Олейников А.И.
A.I. Oleynikov

ТЕНЗОРНО-ЛИНЕЙНЫЕ МОДЕЛИ УСТАНОВИВШЕЙСЯ ПОЛЗУЧЕСТИ ТРАНСВЕРСАЛЬНО-ИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ С РАЗНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ И СЖАТИИ

TENSOR LINEAR MODELS OF STATIONARY CREEP OF TRANSVERSALLY ISOTROPIC MATERIALS HAVING DIFFERENT TENSILE AND COMPRESSSION PROPERTIES

Олейников Александр Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой механики и анализа конструкций и процессов Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: a.i.oleinikov@mail.ru, cvmi@knastu.ru.
Mr. Alexander I. Oleynikov – Doctor of Physics and Mathematics, Head of the Department of Mechanics and Analysis of Structures and Processes, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: a.i.oleinikov@mail.ru, cvmi@knastu.ru.

Аннотация: Предложены простейшие определяющие соотношения для описания установившейся ползучести трансверсально-изотропных материалов с разными свойствами при растяжении и сжатии. Работа выполнена при финансовой поддержке ДВО РАН, РФФИ и Минобрнауки РФ (проекты 09-I-П11-03, 09-II-СУ-03-001, 07-01-00747, 2.1.1/ 1686).

Summary: The paper suggests the simplest defining relations for description of stationary creep of transversally isotropic materials having different tension and compression properties. The study has been done with financial support from the Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, the Russian Fundamental Research Fund, the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (projects 09-I-П11-03, 09-II-СУ-03-001, 07-01-00747, 2.1.1/ 1686).

Ключевые слова: ползучесть, трансверсальная изотропия, разносопротивляемость, закон течения.

Keywords: creep, transverse isotropy, heteroresistance, law of flow.

УДК 539.376

1. Пусть x_1, x_2, x_3 – прямоугольная декартова система координат. Скорость деформаций установившейся ползучести $\varepsilon = (\varepsilon_{ij})$ зависит от текущих значений напряжений $\sigma = (\sigma_{ij})$ и температуры. Если форма этой зависимости не меняется при повороте системы координат на произвольный угол вокруг оси x_3, то материал является трансверсально-изотропным при установившейся ползучести с плоскостью изотропии x_1, x_2. Трансверсальной изотропией при ползучести обладают, например, прутки и тонкие плиты из легких сплавов, используемые для шпангоутов и монолитных крыловых панелей самолетов.

Зависимость $\varepsilon \sim \sigma$ может быть потенциальной зависимостью – ассоциированным законом

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_{ij}} \quad , \qquad \Phi = \Phi(\sigma). \tag{1.1}$$

Простейшая модель ползучести для трансверсально-изотропных материалов может определяться потенциалом скоростей деформаций:

Поступила в редакцию 25.05.2010

$$\Phi\left(\sigma_{et}\right)=\frac{1}{n+1}\sigma_{et}^{n+1}, \qquad \sigma_{et}=\sqrt{\tfrac{3}{2}T}, \tag{1.2}$$

где σ_{et} – эквивалентное напряжение, обобщающее напряжение Хубера-Мизеса и не зависящее от гидростатической составляющей тензора напряжений [1; 3, 281]:

$$T=aJ_1^2+bJ_2+cJ_3, \quad \left(a>0,b>0,c>0\right); \tag{1.3}$$

$$J_1=\sigma_{33}-\frac{1}{2}(\sigma_{11}+\sigma_{22}), \quad J_2=(\sigma_{11}-\sigma_{22})^2+4\sigma_{12}{}^2, \quad J_3=\sigma_{13}{}^2+\sigma_{23}{}^2. \tag{1.4}$$

Потенциальный закон течения (1.1), обобщающий теорию типа Мизеса, строится на основе потенциала (1.2) и имеет вид

$$\begin{gathered}
\varepsilon_{11}=\frac{3}{4}\sigma_{et}^{n-1}\left[-a\left(\sigma_{33}-\frac{1}{2}\left(\sigma_{11}+\sigma_{22}\right)+2b\left(\sigma_{11}-\sigma_{22}\right)\right)\right],\\
\varepsilon_{22}=\frac{3}{4}\sigma_{et}^{n-1}\left[-a\left(\sigma_{33}-\frac{1}{2}\left(\sigma_{11}+\sigma_{22}\right)-2b\left(\sigma_{11}-\sigma_{22}\right)\right)\right],\\
\varepsilon_{33}=\frac{3}{4}\sigma_{et}^{n-1}\left[2a\left(\sigma_{33}-\frac{1}{2}\left(\sigma_{11}+\sigma_{22}\right)\right)\right],\\
\varepsilon_{12}=\frac{3}{4}\sigma_{et}^{n-1}8b\sigma_{12}, \quad \varepsilon_{13}=\frac{3}{4}\sigma_{et}^{n-1}2c\sigma_{13}, \quad \varepsilon_{23}=\frac{3}{4}\sigma_{et}^{n-1}2c\sigma_{23}.
\end{gathered} \tag{1.5}$$

Постоянные a,b,c,n в (1.5) могут быть определены последовательно из опытов при чистом растяжении образцов, вырезанных вдоль осей x_3, x_1 и вдоль перпендикуляра к оси x_1 в плоскости x_2, x_3 под углом $\pi/4$ к оси x_3:

$$a=\frac{2}{3}A^{\frac{2}{n+1}}, \qquad b=\frac{2}{3}B^{\frac{2}{n+1}}-\frac{1}{4}a, \qquad c=\frac{4}{3}C^{\frac{2}{n+1}}-\frac{1}{4}a-b, \tag{1.6}$$

где A,B,C,n – постоянные степенной аппроксимации зависимости скорости ползучести от напряжения для экспериментальных кривых ползучести, соответствующих вышеуказанным образцам.

