития финансового рынка в переходной экономике [1–5]. Возможность массовых сбоев из-за дестабилизации экономической среды с относительно высокой долей достоверности можно оценить только на коротком, а не на стратегическом интервале времени. Однако обойтись без долгосрочного планирования для экономически инерционных крупных оборонных предприятий нельзя. Отсюда вытекает необходимость поиска таких вариантов развития крупного оборонного предприятия, которые бы сводили к минимуму риск его развития по сценарию **Г**.

Создание условий для повышения оперативности реагирования предприятий на резкое изменение запросов рынка

Несмотря на большое количество научных публикаций по вопросам управления потенциалом предприятия, в отечественной экономической науке еще не решены многие проблемы. Открытыми остаются вопросы формирования обратных связей между стратегическими целями предприятия и уровнем потенциала развития; преобладание в методиках оценки уровня потенциала предприятия традиционных факторов производства; отсутствие комплексного подхода к оценке и развитию по-тенциала; аддитивный подход к оценке возможностей наличных ресурсов, составляющих экономический потенциал предприятия. Модели оценки уровня потенциала предприятия ограничиваются качественными характеристиками продукции, ее стоимостными параметрами, в то же время необходимо учитывать более актуальные составляющие потенциалов, в том числе интеллектуального, научно-технического, производственно-технологического, информационного, инновационного и инвестиционного.

Поскольку планы развития предприятий стратегического уровня должны формироваться в зависимости от уровня потенциалов, стратегический портфель заказов следует наполнять таким образом, чтобы обеспечивать непрерывный рост главных потенциалов. В свою очередь, высокий общий по-

http://apniat.ru

тенциал предприятия позволяет быстрее реагировать на изменение ситуации на традиционных для предприятия рынках и осуществлять экспансию на новые, что особенно важно в условиях динамично меняющейся экономической обстановки.

Таким образом, новая ситуация, возникшая на рынке вследствие кризиса, потребовала от менеджмента поиска новых решений. Следствием этого стало перераспределение портфелей заказов предприятий в сторону снижения доли высокодоходных, но высокорисковых проектов. Предприятия крупного бизнеса стали более консервативными и сдержанными в выборе направлений дальнейшего развития – стратегия бурного экстенсивного роста на заемные деньги сменилась стратегией роста эффективности.

Следовательно, при формировании долгосрочных стратегий $S^*_{дс}$ должны ставиться цели, которые вытекают из рассмотренных выше направлений развития крупных оборонных предприятий.

Общая задача формально остается стандартной:

$$S^*_{дс} = S_{дс}\{M_{гз}, M_{гп}, M_{втс}, M_{мз}, t\} \to \text{opt},$$

где $M_{гз}$ – множество работ, выполняемых в рамках государственного заказа; $M_{гп}$ – множество образцов продукции гражданского назначения, создаваемой в интересах завоевания и удержания соответствующих ниш рынка; $M_{втс}$ – множество образцов продукции военного назначения, предназначенных для продвижения на мировой рынок вооружения в рамках военно-технического сотрудничества РФ с иностранными государствами; $M_{мз}$ – множество работ, предполагаемых для выполнения по муниципальным заказам; t – время выполнения работ.

Смысл оптимизации заключается в том, чтобы путем варьирования заказов в стратегическом портфеле обеспечить достижение основных целей развития крупного оборонного предприятия, в данном случае выступающих в роли критериев оптимизации:

1. Вероятность наступления события, заключающегося в развитии ситуации по сценарию **Г** (банкротство предприятия) в стратегической перспективе должна быть минимальной:

$$P(Г) \to \min.$$

2. Прирост потенциала развития предприятия при выполнении соответствующего множества работ j должен быть неубывающей функцией на всем периоде стратегического планирования:

$$\sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{J}(П^j_{p(t)} - П^j_{p(t-1)}) \rangle 0.$$

3. При функционировании оборонного предприятия должны обеспечиваться интересы $Ц$ стратегических инвесторов:

$$\|Ц_i\| \rangle \|Ц_i^{доп}\|.$$

Экономическая сущность решения задачи в такой постановке заключается в том, что каждая из типовых категорий работ имеет различную прибыльность и риски для предприятий:

– коммерческие заказы гражданской продукции достаточно выгодны в стабильных экономических условиях, но их объем в условиях кризиса может резко сократиться, поставив предприятие на грань выживания;

– оборонные заказы не дают значительной экономической выгоды в стабильных экономических условиях, однако способны сохранить предприятие в условиях кризиса;

– экспортные контракты в сфере ВТС выгодны как в условиях стабильного экономического развития, так и во время кризиса, однако их объем может резко сократиться в посткризисный период;

– муниципальные заказы имеют незначительный экономический потенциал, но зато позволяют получить селективную поддержку со стороны регионов, где размещены предприятия, при возникновении несущественных флуктуаций экономической среды.

http://apniat.ru

Следовательно, варьируя соотношение этих видов работ, можно оптимизировать стратегию развития крупного оборонного предприятия таким образом, чтобы соблюсти требования оптимальности. Именно это отличает постановку задачи в таком виде от типовых, среди которых при стратегическом планировании развития предприятий основной считается максимизация стоимости бизнеса. Главное заключается в следующем: минимизация стратегических рисков (наиболее опасным является банкротство предприятия) путем формирования портфеля заказов, который оптимальным образом сочетает высокий экономический потенциал выпуска продукции гражданского назначения и военно-технического сотрудничества с надежностью предприятия, обеспечиваемой государственной поддержкой при выполнении государственного заказа.

В основу решения этой задачи целесообразно положить дополнение традиционной связки критериев «доходность и риск реализации» еще одним, характеризующим вклад каждой работы в обеспечение стабильности функционирования предприятия на стратегическом интервале времени. У менеджмента появится реальная возможность снизить зависимость от влияния различного рода кризисов и встать на реальный инновационный путь развития предприятий. Кроме того, это позволит постепенно перейти от маркетинговой стратегии, ориентированной на текущие запросы рынка, к активной маркетинговой стратегии, направленной на формирование запросов со стороны рынка на высокотехнологичную продукцию и их удовлетворение предприятием.

Особую актуальность оптимизационная задача такого рода имеет для крупных предприятий, ориентированных на выпуск финальных образцов продукции, поскольку, в отличие от предприятий среднего и малого бизнеса, у них меньше возможностей для маневра в плане выпускаемой продукции и быстрой переориентации на другие товарные рынки, чтобы оперативно реагировать на изменение экономической конъюнктуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Школин А., Анищук Н., Золотая А., Шевель О.** Журнал «Финанс.» № 35 (366) 27.09– 03.10.2010 г.

2. Россия в цифрах 2010. Краткий статистический сборник. М.: Федеральная служба государственной статистики, 2010.

3. **Литовкин В.** Двадцать триллионов на десять лет: Владимир Поповкин «разоткровенничался» в Фарнборо. Интерфакс от 23.07.2010 г.

4. **Костин А.Н., Завьялов Г.В.** Условия и признаки банкротства предприятий. Орел: КРУ ЗАО «ОРЛЭКС», 2002.

5. **Бабкин Г.В., Климов А.В.** Рациональная диверсификация портфеля заказов крупного оборонного предприятия как основа формирования его маркетинговой стратегии. М.: ЦВНИ, 2010.

6. Статистический ежегодник 2010. Статистический сборник. М.: Федеральная служба государственной статистики, 2010.

7. Оценка антикризисных мер по поддержке реального сектора российской экономики. М.: Государственный университет – Высшая школа экономики, 2009.

8. Российский военно-промышленный комплекс. Дайджест материалов прессы (21 – 25 марта 2011 г.). М.: Информационное агентство ТС ВПК, 2011.

ОСНОВЫ КОНЦЕПТУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЕДИНИЧНЫМ И МЕЛКОСЕРИЙНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ АВИААГРЕГАТОВ

***И.В.Прилепский**, канд. техн. наук* (*Самарское предприятие ОАО “Авиа-агрегат”*), ***А.А.Миненков**, канд. техн. наук* (*ОАО “Национальный институт авиационных технологий”*)

Разработана основа концептуального моделирования комплексной информационной системы предприятия. Концепция является основой для разработки организующих документов функционирования КИС, технических заданий на внедрение функциональных модулей.

Ключевые слова: авиационные агрегаты, информационная система, единое пространство, структурный модуль, функциональный модуль.

THE FUNDAMENTALS OF CONCEPTUAL MODELING OF AN INTEGRATED DATA SYSTEM FOR CONTROLLING SINGLE-PIECE AND SMALL BRANCH PRODUCTION OF AVIATION COMPONENTS. *I.V.Prilepskiy, Cand.Techn.Sc, A.A.Minenkov, Cand.Techn.Sc.*

A basis for conceptual modeling of a plant integrated data system has been worked out. The concept is a foundation for development of the regulations on the IDS units operation, technical assignments for introduction of the IDS functional modules.

Keywords: aviation components, data system, common (information) space, structural module, functional module.

На современном уровне развития производства необходимо комплексное обеспечение информацией всех подразделений предприятия на всех уровнях. Сущность комплексного подхода к информатизации заключается в том, чтобы учесть все процессы, выполнение рутинных операций и временные затраты на их поддержку, возможности их автоматизации и перевода на информационную платформу. Комплексная информатизация и автоматизация бизнес-процессов управления производством обеспечит повышение качества и снижение себестоимости изготовления высокотехнологичной продукции при частой сменяемости изделий в производстве, разнообразии и сложности технологических процессов, непрерывном повышении требований к надежности и ресурсу изделий. По сути, комплексная информационная система (КИС) рассматривается в качестве замещающего звена управления.

Практика структурной организации и информатизации производственных процессов при решении сложных задач и расширении сферы применения автоматизированных систем управления доказывает необходимость интеграции управляющих решений путем объединения коллектива исполнителей в единый координирующий орган, действующий в едином управляющем и информационном пространстве на основе концепции единой комплексной информационной системы предприятия.

Процесс построения и внедрения КИС предприятия включает разработку концепции КИС; анализ бизнес-процессов предприятия; внедрение; реинжиниринг бизнес-процессов (опционально); эксплуатацию и

развитие*. Таким образом, концепция КИС является основополагающей.

Целью внедрения комплексной информационной системы предприятия является обеспечение эффективности работы предприятия в целом, сохранение корпоративных знаний как составной части КИС, обеспечение совместного использования сотрудниками предприятия текущих и ретроспективных корпоративных знаний.

Основные задачи КИС управления предприятием:

– предоставление актуальной информации о внутренних и внешних процессах;

– оперативность и эффективность взаимодействия между подразделениями;

– обеспечение требуемого качества управления процессами;

– обеспечение экономической эффективности от деятельности предприятия;

– экспертная оценка функционирования бизнес-процессов предприятия и обеспечение корректирующих воздействий на них;

– прогнозирование развития предприятия;

– снижение непроизводительных потерь.

КИС представляет собой совокупность ресурсов функциональной структуры, информационного, математического, технического, организационного и кадрового обеспечения, которые объединены в единую систему для сбора, хранения, обработки и выдачи необходимой информации (рис. 1). КИС декомпозируется на совокупность функциональных модулей, решаемые задачи которых реализованы аппаратными и программными средствами.

Основой для разработки КИС являются структура системы управления предприятием; его бизнес-процессы; принятые на предприятии методы управления; стандарты предприятия, инструкции, описывающие процессы и процедуры, формализованные и неформализованные процессы и процедуры.

Управление предприятием в условиях функционирования КИС является человеко-машинной системой, в которой решающую роль играет человек, несущий ответственность как за информацию, вносимую в КИС, так и за решения, принятые на основе информации, предоставленной КИС.

Рис. 1. Ресурсы и инструменты комплексной информационной системы предприятия

КИС является инструментарием для получения актуальной информации, необходимой для функционирования бизнес-процессов предприятия, анализа их состояния и корректирующих воздействий.

КИС разрабатывается на принципах построения единого информационного пространства:

– единство ввода информации. Информация вводится один раз и используется во

* **Ершова Т.Б.** Организационные аспекты создания единого информационного пространства предприятия // Транспортное дело России. 2009. № 2.

http://apniat.ru

всех необходимых последующих документах;

– разграничение доступа к информации. Информация доступна только тем, кому это необходимо;

– необходимость и достаточность информации. Функциональный блок работоспособен только в том случае, когда на вход его подается весь перечень данных, необходимых для его функционирования. Отсутствие любого компонента данных ведет к неработоспособности функционального модуля. В то же время на вход функционального модуля не должна подаваться «лишняя» информация.

КИС предприятия – аддитивная система, дополняющая функции человека и выполняющая хранение, передачу и представление информации, рутинную работу по обработке информации по заложенным в нее алгоритмам.

Функциональная схема, приведенная на рис. 2, – основа для разработки структурной схемы – комплекса аппаратно-программных средств, работающих в едином информационном пространстве и выполняющих функции хранения, обработки, передачи и предоставления данных. Основой для функциональной схемы КИС предприятия являются утвержденные бизнес-процессы, стандарты предприятия, а также неформализованные процедуры.