Непотенциальный закон течения, обобщающий закон Нортона и использующий эквивалентное напряжение σ_{et}, записывается следующим образом:

$$\varepsilon_{ij}=\left[3\left(aJ_1^2+bJ_2+cJ_3\right)/2\right]^{\frac{n-1}{2}}s_{ij}\ , \tag{1.7}$$

где $s_{ij}=\sigma_{ij}-\frac{1}{3}\sigma_{pq}\delta_{pq}\delta_{ij}$ – девиатор тензора напряжений и

$$a=\frac{2}{3}\left(\frac{3}{2}A\right)^{\frac{2}{n-1}},\quad b=\frac{2}{3}\left(\frac{3}{2}B\right)^{\frac{2}{n-1}}-a/4,\quad c=4\left(\frac{3}{2}C\right)^{\frac{2}{n-1}}-b-a/4. \tag{1.8}$$

2. В достаточно широком диапазоне напряжений прутки и тонкие плиты из титановых и алюминиево-магниевых сплавов, как правило, неодинаково деформируются в процессе ползучести при растяжении и сжатии в данном одном и том же фиксированном направлении [2, 53; 4, 181]. У этих материалов коэффициенты ползучести a,b,c и показатель ползучести n в (1.5) и (1.7), определенных по растяжению и по сжатию одинаково ориентированных образцов, существенно отличаются.

Трансверсально-изотропный материал в направлении оси x_i имеет разные характеристики ползучести при растяжении и сжатии, если в любой фиксированный момент времени значения деформаций и их скоростей в этом направлении существенно отличаются для растягивающих и сжимающих напряжений одинаковой величины $|\sigma_{ii}|$.

Предлагается следующий потенциал скоростей ползучести для трансверсально-изотропных материалов с разными характеристиками по растяжению и сжатию:

$$\Phi=\frac{f_1(\xi,\eta)}{n_1+1}\sigma_{et1}^{n_1+1}+\frac{f_2(\xi,\eta)}{n_2+1}\sigma_{et2}^{n_2+1}, \tag{2.1}$$

где

$$\sigma_{etm}=\sqrt{3/2\,T_m},\quad T_m=a_mJ_1^2+b_mJ_2+c_mJ_3,\quad (m=1,2),\quad (a_m>0,b_m>0,c_m>0), \tag{2.2}$$

$$\xi=\frac{J_1}{\sqrt{J}},\quad \eta=\sqrt{\frac{J_3}{J}},\quad (J=J_1^2+J_2+J_3), \tag{2.3}$$

$$f_1(\xi,\eta)=\sum_{k=1}^{3}\cdot\prod_{\substack{l=1\\ l\neq k}}^{6}\frac{\vec{r_l}\cdot\vec{r_{kl}}}{\vec{r_{kl}}\cdot\vec{r_{kl}}},\qquad f_2(\xi,\eta)=\sum_{k=4}^{6}\cdot\prod_{\substack{l=1\\ l\neq k}}^{6}\frac{\vec{r_l}\cdot\vec{r_{kl}}}{\vec{r_{kl}}\cdot\vec{r_{kl}}}, \tag{2.4}$$

$$\vec{r_l}=(\xi-\xi_l)\vec{e_1}+(\eta-\eta_l)\vec{e_2},\quad \vec{r_{kl}}=(\xi_k-\xi_l)\vec{e_1}+(\eta_k-\eta_l)\vec{e_2},\quad (\vec{e_i}\cdot\vec{e_j}=\delta_{ij}). \tag{2.5}$$

Параметры $|\xi|\le 1$, $0\le\eta\le 1$ в соответствии с формулами (2.3) характеризуют тип напряженного состояния в данном направлении. При чистых растяжениях $\sigma_{33}>0$, $\sigma_{11}>0$ (или $\sigma_{22}>0$), а также $\sigma_{33}^{\times}>0$ соответственно вдоль осей x_3,x_1 (или x_2), а также вдоль перпендикуляра к оси x_1 в плоскости x_2,x_3 под углом $\pi/4$ к оси x_3 имеем в пространстве (ξ,η) три нижеследующие точки:

$$(\xi_1,\eta_1)=(1,0),\quad (\xi_2,\eta_2)=\left(-1/\sqrt{5},0\right),\quad (\xi_3,\eta_3)=\left(1/\sqrt{13},2/\sqrt{13}\right). \tag{2.6}$$

При чистых сжатиях $\sigma_{33}<0$, $\sigma_{11}<0$ (или $\sigma_{22}<0$), $\sigma_{33}^{\times}<0$ получаем следующие три точки:

$$\left(\xi_4,\eta_4\right)=\left(-1,0\right),\ \left(\xi_5,\eta_5,\zeta_5\right)=\left(1/\sqrt{5},0,0\right),\ \left(\xi_6,\eta_6\right)=\left(-1/\sqrt{13},2/\sqrt{13}\right). \qquad (2.7)$$

Потенциальный закон течения, обобщающий (1.5) и использующий узлы интерполяции (2.6), (2.7), строится на основе потенциала (2.1). Постоянные a_m,b_m,c_m в (2.2) определяются по кривым ползучести, полученных при чистом растяжении $(m=1)$ и чистом сжатии $(m=2)$ вдоль указанных направлений.