На концептуальном уровне при моделировании среды производственных ресурсов предприятия выделяются модели функциональных модулей, объединенные в общий граф с итерационными связями. Математическая структура функциональной схемы КИС – базисные множества элементов (модулей), запишем ее:

$$F = \{M_1, M_2, \ldots, M_n, R_1, R_2, \ldots, R_m\}. \quad (1)$$

Функциональная схема содержит функциональные модули управления взаимоотношениями с клиентами, планированием основного производства, сервисным обслу-

Рис. 2. Функциональная схема комплексной информационной системы предприятия ОАО «Авиаагрегат»

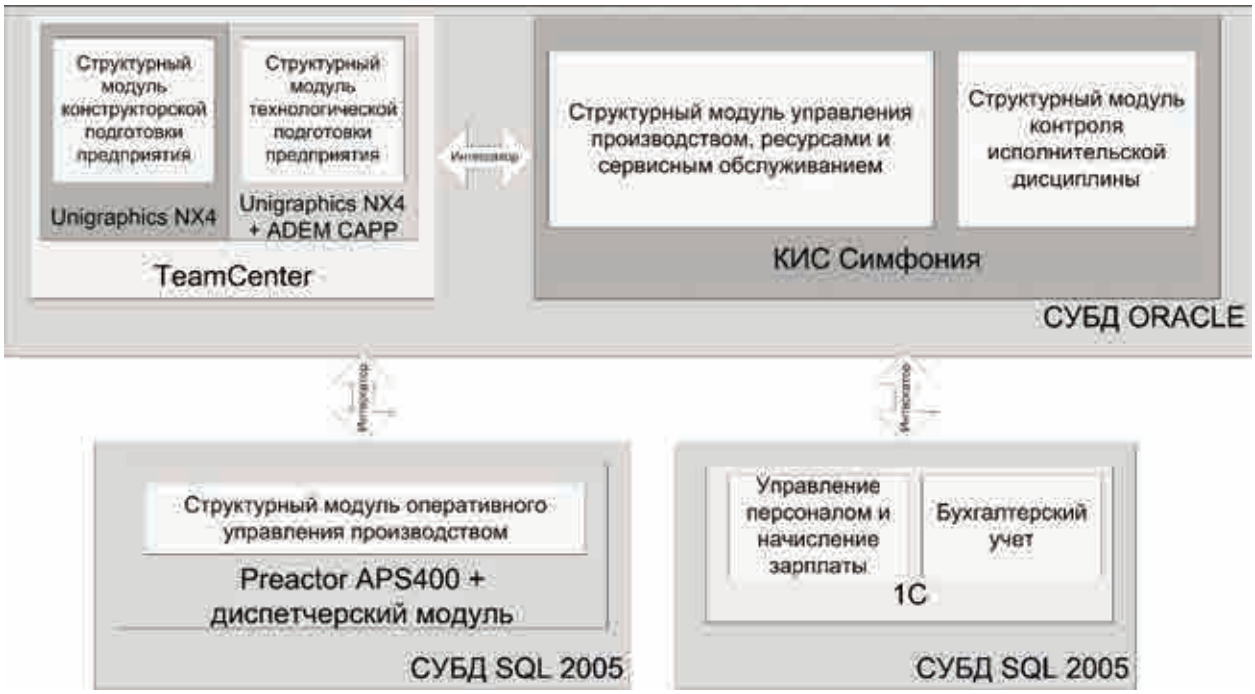


Рис. 3. Структурная схема комплексной информационной системы предприятия ОАО «Авиаагрегат»

живанием, качеством, конструкторско-технологической подготовкой производства, инженерной подготовкой производства, финансовыми ресурсами, материальными ресурсами, производственными мощностями, кадрами и контролем исполнительской дисциплины.

Специалист выполняет набор функций, которые относятся к разным функциональным модулям информационной системы, поэтому необходимо создавать автоматизированные рабочие места для каждого конкретного специалиста, имеющие специфический набор функций.

Модели рабочих мест со специфическим набором функций представляются в форме типовых математических структур следующего вида:

$$S(M_1) = \{A_1, F^{M1}, N^{M1}, R^{M1}\}, \quad (2)$$

$$S(M_2) = \{A_2, F^{M2}, N^{M2}, R^{M2}\}, \quad (3)$$

. . . . . .

$$S(M_n) = \{A_n, F^{Mn}, N^{Mn}, R^{Mn}\}, \quad (4)$$

Выражения (2, 3, 4) в общем виде можно записать:

$$\sum_{i=1}^{n} S(M_i) = \sum_{i=1}^{n} \left\{A_i, F^{M_i}, N^{M_i}, R^{M_i}\right\}, \quad (5)$$

где A_i – множества элементов моделей i-го модуля; F^{M_i} – функциональных свойств элементов моделей; F^{M_i} – параметров и свойств элементов моделей; R^{M_i} – отношений между элементами, свойствами и параметрами.

С точки зрения управления информационными потоками задачей информационной системы является обеспечение единства ввода данных и обеспечения их использования на основе управления правами доступа к ним.

Структурная схема КИС предприятия (рис. 3) основана на утвержденных программных средствах и содержит перечень программных продуктов, границы их действия и шлюзы взаимодействия.

Математическая структура S КИС предприятия представляет собой множества взаимосвязанных организационно-технических структурных модулей в едином информационном пространстве, описываемых свойствами. Запишем ее в следующем виде:

$$S = \{S(K), S(T), S(П), S(Д), S(У)\}. \quad (6)$$

Структурная схема состоит из следующих структурных модулей:

Структурный модуль $S(K)$ конструкторской подготовки производства. Базируется на программных продуктах Unigraphics NX4 CAD/CAE и системе управления инженерными данными TeamCenter Engineering. Обеспечивает информационную поддержку конструкторской подготовки производства.

Структурный модуль $S(T)$ технологической подготовки производства. Базируется на программных продуктах Unigraphics NX CAD/CAM, системе проектирования технологических процессов ADEM CAPP и системе управления инженерными данными TeamCenter Engineering. Обеспечивает информационную поддержку конструкторской и технологической подготовки производства изделий, деталей, оснастки и специнструмента, выполняемой отделами главного технолога, главного металлурга, отделом механизации и автоматизации работ.

Структурный модуль $S(П)$ управления производством, ресурсами и сервисным обслуживанием. Базируется на программном продукте «Симфония» – системе ERP/MES/SRM/EAM и обеспечивает информационную поддержку процессов управления основным производством (объемно-календарное планирование); ресурсами предприятия (финансы, кадры, инструмент, материалы и комплектующие, средства труда (рабочие места); сервисным обслуживанием; качеством продукции.

Структурный модуль $S(Д)$ контроля исполнительской дисциплины. Базируется на программном продукте «Симфония». Обеспечивает информационную поддержку контроля исполнительской дисциплины выполнения распорядительных документов.

Структурный модуль $S(У)$ оперативного управления производством базируется на программном продукте Preactor APS400 и MES-системе «Симфония», обеспечивает информационную поддержку процесса оперативного управления и диспетчеризацией производства.

Концептуальная модель комплексной информационной системы предприятия в самом общем виде можно представить в виде зависимости

$$E = f(F, S), \qquad (7)$$

где E – некоторый совокупный количественный показатель эффективности системы для достижения цели.

Для исследования КИС применяется принцип декомпозиции. При этом модель системы представляется в виде древовидной структуры диаграмм, где верхняя диаграмма наиболее общая, а самые нижние – детализированы. При этом уровень детализации процесса определяется поставленной целью и поставленными задачами.

Хранение и управление информацией производится системами управления базами данных (СУБД) Oracle и MSSQL. Взаимодействие между СУБД обеспечивается специальными программными шлюзами, передающими необходимую информацию, определяемую функциональной схемой КИС.

Взаимодействие программных продуктов внутри одной СУБД обеспечивается методами бесшовной интеграции (синхронизации) за исключением тех случаев, когда это невозможно или нецелесообразно.

Информационные потоки внутри КИС имеют в составе статическую и динамическую компоненты данных. Динамические данные – информация актуальная в определенный период времен и описывающая состояние бизнес процессов. Статические данные – информация актуальная в течение длительного периода времени и являющаяся описанием объектов информационной системы – материальных, кадровых, финансовых, организационных ресурсов. Статические данные являются справочником системы.

Справочником КИС называется таблица, содержащая перечень названий объектов (моделей объектов) и их статических атри-

бутов, использующихся в различных функциональных модулях. Справочник является общим для всех функциональных модулей. Синхронизация между структурными модулями обеспечивается с помощью шлюзов-интеграторов. Ввод в справочник осуществляется только в одном структурном модуле, что обеспечивает единственность хранения информации.

СТРУКТУРНЫЙ ПОДХОД К АВТОМАТИЗИРОВАННОМУ ПРОЕКТИРОВАНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

***А.В.Торпачев**, канд. техн. наук* (*“МАТИ” – РГТУ им. К.Э. Циолковского*)

Рассматривается один из подходов к решению задач технологического проектирования, реализованный путем комплексного моделирования изделий, производственной системы и процессов производства аэрокосмической техники.

Ключевые слова: технологическое проектирование, производственная система, процессы производства.

STRUCTURAL APPROACH TO THE COMPUTER-AIDED PROCESS PLANNING FOR MANUFACTURING AEROSPACE ENGINEERING. *A.V.Torpachev, Cand.Techn.Sc.*

The article considers one of the approaches to the solution of the process planning problems, realized by complex modeling of products, manufacturing system and processes of the aerospace engineering production.

Keywords: process planning, manufacturing system, production processes.

Математическое моделирование производственного процесса отражает существенные закономерности и связи между свойствами изделия и производственной системы. Процесс проектирования представляется совместным преобразованием технологической модели исходного объекта $S(A)$ и модели производственной системы $S(P)$ с получением в результате преобразований модели решения $S(T)$, то есть

$$T : A \to P. \quad (1)$$

Объектом производства является изделие A, рассматриваемое при технологическом проектировании как взаимосвязанная совокупность $a_1, ..., a_n$ конструктивных элементов и элементарно-обрабатываемых поверхностей при их механической обработке,

$$A = \{a_1, ..., a_n\}. \quad (2)$$

Технологическая модель изделия $S(A)$ увязывает конструктивные элементы (2) структурно-параметрической модели изделия с технологическими свойствами (элементами), необходимыми для осуществления технологического процесса. Таким образом, технологическая модель изделия выполняет функции интерфейса между информационной средой конструкторского описания элемента изделия и системой технологического проектирования [4].

Производственную систему P при проектировании технологических процессов будем рассматривать одновременно в двух взаимосвязанных аспектах:

- в качестве структуры, содержащей весь спектр технологических элементов (оборудования, приспособлений, инструмента и т.п.);
- как совокупность технологических воздействий (операций, переходов), входящих в состав технологических процессов изготовления изделий.

При подобном рассмотрении элементы производственной системы образуют упорядоченное множество

$$P = \{p_1, p_2, ..., p_N\}. \quad (3)$$

Возможные варианты решения, получаемые при технологическом проектировании в процессе взаимодействия изделия и производственной системы, образуют множество

$$T = \{t_{ij}\}, \ i = 1, ..., n; \ j = 1, ..., k. \quad (4)$$

Для описания технологической модели изделия $S(A)$, модели технологической системы $S(P)$ и модели вариантов решения $S(T)$ при автоматизированном проектировании технологических процессов целесообразно использовать структурно-параметрический подход к моделированию, при котором математическую модель задачи технологического проектирования (1) можно представить в виде

$$S = \{A, P, T, \xi\}, \quad (5)$$

где ξ – процедуры управления математическим моделированием при проектировании технологических процессов.

Для реализации основных процедур технологического проектирования необходимо выделить инвариантные информационные модели; сформировать набор типовых процедур синтеза информационных объектов; разработать модели проектирования, обеспечивающие индивидуализацию решений, получаемых в процессе технологического проектирования.

Математическую структуру S можно представить как

$$S = \{M_1, M_2, ..., M_n, R_1, R_2, ..., R_m\}, \quad (6)$$

где M – базисные множества, R – отношения между элементами, описываемые определенными характеристиками.

Проблема вариантного проектирования технологических процессов требует выделения в самостоятельный объект исследования технологической системы. При вариантном проектировании основными проектными процедурами являются: определение структуры объекта проектирования; расчет и оптимизация параметров, характеризующих проектные решения.

Исследования процессов моделирования технических систем и технологических объектов [1, 2] показывают, что модель производственной системы содержит множество технологических элементов P, их качественных характеристик F, численных параметров N и отношений R между этими компонентами, описывающих моделируемую технологическую систему в различных аспектах. Таким образом, состав базисных множеств M математической модели производственной системы определяется набором

$$M = \{P, F^P, N^P\}, \quad (7)$$

где $P = p_1, p_2, ..., p_N$ – упорядоченное множество элементов системы; $F^P = \{f_1, ..., f_m\}$ – множество качественных характеристик; $N^P = \{n_1, ..., n_l\}$ – множество параметров технологических элементов.

Помимо явного описания рассмотренных элементов математической модели производственной системы, необходимо определить все связывающие их отношения. Отношения представляют собой определенные в формализованном виде связи между элементами модели. Таким образом, модель производственной системы является объединением пяти структур:

$$S(P) = \{P, F^P, N^P, R^P, \rho\}, \quad (8)$$

где $R^P = \left\{R_F^P, R_N^P\right\}$ – отношения, определенные на множествах элементов, их качественных характеристик и параметров; ρ – совокупность процедур, формирующих значения характеристик моделируемых элементов производственной системы.

Рассмотрим функциональные возможности системы автоматизированного технологического проектирования, основанные на нисходящем (структурном) подходе к моделированию производственных процессов.

Структурный подход при моделировании производственной системы основан на моделировании функциональных взаимосвя-

зей элементов технологической системы, основными компонентами которой являются:

- технологический оператор (описание действий, выполняемых в рамках операции или перехода);
- оборудование, определяющее вид операции;
- инструмент (основной, вспомогательный, измерительный и т.п.);
- приспособления, обеспечивающие условия выполнения операций.