Закон течения, обобщающий (1.7), имеет вид

$$\varepsilon_{ij}=\left[f_1(\xi,\eta)\left[3\left(a_1J_1^2+b_1J_2+c_1J_3\right)/2\right]^{\frac{n_1-1}{2}}+f_2\left(\xi,\eta\right)\left[3\left(a_2J_1^2+b_2J_2+c_2J_3\right)/2\right]^{\frac{n_2-1}{2}}\right]s_{ij}, \qquad (2.8)$$

где

$$a_1=\frac{2}{3}\left(\frac{3}{2}B_{13}\right)^{\frac{2}{n_1-1}},\ b_1=\frac{2}{3}\left(\frac{3}{2}B_{11}\right)^{\frac{2}{n_1-1}}-\frac{a_1}{4},\quad c_1=4\left(\frac{3}{2}B_{1\times}\right)^{\frac{2}{n_1-1}}-\frac{a_1}{4}-b_1; \qquad (2.9)$$

$$a_2=\frac{2}{3}\left(\frac{3}{2}B_{23}\right)^{\frac{2}{n_2-1}},\ b_2=\frac{2}{3}\left(\frac{3}{2}B_{21}\right)^{\frac{2}{n_2-1}}-\frac{a_2}{4},\quad c_2=4\left(\frac{3}{2}B_{2\times}\right)^{\frac{2}{n_2-1}}-\frac{a_2}{4}-b_2.$$

В равенствах (2.9) $B_{m3},B_{m1},B_{m\times}$ и n_m являются коэффициентами и показателями установившейся ползучести по чистым растяжениям $(m=1)$ и сжатиям $(m=2)$ призматических образцов, вырезанных в вышеуказанных направлениях.

Если характеристики ползучести при сжатии и растяжении одинаковы, то для напряженных состояний вида (2.6) и (2.7) соответственно потенциалы (2.1) и (1.2), а также связи (2.8) и (1.7) совпадают; в других точках (ξ,η) их близость определяется значениями лагранжевых многочленов влияния узлов (2.6), (2.7).

При условии $a=3\beta/2, b=\beta/2, c=2\beta$, где $\beta=\frac{3}{2}\left(\frac{B_*}{n_*+1}\right)^{2/(n_*+1)}$, напряжение σ_{et} совпадает с эквивалентным напряжением Хубера-Мизеса, а соотношения (1.5), (1.7) – с законом течения при приведенном октаэдрическом касательном напряжении и законом Нортона соответственно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аннин, Б.Д. Модели упругопластического деформирования трансверсально-изотропных материалов / Б.Д. Аннин // Сибирский журнал индустриальной математики. – 1999. – Т. 2. – № 2. – С. 197-200.
2. Никитенко, А.Ф. Ползучесть и длительная прочность металлических материалов / А.Ф. Никитенко. – Новосибирск: НГАСУ, 1997. – 278 с.
3. Работнов, Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций / Ю.Н. Работнов. – М.: Наука, 1966. – 752 с.
4. Цвелодуб, И.Ю. Постулат устойчивости и его приложения в теории ползучести металлических материалов / И.Ю. Цвелодуб. – Новосибирск: ИГиЛ СО АН СССР, 1991. – 202 с.

Приходько Н.Б., Фролов В.В.
N.B. Prikhodko, V.V. Frolov

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕСОВЫХ И АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК САМОЛЕТОВ СЕМЕЙСТВА МОДИФИКАЦИЙ С УЧЕТОМ ПРИНЦИПА ГЛУБОКОЙ УНИФИКАЦИИ

DEFINITION OF WEIGHT AND AERODYNAMIC PROPERTIES OF AIRCRAFTS WITHIN A SERIES IN ACCORDANCE WITH THE DEEP UNIFICATION PRINCIPLE

Приходько Нина Борисовна – аспирантка Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (г. Комсомольск-на-Амуре). E–mail: prikhodykonina@mail.ru.
Ms. Nina B.Prikhodko – PhD Candidate, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E–mail: prikhodykonina@mail.ru

Фролов Владимир Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология самолетостроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (г. Комсомольск-на-Амуре).
Mr. Vladimir V.Frolov – PhD in Engineering, Associate Professor at the доцент Department of Aviation Technologies, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur).

Аннотация: Рассмотрен механизм определения весовых и аэродинамических характеристик самолетов семейства модификаций, полученных путем использования принципов глубокой унификации. Выявлена связь между геометрическими размерами фюзеляжа и аэродинамическими характеристиками самолета.

Summary: The paper considers the problem of definition of weight and aerodynamic characteristics of aircrafts in the same series designed on the basis of the deep unification principle. A relation between the geometry of a fuselage and the aerodynamic performance of an aircraft is revealed.

Ключевые слова: аэродинамические характеристики, балансировка, масса, модификация, фюзеляж.

Keywords: Aerodynamic performance, balancing, weight, modification, fuselage.

УДК 553.6.013

В настоящее время уделяется внимание созданию высокоэффективной (экономичной) авиации. Такому подходу отвечает создание самолетов путем планирования семейств модификаций [1]. Это предусматривает необходимость расчета весовых и аэродинамических характеристик самолетов семейства модификаций. В известной литературе данной задаче не уделяется должного внимания, поэтому в предлагаемой работе этот вопрос рассматривается более подробно.

Представим модель перехода от базового самолета к его модификациям (см. рис. 1) с использованием принципов глубокой унификации. Эти принципы заключаются в максимальном сохранении неизменных свойств отдельных агрегатов (геометрических размеров и масс), оборудования и систем самолета, обеспечивающих минимальные затраты в его производстве и эксплуатации.

Поступила в редакцию 20.04.2010 г.