При структурном подходе выполняется распределение информации, моделирующей взаимосвязи элементов на различных уровнях функциональной иерархии системы в направлении от элементов вышестоящих уровней к более детальным (нижестоящим) уровням. Структурное моделирование осуществляется с помощью табличных конъюнктивных моделей. Представление технологических знаний выполняется на основе реляционных структур данных. Поскольку многие таблицы, полученные при моделировании и анализе функциональных взаимосвязей элементов технологической системы, заполнены неравномерно, предлагается реляционно-иерархическая структура данных, обеспечивающая гибкость при моделировании производственных систем. Отличительной особенностью обработки организованных таким образом данных является учет не только семантики самих данных, но и семантики связей между ними.

Проиллюстрируем структурный подход на примере моделирования процессов сборочно-сварочного производства. В качестве примера рассмотрим моделирование технологического процесса сборки шпангоута, входящего в конструкцию днища бака.

Для решения поставленной задачи согласно выражению (1) необходимо разработать информационно наполненную структурно-параметрическую технологическую модель изделия $S(A)$, модель производственной системы $S(P)$ и модель вариантов технологических решений $S(T)$.

Модель производственной системы $S(P)$ включает в себя технологические базы знаний по различным производственным процессам (рис. 1): слесарной обработке (элемент «Slesar»); контролю (элемент «Kontr»); базу «Svaroch» для группы сварочных операций.

Каждая из моделей видов обработки включает в себя описания элементов производственной системы, задействованных при выполнении моделируемых операций: отдельных переходов, входящих в состав операций технологического процесса; используемых станков и другого оборудования для осуществления технологических операций; применяемых приспособлений; инструмента. Описания перечисленных технологических элементов в моделях видов операций упорядочены по кодам объектов. Код объекта задает принадлежность элемента к тому или иному типу технологических объектов (переходам, оборудованию, приспособлениям или инструменту). Так, при моделировании слесарных операций (см. рис. 1) принята следующая семантика: код элементов описания переходов соответствует назначению применяемой модели («sle010», «sle020», ..., «sleOp»); элементы описания оборудования имеют код «оборуд»; для приспособлений и элементов оснастки используется код «присп»; для инструмента – код «инструм».

Метки (обозначения) элементов для обеспечения удобочитаемости моделей выбираются таким образом, чтобы в них также отражалась принадлежность элементов к типу объекта, например для слесарных операций:

- метки переходов начинаются с символа «П» и содержат порядковый номер данного перехода в описании операции – П01, П02, ..., П29;
- метки оборудования – OSP1, OSP2 и т.д. («OSP» – «оборудование слесарного перехода»);
- обозначения приспособлений – PSP1, PSP2 и т.д. («PSP» – «приспособление слесарного перехода»);

http://apniat.ru

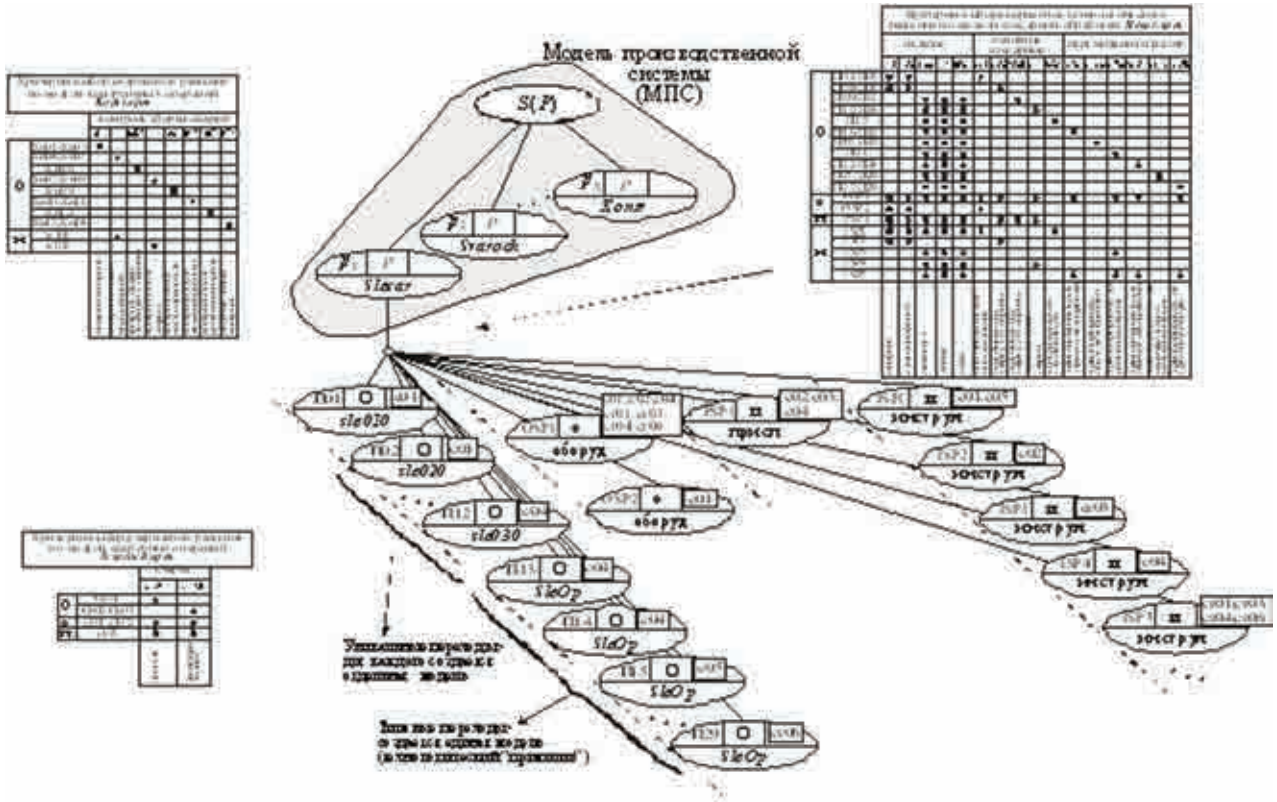


Рис. 1. Применение структурного подхода при разработке модели производства

• обозначения элементов, отвечающих за описание инструмента – ISP1, ISP2 и т.д., («ISP» – «инструмент слесарного перехода»).

Использованы различные приемы при моделировании уникальных (по составу параметров) и типовых переходов. Например, слесарные переходы П01 – П12 (см. рис. 1) являются уникальными, и для каждого из переходов создана своя структурно-параметрическая модель – «Sle010», «Sle020», ..., «Sle120» соответственно. В каждой математической модели переходов хранится информация о содержании технологических действий, технико-экономические параметры (трудоемкость выполнения перехода, подготовительное и заключительное время, режимы обработки и т.п.) и зависимости, позволяющие рассчитывать значения параметров.

Иной подход использовался при моделировании слесарных переходов П13–П29 (см. рис. 1), являющихся структурно-подобными. Технико-экономические параметры и характеристики каждого из них представляются аналогичными наборами величин и могут быть описаны типовым элементом. Различия заключаются в содержании технологического воздействия и значениях технико-экономических показателей, задаваемых в виде констант. В такой ситуации нецелесообразно разрабатывать отдельные модели на каждый переход операции, гораздо эффективнее создать одну универсальную математическую модель, в которой будет храниться информация о параметрах перехода. Например, разработана модель типового слесарного перехода – «SleOp» («слесарная операция»), а значения характеристик конкретных переходов задаются при обращении к этой модели.

В процессе моделирования различных элементов производственной системы (переходов, оборудования, приспособлений, инструмента) требуется различная степень декомпозиции их структуры в общей иерархии моделей проектирования. В математической модели «Slesar» (см. рис. 1) при описании переходов требуется еще один уро-

вень детализации структуры, на котором осуществляется параметризация переходов операции независимо от того, является данный переход типовым или уникальным. Для моделирования элементов, характеризующих оборудование, приспособления и оснастку, нет необходимости создавать еще один уровень декомпозиции – перечисленные элементы полностью определены в модели «Slesar».

При автоматизированном проектировании технологических процессов необходимо задать характерные свойства или условия, согласно которым из всего множества элементов модели производственной системы, входящих в структуру модели производственной системы, будут выбираться элементы, включаемые в решение. Выделенные в процессе проектирования свойства должны служить критерием включения каждого элемента в состав технологического решения. Если элемент удовлетворяет набору подаваемых на обработку в модели свойств, то он включается в решение. В том случае, когда хотя бы одно свойство не выполняется, элемент в решение не входит [1].

При моделировании слесарных операций было выделено три группы свойств:

1) конструкторские характеристики – какие элементы конструкции изделия рассматриваются в качестве объектов при осуществлении переходов слесарной операции (и01 – профиль; и02 – стыки профилей; и03 – шпангоут; и04 – днище; и05 – отсек и т.п.);

2) параметры стадий технологического процесса (с01 – обеспечение исходного состояния; с02 – подготовка под сварку 1-й стороны; с03 – подготовка под сварку 2-й стороны; с04 – доводка после сварки; с05 – контроль овальности шпангоута и т.п.);

3) данные по перемещению изделия после технологического воздействия (ст01 – транспортировать для термо- и механообработки; ст02 – транспортировать после механообработки; ст03 – транспортировать для рентгеноконроля; ст04 – транспортировать для окончательной механообработки; ст05 – транспортировать для окончательного рентгеноконтроля; ст06 – транспортировать на групповую сборку).

Разработанные математические модели элементов производственной системы являются конъюнктивными, то есть при моделировании каждого элемента производственной системы в его описании указываются те свойства, которым удовлетворяет рассматриваемый технологический объект.

Описанный выше подход применим и при автоматизированном проектировании технологических процессов изделий более высокого уровня сложности [3]. При этом нет необходимости вновь создавать все математические модели, достаточно создать технологическую модель исследуемого изделия, взаимосвязанную с его конструкцией, и расширить модель производственной системы, добавив в нее необходимые элементы (новые переходы, операции, недостающее оборудование, не применявшиеся ранее оснастку и инструменты) и при необходимости задав дополнительные технологические характеристики и критерии, регламентирующие ход выполнения технологических процессов.

Модель технологических решений $S(T)$ представляет собой реляционно-иерархическую базу данных, в которой содержится в виде ссылок на технологическую модель изделия и модель производственной системы информация, включенная в решение задачи по проектированию технологического процесса (рис. 2). В создаваемой модели технологических решений хранится не только оптимальный по определенному критерию вариант, но и все возможные варианты реализации техпроцесса.

При формировании модели технологических решений на обработку подается вектор задаваемых свойств, выполнение которых является необходимым условием для реали-

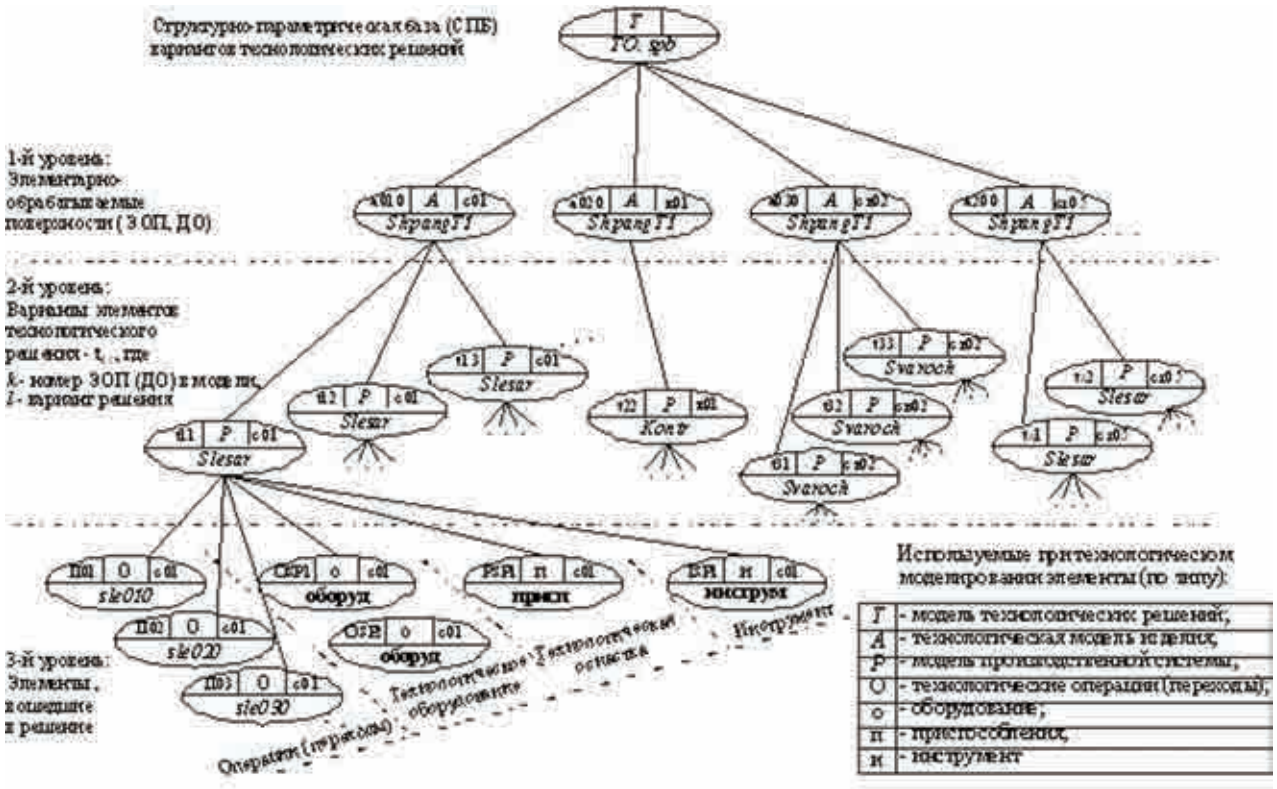


Рис. 2. Модель технологических решений

зации технологического процесса. В структуре модели технологических решений «ТО.spb» (см. рис. 2) можно условно выделить три уровня.