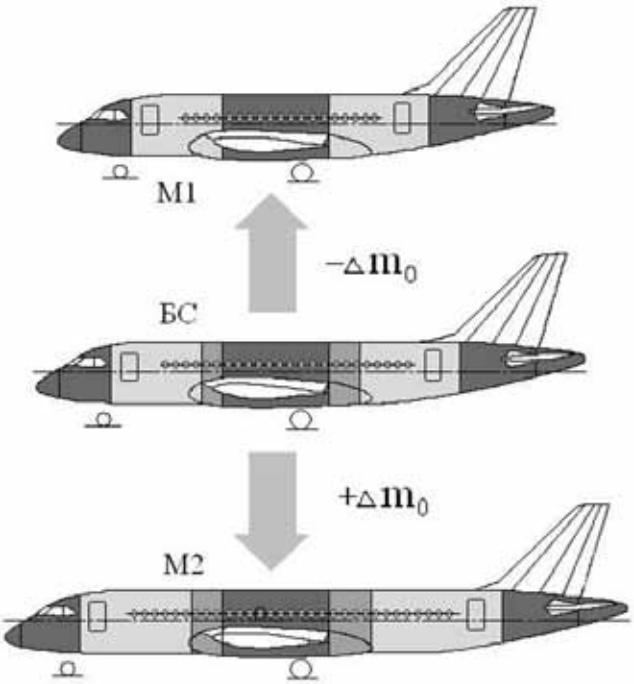


Рис. 1. Схема перехода от базового самолета к модификациям:
БС – базовый самолет; М1 – модификация в сторону уменьшения;
М2 – модификация в сторону увеличения

Модель перехода от базового самолета к его модификациям предусматривает изменение геометрических размеров фюзеляжа как в сторону увеличения его длины, так и в сторону уменьшения. Тогда как все остальные размеры самолета остаются неизменными. При этом в базовый самолет закладываются все необходимые свойства (прочность, жесткость, надежность и т.п.), обеспечивающие функционирование самолета наибольшей массы из семейства модификаций.

При увеличении (уменьшении) длины фюзеляжа будут меняться, во-первых, массы конструкции самолета, оборудования пассажирской кабины, кабельной сети, покрытия и оперативного снаряжения. Ниже приведены весовые модели вышеназванных зависимостей.

Рассмотрим конструкцию фюзеляжа. В зависимости от его длины согласно рис. 1 будут меняться:

1 Масса конструкции пропорциональна изменению длины цилиндрической части фюзеляжа:

$$\Delta m_{\text{кон.ф.}} = \frac{m^{\text{БС}}_{\text{цил.отс.}}}{l^{\text{БС}}_{\text{цил.отс.}}} \Delta l_{\text{ф}},$$

где $\Delta m_{\text{кон.ф.}}$ – изменение массы конструкции фюзеляжа при переходе от БС к М1 (М2); $\Delta l_{\text{ф}}$ – изменение длины цилиндрической части фюзеляжа при переходе от БС к М1 (М2); $m^{\text{БС}}_{\text{цил.отс.}}$ – масса цилиндрической части фюзеляжа БС; $l^{\text{БС}}_{\text{цил.отс.}}$ – длина цилиндрической части фюзеляжа БС.

2 Масса оборудования пассажирской кабины пропорциональна как длине цилиндрической части фюзеляжа, так и количеству пассажиров:

$$\Delta m_{\text{обор.пас.каб}} = \frac{m^{\text{БС}}_{\text{интерьер}}}{l^{\text{БС}}_{\text{цил.отс.}}} \Delta l_{\text{ф}} + \Delta n_{\text{пас}} a_{\text{кр.+серв.пан.}},$$

где $\Delta m_{\text{обор.пас.каб}}$ – изменение массы оборудования пассажирской кабины при переходе от БС к М1 (М2); $m^{\text{БС}}_{\text{интерьер}}$ – масса интерьера пассажирской кабины (панели потолочные и боковые, напольное покрытие, багажные полки, светотехническая арматура); $\Delta n_{\text{пас}}$ – изменение количества пассажиров при переходе от БС к М1 (М2); $a_{\text{кр.+серв.пан.}}$ – масса пассажирской сервисной панели и масса кресла, приходящиеся на одного пассажира.

3 Масса кабельной сети пропорциональна изменению длины фюзеляжа:

$$\Delta m_{\text{каб.сеть}} = \frac{m^{\text{БС}}_{\text{каб.сеть}}}{l^{\text{БС}}_{\text{ф}}} \Delta l_{\text{ф}},$$

где $\Delta m_{\text{каб.сеть}}$ – изменение массы кабельной сети фюзеляжа при переходе от БС к М1 (М2); $m^{\text{БС}}_{\text{каб.сеть}}$ – масса кабельной сети БС; $l^{\text{БС}}_{\text{ф}}$ – длина фюзеляжа БС.

4 Масса покрытия пропорциональна площади омываемой поверхности:

$$\Delta m_{\text{покр.}} = \frac{m^{\text{БС}}_{\text{покр.}}}{S^{\text{БС}}_{\text{ом.}}} \Delta S,$$

где $\Delta m_{\text{покр.}}$ – изменение массы покрытия фюзеляжа при переходе от БС к М1 (М2); $m^{\text{БС}}_{\text{покр.}}$ – масса покрытия БС; $S^{\text{БС}}_{\text{ом.}}$ – площадь омываемой поверхности БС; ΔS – изменение площади омываемой поверхности фюзеляжа при переходе от БС к М1 (М2).

5 Масса оперативного снаряжения пропорциональна количеству пассажиров:

$$\Delta m_{\text{пас.опер.снар.}} = \Delta n_{\text{пас}} b_{\text{пас.опер.снар}},$$

где $\Delta m_{\text{пас.опер.снар.}}$ – изменение массы пассажирского оперативного снаряжения (продукты, напитки, спасательные жилеты, заправляемая вода) при переходе от БС к М1 (М2); $b_{\text{пас.опер.снар}}$ – масса пассажирского оперативного снаряжения, приходящаяся на одного пассажира.

Таким образом, изменение массы снаряженного самолета составит:

$$\Delta m_{\text{снар.сам.}} = \Delta m_{\text{кон.ф.}} + \Delta m_{\text{обор.пас.каб}} + \Delta m_{\text{каб.сеть}} + \Delta m_{\text{покр.}} + \Delta m_{\text{пас.опер.снар.}}.$$

Во-вторых, будет меняться центровка, которую можно рассчитать по известной формуле

$$\Delta x_{\text{т}} = \frac{\sum (m_i + \Delta m_i)(x_i + \Delta x_i)}{m_0 + \sum \Delta m_i},$$

где m_i – масса i-го элемента; Δm_i – приращение массы i-го элемента; x_i – координата i-го элемента; Δx_i – приращение координаты i-го элемента; m_0 – взлетная масса БС.

В-третьих, изменятся аэродинамические характеристики самолета: коэффициент профильного сопротивления фюзеляжа и коэффициент балансировочного сопротивления самолета.

Расчет изменения коэффициента сопротивления фюзеляжа при переходе от БС к М1 (М2) определим по формуле [2]

$$\Delta Cx_{\text{тр.ф.}} = \frac{\eta_{\text{М}}}{S}\left(c_f^{\text{БС}} \eta_\lambda^{\text{БС}} S^{\text{БС}}_{\text{бок}} - c_f^{\text{М1(М2)}} \eta_\lambda^{\text{М1(М2)}} S^{\text{М1(М2)}}_{\text{бок}}\right),$$

где η_M – коэффициент, учитывающий влияние сжимаемости на характер течения в пограничном слое, определяется по формуле [2, 22]; S – площадь крыла; $c_f^{БС}$, $c_f^{M1(M2)}$ – коэффициенты трения плоской пластины без учета сжимаемости, величина которых определяется либо аналитически, либо по графику [2, 21]; $\eta_\lambda^{БС}$, $\eta_\lambda^{M1(M2)}$ – коэффициенты, учитывающие переход от плоской пластины к фюзеляжу, определяемые с помощью графика [2, 26]; $S_{бок}^{БС}$, $S_{бок}^{M1(M2)}$ – площади омываемой поверхности фюзеляжей.

Расчет изменения коэффициента балансировочного сопротивления определим следующим образом. Из условия равновесия моментов при изменении центровки получим дополнительную подъемную силу на горизонтальном оперении:

$$\Delta Y_{го}\left(\overline{L}_{го} + \Delta\overline{x}_{ф}^{хв}\right) = \Delta\overline{x}_{т} G,$$

где $\Delta Y_{го}$ – приращение подъемной силы на горизонтальном оперении; $\overline{L}_{го}$ – плечо горизонтального оперения относительное (определяется как $L_{го}/b_{САХ}$); $\Delta\overline{x}_{ф}^{хв}$ – относительное приращение хвостовой части фюзеляжа; $\Delta\overline{x}_{т}$ – относительное приращение центра тяжести самолета; G – взлетный вес самолета.

Откуда

$$\Delta Y_{го} = \frac{\Delta\overline{x}_{т} G}{\left(\overline{L}_{го} + \Delta\overline{x}_{ф}^{хв}\right)} = \Delta Y_{кр}.$$

Определим изменение аэродинамического сопротивления самолета при появлении дополнительной подъемной силы на горизонтальном оперении:

$$\Delta X_{бал} = \frac{\Delta Y_{кр}}{K_{крейс}} = \frac{\Delta\overline{x}_{т} G}{\left(\overline{L}_{го} + \Delta\overline{x}_{ф}^{хв}\right) K_{крейс}},$$

где $K_{крейс}$ – аэродинамическое качество при крейсерском режиме полета.

Выразим дополнительное сопротивление через $X_{бал}$ по формулам, полученным для крейсерского режима полета:

$$\Delta X_{бал} = \Delta Cx_{бал} qS,$$

где; q – скоростной напор; $Cx_{бал}$ – приращение коэффициента балансировочного сопротивления:

$$\Delta Cx_{бал.} = \frac{Cx_{крейс}\Delta\overline{x}_{т}}{\left(\overline{L}_{го} + \Delta\overline{x}_{ф}^{хв}\right)},$$

где $Cx_{крейс}$ – коэффициент аэродинамического сопротивления на крейсерском режиме:

$$Cx_{крейс} \approx 1{,}5 Cx_0,$$

где Cx_0 – коэффициент сопротивления при нулевой подъемной силе.

$$\Delta Cx_{бал.} = \frac{1{,}5 Cx_0 \Delta\overline{x}_{т}}{\left(\overline{L}_{го} + \Delta\overline{x}_{ф}^{хв}\right)}.$$

Таким образом, суммарное приращение коэффициента сопротивления составит:

$$\Delta Cx = \Delta Cx_{тр.ф.} + \Delta Cx_{бал.}.$$

В качестве примера (см. табл. 1) рассмотрим семейство модификаций RRJ с базовым самолетом RRJ75 (см. рис. 1).

Таблица 1

Данные расчета

Характеристики	Модификации		
	М1 (RRJ60)	БС (RRJ75)	М2 (RRJ95)
Взлетная масса, кг	38585	42280	45880
Коммерческая нагрузка, кг	6000	7500	9800
Топливо, кг	10685	11610	8677
$\overline{x}_т$, %	15	17	22
$\Delta Cx_{тр.ф.}$	–0,00076	–	0,00064
$\Delta Cx_{бал.}$	0,00019	–	0,00042
ΔCx	–0,00058	–	0,00106
$K_{крейс}$	16,256	15,988	15,495
$V_{крейс}$, км/ч	829	829	829
$C_р$	0,658	0,670	0,670
$\overline{m}_{топл}$	0,277	0,275	0,189
L, км	6637	6347	4017
Lmax, км	7879	6816	5996