Первый уровень представляет собой элементарно обрабатываемые поверхности, то есть конструктивные элементы, удовлетворяющие заданному вектору свойств [4]. Указанные элементы определены в технологической модели изделия.

Второй уровень включает все допустимые варианты реализации техпроцесса (операции) для выделенных на первом уровне элементарно обрабатываемых поверхностей. Критерием отбора множества вариантов служит соответствие характеристик рассматриваемой операции исходному вектору свойств.

Генерация полного множества вариантов реализации технологического процесса и отображение их в виде структурной модели (графа вариантов решений) дает возможность представить совокупность проектных решений в виде множества путей на графе. Алгебраическая формулировка задачи проектирования приводит стратегию выбора проектных решений к задаче оптимизации, для решения которой могут быть использованы методы отсечения, динамического программирования, приближения и т.п. Одной из функций процесса управления технологическим проектированием является задача выбора варианта проектного решения на множестве элементов t_{kl}.

На *третьем уровне* модели для каждого варианта подбираются все элементы технологической системы (переходы, оборудование, приспособления и инструмент), используемые в решении. Механизм отбора всех входящих элементов в состав технологического решения рассматривался при описании структурного подхода к построению технологических баз знаний.

На заключительном этапе автоматизированного проектирования формируется технологический процесс изготовления рассматриваемого изделия, представленный в виде маршрутных и операционных карт.

При формировании технологической документации используется информация как о выполняемых технологических операциях, так и о самом изделии. Таким образом, в работе задействуются две базы данных, созданные на предыдущих этапах технологического проектирования. При этом база данных технологического процесса $S(P)$ в форме модели технологических решений взаимоувязана с базой данных изделия $S(A)$, представленной в форме технологической модели изделия.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Павлов В.В.** Структурное моделирование производственных систем. М.: Мосстанкин, 1987. 80 с.

2. Информационные технологии в наукоемком машиностроении / Под ред. А.Г. Братухина. Киев: Техника, 2001. 620 с.

3. Системы автоматизированного проектирования // Учеб. пособие для втузов в 9 кн. / Под ред. И.П. Норенкова. М.: Высшая школа, 1986.

4. **Торпачев А.В.** Разработка технологической базы знаний для проектирования процессов изготовления изделий аэрокосмической техники // Ракетно-космические комплексы. Вып. 1/2006. М.: МАТИ – КБТМ, 2006, с. 35–41.

Прошу слова...

ПРОБЛЕМЫ В ПОДГОТОВКЕ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

***В.В.Крымов**, докт. техн. наук, **В.Н.Машков**, канд. техн. наук*
(*ФГУП «НПЦ газотурбостроения “Салют”»*)

PROBLEMS IN TRAINING OF SPECIALISTS FOR MECHANICAL ENGINEERING ENTERPRISES.

V.V.Krymov, Dr.Techn.Sc, V.N.Mashkov, Cand.Techn.Sc.

Предприятия машиностроительной отрасли, в том числе ОПК, испытывают дефицит в квалифицированных кадрах. Эта проблема связана с низким престижем в обществе инженерных специальностей, недостаточной социальной значимостью работы на промышленных предприятиях, с неэффективной системой оплаты и мотивации труда инженеров и рабочих и с неустойчивым финансовым положением многих промышленных предприятий.

Существовавшая система начального, среднего и высшего профессионального образования обеспечивала подготовку для промышленности рабочих, техников, инженеров и была реальной базой подготовки ученых.

Удельный вес студентов в России едва ли не самый высокий в мире: на 10 тыс. жителей получают высшее образование свыше 500 человек (в Германии – 240, в Великобритании – 276, в Японии – 233).

Безработные в России стали самыми образованными в мире, что является более чем сомнительным достижением.

Новый очередной законопроект «Об образовании в Российской Федерации» направлен на переход России к всеобщему высшему образованию. При этом из предыдущего закона удалено начальное профессиональное образование, а среднее профессиональное присоединено к высшему.

Следует отметить, что на фоне растущего числа выпускников высшей школы практически утрачен национальный потенциал рабочих кадров. Доля рабочих высшей квалификации (15 %) вдвое меньше, чем была в России раньше и втрое меньше, чем имеют

развитые страны. Темпы пополнения рабочих кадров отстают от темпов их естественной убыли в два-три раза. Уместно отметить, что в Германии более половины молодежи проходит через профессионально-техническое образование, получая за три года обучения навыки по 600 востребованным ремесленным профессиям.

Нерегулируемость структуры выпускаемых системой профессионального образования России кадров оборачивается для предприятий ОПК и машиностроения нехваткой специалистов, способных создавать инновационную наукоемкую продукцию.

По официальным данным, уровень трудоустройства выпускников вузов по полученной специальности составляет в России 50 %, а по независимым оценкам (ОЭСР) 18 %. В результате в промышленности увеличивается дефицит специалистов, при этом государство несет огромные расходы бюджетных средств. Получается, что государство несет финансовую ответственность за подготовку специалистов, а выпускник образовательного учреждения ответственности перед государством и обществом за полученное бесплатное образование не несет, поступая на работу либо не по специальности, либо в инофирмы, либо уезжая за рубеж. Из-за неэффективных механизмов участия работодателей в определении задач и оценке результатов деятельности государственных образовательных учреждений всех уровней у работодателя отсутствует мотивация к софинансированию профессионального образования.

В настоящее время назрела острая необходимость проведения ряда коренных изменений в структуре подготовки кадров для промышленных предприятий на всех ее профессиональных уровнях: начальном, среднем и высшем. При этом необходимо обеспечить непрерывность профобразования и создание устойчивого альянса образования, науки и производства.

На совместном заседании Государственного совета и Комиссии по модернизации и технологическому развитию экономики России президент РФ Д.А. Медведев отметил, что важной задачей является создание цепочек в сфере образования: лицей – колледж – университет, участники которой должны работать в непосредственном контакте с работодателями.

Построение непрерывной системы образования школа (лицей) – колледж – университет – предприятие сегодня возможно только при активном участии предприятий как в организации такого взаимодействия, так и в самом процессе обучения, подготовки кадров. В качестве примера можно привести опыт Института целевой подготовки специалистов по двигателестроению ФГУП «ММПП “Салют”», создавшего инновационную систему участия предприятия в подготовке и повышении квалификации персонала, отмеченную в 2008 г. золотой медалью IX Международного форума «Высокие технологии XXI века». Основа этой системы – непрерывность образования, тесная связь предприятия с ведущими техническими вузами Москвы и базовыми колледжами на основе соответствующих договоров о взаимном сотрудничестве.