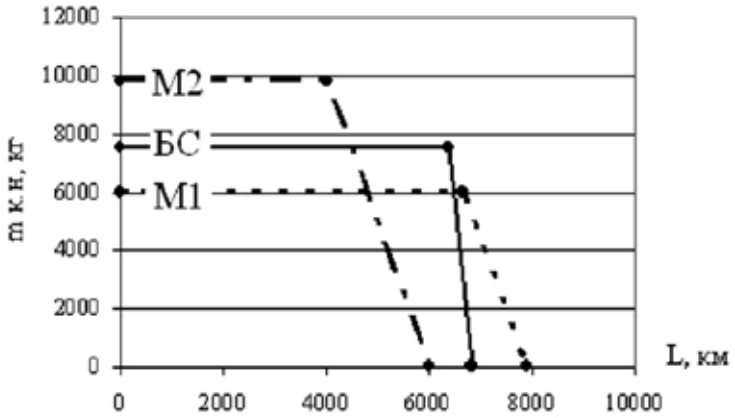


Рис. 2. Диаграмма зависимости дальности
от коммерческой нагрузки

Представленная методика расчета аэродинамических и весовых характеристик позволяет на этапе проектирования семейств модификаций уточнить аэродинамические и весовые характеристики самолетов в семействах модификаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шейнин, В.М. Роль модификаций в развитии авиационной техники / В.М. Шейнин, В.М. Макаров. – М.: Наука, 1982.
2. Югов, О.К. Согласование характеристик самолета и двигателя / О.К. Югов, О.Д. Селиванов. – М.: Машиностроение, 1975. – С. 204.

Сериков А.В., Герасименко Т.В.
A.V. Serikov, T.V. Gerasimenko

ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В БЫТОВОМ ЭЛЕКТРОРАДИАТОРЕ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ТИПА

THERMAL PROCESSES IN A TRANSFORMER TYPE HOUSEHOLD HEATER

Сериков Александр Владимирович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kem@knastu.ru.
Mr.Alexander V.Serikov — PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Electro Technical Engineering, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kem@knastu.ru.

Герасименко Татьяна Владимировна — кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kem@knastu.ru.
Ms.Tatiana V.Gerasimenko — PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Electro Technical Engineering, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kem@knastu.ru.

Аннотация: Приведена конструкция электрорадиатора трансформаторного типа. Рассмотрены особенности и результаты моделирования теплового поля. Предложена методика теплового расчета для инженерного проектирования таких устройств. Показаны сравнительные результаты тепловых расчетов и испытаний макетного образца.

Summary: The paper presents the design of a transformer-type household heater. Properties of its thermal field are considered and the results of modeling presented. A procedure for heat calculation for the engineering design of such devices is offered. Comparative results of thermal calculations and tests of a prototype are given.

Ключевые слова: электрорадиатор трансформаторного типа, тепловой расчет, макетный образец, испытания.

Keywords: transformer type electrical heater, thermal calculation, prototype, test.

УДК 621.356 : 621.314.2

Электрорадиаторы трансформаторного типа по сравнению с традиционными электроотопительными приборами, имеющими в качестве нагревательных элементов открытые спирали или трубчатые электронагреватели (ТЭН), имеют более высокий класс электро- и пожаробезопасности и значительно долговечнее их, хотя немного уступают им по стоимости [2]. По сравнению с маслонаполненными электрорадиаторами, они обладают примерно одинаковыми массогабаритными показателями и стоимостью, но менее пожароопасны, более долговечны, а также имеют меньшую тепловую инерцию.

Поступила в редакцию 16.02.2010 г.

Электрорадиаторы трансформаторного типа представляют собой трансформатор с короткозамкнутым вторичным контуром (обмоткой), не имеющим ни электрической, ни тепловой изоляции. Первичная обмотка включается в сеть. Электродвижущая сила вторичного контура настолько мала (менее 2 В), что опасность поражения электрическим током отсутствует. Основная часть тепла выделяется во вторичном контуре. Для улучшения теплоотдачи вторичный контур имеет весьма большую площадь поверхности.

Основными частями рассматриваемого электроотопительного устройства (см. рис. 1, *а*) являются индуктор 1 и вторичный короткозамкнутый контур, состоящий из электропроводящего листа 2 с отверстиями 3 для циркуляции воздуха. Края листа, изогнутого в П-образную форму, соединяются между собой посредством торцевых переходных элементов 4 и центральной трубки 5, выполненных также из электропроводящих материалов.

Индуктор однофазных нагревательных элементов трансформаторного типа (см. рис. 1, *б*) состоит из замкнутого шихтованного ферромагнитного сердечника 1 и первичной обмотки 2, охватывающей сердечник. Для обеспечения высокой степени электробезопасности индуктор помещается в электроизоляционный кожух и заливается компаундом. Тороидальная конструкция магнитной системы индуктора позволяет существенно уменьшить магнитное поле рассеяния, а также избежать стыковых соединений участков магнитопровода, следовательно, уменьшить потери, величину намагничивающего тока, повысить коэффициент полезного действия и коэффициент мощности нагревательного элемента. Первичная обмотка нагревательного элемента выполняется из медного или алюминиевого изолированного провода круглого сечения, равномерно намотанного на сердечник 1.

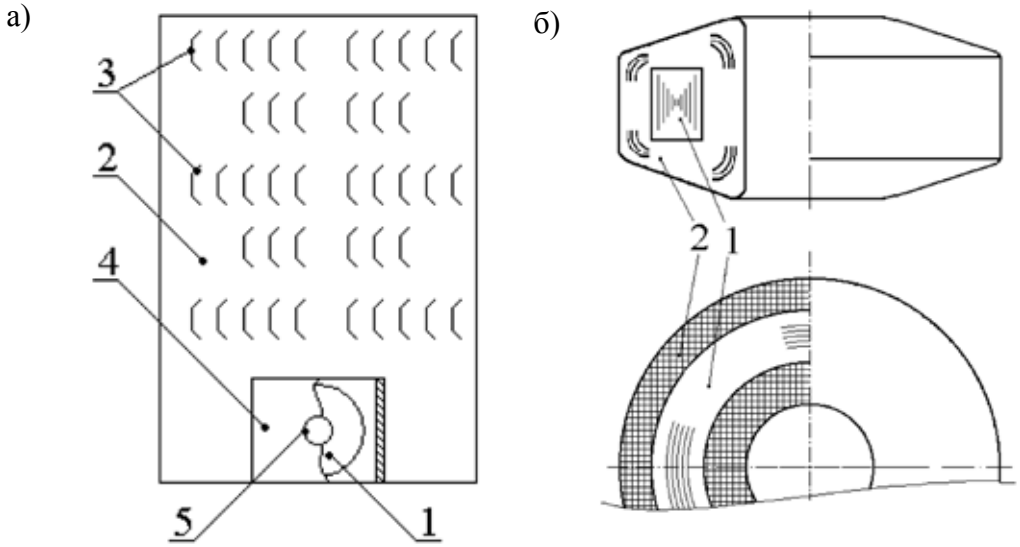


Рис. 1. Электрорадиатор трансформаторного типа (а)
и однофазный тороидальный индуктор (б)

Одной из важных задач при проектировании электронагревательных устройств является анализ их теплового состояния, который позволяет решить следующие вопросы: анализ распределения температуры внутри нагревательного элемента; правильность выбора электромагнитных нагрузок; анализ распределения температуры и тепловых потоков с целью выработки рекомендаций по выбору электромагнитных нагрузок, оптимизации конструкции и т.п. Кроме этого величины температур различных частей бытового электроотопительного прибора должны удовлетворять требованиям стандарта [1].

Целью работы является моделирование теплового поля электрорадиатора трансформаторного типа, разработка рекомендаций для инженерных расчётов теплового состояния прибора и экспериментальное подтверждение правильности расчетов.

Наибольший интерес и важность представляет распределение температурного поля в тороидальном индукторе, поэтому область исследования определяется исходя из особенностей его конструкции. Расчет теплового поля индуктора проводился методом конечных элементов.

Так как максимальные температуры прибора будут иметь место в установившемся режиме работы, то целесообразно рассматривать этот режим, тепловое поле в котором является стационарным. Учитывая особенности тороидальной конструкции индуктора и приняв в рассмотрение лишь часть торцевого переходного элемента, представляющего собой круг диаметром, равным диаметру индуктора, расчёт производился в цилиндрической системе координат (r, z, φ) при следующих допущениях:

1) температурное поле осесимметрично ($\frac{\partial T}{\partial \varphi}=0$), что обосновывается симметричностью конструкции, распределением потерь мощности и расположением поверхностей охлаждения;

2) условиями симметрии на поверхности являются однородные граничные условия второго рода $\frac{\partial T}{\partial n}=0$, где n – внешняя нормаль к границе;

3) область исследования кусочно-однородна, а коэффициенты теплопроводности материалов и мощность источников тепла не зависят от температуры;

4) главные оси анизотропии сред совпадают с осями координат r и z.

Область исследования имеет вид, изображенный на рис. 2.

С учетом принятых допущений температурное поле описывается дифференциальным уравнением вида:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda_r\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)+p_0=0,$$

где T – температура, °С; λ_r, λ_z – коэффициенты теплопроводности сред по осям r и z соответственно, Вт/(м·°С); p_0 – удельная мощность источников тепла, Вт/м^3.

На внешних поверхностях индуктора и вторичного контура будут выполняться граничные условия конвективной теплоотдачи в воздух и условия теплоотдачи излучением:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_{пов1}=-\frac{\alpha_л\left(T_{пов1}-T_{пов2}\right)+\alpha_к\left(T_{пов1}-T_o\right)}{\lambda_n},$$

где λ_n – коэффициент теплопроводности в направлении нормали, Вт/(м·°С); $T_{пов1}$ – температура на граничной поверхности, °С; $T_{пов2}$ – температура поверхности, которая принимает излучение, °С; T_o – температура воздуха на достаточном удалении от граничной поверхности, °С; $\alpha_л$ – коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/(м^2·°С); $\alpha_к$ – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м^2·°С).

В рассматриваемой области тепловое излучение происходит между всеми нагретыми поверхностями. Лист вторичного контура и торцевые переходные элементы своими внешними поверхностями излучают в открытое пространство, а внутренними сторонами обмениваются излучением с кожухом индуктора и стержнем (см. рис. 2). Для упрощения рассматриваются тепловые излучения, которые существенно влияют на распределение температурного поля.

Коэффициенты теплоотдачи излучением на каждом шаге находим по формуле [3], Вт/(м^2·°С)

$$\alpha_л = \frac{5{,}76\varepsilon_{12}}{T_{пов1} - T_{пов2}}\left[\left(\frac{T_{пов1}+273}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{пов2}+273}{100}\right)^4\right],$$

где ε_{12} – приведенная степень черноты.

Приведенную степень черноты вычисляем по формуле

$$\varepsilon_{12} = \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{S_1}{S_2}\left(\frac{1}{\varepsilon_2}\right)\right)^{-1},$$

где ε_1 – степень черноты одного из тел, участвующих в излучении (тело, для которого идет расчет $\alpha_л$); ε_2 – степень черноты второго тела, участвующего в излучении; S_1 – площадь поверхности первого тела, м^2; S_2 – площадь поверхности второго тела, м^2.