Из-за отсутствия планирования необходимого числа специалистов в каждой профессии и специальности подготовка кадров в системе профессионального образования слабо ориентирована на потребности рынка труда. И это является одной из причин низкого уровня трудоустройства выпускников по полученным специальностям.

Для решения задачи по организации планирования подготовки специалистов в соответствии с запросами конкретных работодателей, по нашему мнению, следует законодательно ввести обязательную контрактную подготовку для студентов, обучающихся на бюджетной основе, в целях закрепления выпускников вузов и колледжей на предприятиях ОПК. Контракт на подготовку специалиста – это трехсторонний договор между государственным образовательным учреждением (ГОУ), студентом и предприятием-работодателем, заключенный в начале обучения.

Контрактно-целевая подготовка специалистов должна предусматривать обязательную стажировку молодого специалиста на предприятии в течение трех лет после окончания учебного заведения.

Законодательное введение обязательной контрактной подготовки для студентов, обучающихся на бюджетной основе, позволило бы проводить реальную целевую практику студентов на предприятии; планировать подготовку специалистов определенных профессий и в определенных количествах в соответствии с запросами работодателей; повысить уровень подготовки специалистов; сократить период адаптации и специализации молодых специалистов на предприятии; исключить расходы бюджетных средств на обучение студентов, не желающих работать на предприятии по полученной специальности.

В новом проекте «Закона об образовании» ничего не сказано о бюджете образования. Из международного опыта известно, что модернизация образования проводится при планируемых на нее затратах не менее 7 % от валового внутреннего продукта. Именно такими были наши расходы в 1970 г., по данным мирового банка, а в 50-е – даже 10 %.

В настоящее время остро стоит проблема преемственности в среде квалифицированного профессорско-преподавательского состава вузов и средних специальных учебных заведений (ссузов).

О возможной потере качественного образования говорилось и на заседаниях Российского Союза ректоров и в прессе выдающимися учеными и педагогами нашей страны, имеющими неоспоримый и высочайший авторитет в мире. В марте 2011 г. на совещании в Магнитогорске, где обсуждались проблемы подготовки инженерных кадров, Президент России Дмитрий Медведев заявил, что страна стоит перед угрозой девальвации инженерного образования. А несколько позже, на совещании, посвященном вопросам улучшения условий труда рабочих, Президент подчеркнул, что необходимо «утверждать ценность рабочих профессий».

Отсутствие в проекте «Закона об образовании» понятия «начальное профессиональное образование» недопустимо. Необходимо довести уровень НПО до качества, необходимого промышленности.

В федеральном государственном стандарте для старшей школы должно быть предусмотрено обязательное изучение математики, физики, химии и др. предметов, чтобы выпускник школы мог продолжить образование в техническом вузе.

С 2011 г. система высшего образования переходит на двухуровневую подготовку (так называемую Болонскую систему): бакалавриат и магистратура. За четыре «бакалаврских» года подготовить инженера-разработчика по специальностям, связанным с высокими технологиями, сложными инновационными задачами, наукоемкими производствами, невозможно. В то же время, подготовка магистров по техническим направлениям в соответствии ФГОС ВПО предполагает в основном их исследовательскую работу.

Учебные заведения высшего и среднего профессионального образования испытывают трудности с организацией практики студентов.

С нашей точки зрения, для того чтобы обеспечить предприятия ОПК и машиностроения в целом необходимыми профессиональными кадрами и вывести систему профессиональной подготовки кадров на уровень, отвечающий требованиям развития и безопасности страны, необходимо законодательно установить уровень зарплаты профессорско-преподавательского персонала в вузах и ссузах не менее двух средних заработных плат в производственных отраслях народного хозяйства для педагогических работников вузов и не ниже 1,5 средних заработных плат – для педагогических работников ссузов. Это позволит, кроме того, восстановить престиж профессии преподавателя, привлечь молодых специалистов к преподавательской работе и сохранить преемственность поколений высококвалифицированных преподавателей; надо разработать и принять закон о государствен-

ном статусе учителя, преподавателя, научного работника; установить расходы на высшее образование из федерального бюджета не менее 5 % от расходной части его; пенсионное обеспечение и иные социальные гарантии для педагогических работников на уровне, предусмотренном действующим законодательством для государственных служащих.

Следует освободить от налогообложения все доходы образовательных учреждений, реинвестируемых в образовательный процесс.

Предлагаем проводить итоговую аттестацию в школе в традиционной форме с участием внешних экзаменаторов (желающие выпускники должны иметь возможность сдавать ЕГЭ), сохранить начальное профессиональное образование и учреждения НПО.

Участие вузов в Болонском процессе должно быть добровольным.

Рекомендуем ввести обязательную контрактную подготовку в технических вузах и колледжах для студентов, обучающихся на бюджетной основе, предусматривающую обязательную производственную стажировку молодого специалиста на предприятии в течение 3 лет после окончания учебного заведения.

Считаем, что целесообразна одноуровневая подготовка специалистов (инженеров) в технических вузах по техническим специальностям для оборонно-промышленного комплекса, а в соответствующих образовательных стандартах для технических вузов следует предусмотреть получение студентами рабочей профессии, в том числе во время практик.

Следует предусмотреть в соответствующих образовательных стандартах введение 2-уровневой подготовки в ссузах, имеющих необходимую материально-техническую базу: 1-й уровень – подготовка рабочего; 2-й – подготовка техника.

Чтобы повысить качество проведения практики студентов на предприятиях и заинтересованность предприятий в проведении у них практики, следует установить систему финансирования ее и принять Положение о частичной компенсации затрат предприятия.

Необходимо обеспечить прогнозирование потребности предприятий ОПК и машиностроения в специалистах всех уровней (рабочих, техников, инженеров) и в соответствии с этим ввести квоту приема в учебные заведения.

Для привлечения бизнеса к развитию материально-технической базы образовательных учреждений следует в законодательном порядке включить соответствующие расходы предприятий на эти цели в себестоимость продукции и освободить их от налогов.

Было бы правильным ввести в практику кредитование подготовки специалистов для ОПК из государственных и частных источников. Целесообразно предусмотреть в качестве обязательной нормы периодическое повышение квалификации для всех категорий персонала государственных и частных предприятий ОПК и машиностроения.

Надо расширить перечень специальностей высшего профессионального образования для основных видов производства, отвечающих современным тенденциям развития машиностроения.

Следует разработать для молодых специалистов систему льгот, чтобы повысить их заинтересованность в работе на данном предприятии.

Проблема подготовки специалистов для предприятий машиностроения требует незамедлительного решения. Приглашаем всех заинтересованных руководителей промышленных предприятий, органы власти, общественные организации, руководителей учебных заведений принять участие в обсуждении этого вопроса.

Редакция журнала «Авиационная промышленность» для обсуждения проблемы подготовки кадров открывает рубрику ***«Прошу слова»****.*