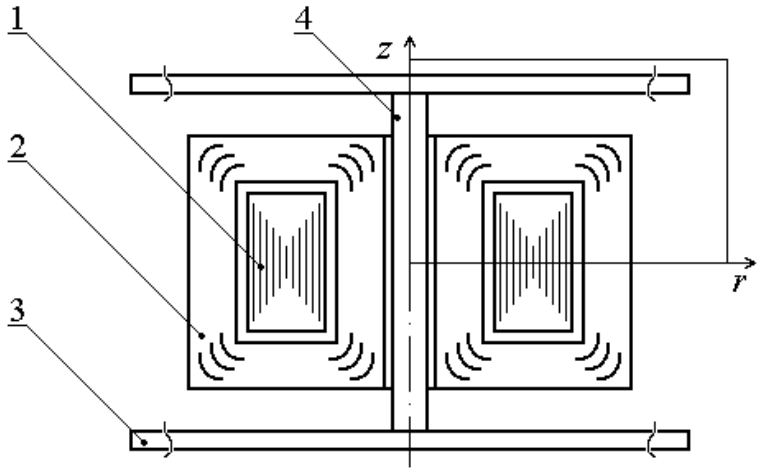


Рис. 2. Область исследования температурного поля:
1 – магнитопровод; 2 – первичная обмотка; 3 – торцевые переходные элементы; 4 – центральная трубка

Для вычисления коэффициента теплоотдачи при естественной конвекции необходимо определить характер развития пограничного слоя теплоотдающих поверхностей. В работе вид режима естественной конвекции не определялся. Расчет коэффициента конвективной теплоотдачи производился по формулам для различных видов течения и выбирался из результатов наибольший [3]. Использовались следующие формулы для различных режимов:

а) для пленочного режима

$$\alpha_к = \frac{A_0}{100 \cdot l};$$

б) для слабого ламинарного течения

$$\alpha_к = A_1 \sqrt[8]{\frac{\Delta T}{l^5}};$$

в) для ламинарного режима

$$\alpha_к = A_2 \sqrt[4]{\frac{\Delta T}{l}};$$

г) для турбулентного режима

$$\alpha_к = A_3 \sqrt[3]{\Delta T},$$

где A_0, A_1, A_2, A_3 – коэффициенты для различных режимов, зависящие от температуры пограничного слоя; l – характерный размер, м; ΔT – перепад температуры между поверхностью и воздухом на достаточном удалении, °С.

Еще одно допущение, упрощающее расчет, заключается в том, что воздушный зазор между стержнем вторичного контура и кожухом индуктора считается твердым слоем с эквивалентной теплопроводностью.

Эквивалентный коэффициент теплопроводности воздушного слоя, который считается по допущению твердым слоем, определяется по формуле, Вт/(м·°С):

$$\lambda_{\text{экв}} = 0{,}18\lambda_b(\mathrm{Pr}\cdot\mathrm{Gr})^{0{,}25},$$

где λ_b – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·°С); Pr – критерий Прандтля; Gr – критерий Грасгофа.

Расчёт теплового поля производится методом конечных элементов.

Так как распределение температурного поля однотипно для всего ряда мощностей, то рассмотрим результаты моделирования для мощности 650 Вт. На графике (см. рис. 3) проиллюстрировано распределение температуры в расчетной области по оси симметрии ($z = 0$).

Анализируя результаты расчета теплового поля, можно сделать следующие выводы:

– распределение температуры в сечении нагревательного элемента трансформаторного типа происходит крайне неравномерно. Равномерное распределение температуры можно наблюдать лишь в стержне вторичного контура, в торцевых переходных элементах вторичного контура происходит постепенное уменьшение температуры от центра элемента к краю;

– в индукторе распределение температуры неравномерное и максимальные значения наблюдаются в источниках тепла (сердечник и внутренняя часть первичной обмотки). Наибольший перепад температуры (до 50 °С) наблюдается в зазоре между индуктором и стержнем вторичного контура.

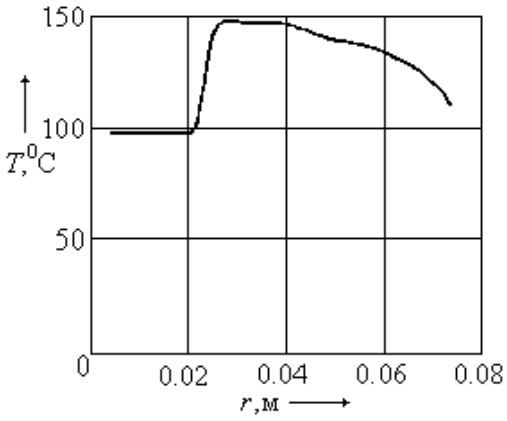


Рис. 3. Распределение температуры вдоль оси r при $z = 0$

Оценить тепловое состояние индуктора при инженерных расчетах электрорадиаторов трансформаторного типа рекомендуется с помощью следующей методики.

Площадь поверхности охлаждения индуктора, м^2:

$$S_{o1} = \pi\cdot D_н\cdot B_г + 0{,}5\cdot\pi\cdot(D_н^2 - D_в^2),$$

где $D_н$ – наружный диаметр индуктора (кожуха), м; $B_г$ – высота индуктора (кожуха), м; $D_в$ – диаметр окна (внутренний диаметр) индуктора, м.

Средний коэффициент теплоотдачи с поверхности индуктора, Вт/(м^2·°С):

$$\alpha_{и} = 1{,}3 \cdot \sqrt[4]{\frac{0{,}92(T_p - T_o)}{D_н}} + 10 \cdot \frac{0{,}92 \cdot T_p - 85}{0{,}92 \cdot T_p - 20},$$

где T_p, T_o – рабочая температура обмотки и температура окружающей среды соответственно, °С.

Перепад температуры на поверхности индуктора, °С:

$$\Delta T_1 = \frac{p_u}{\alpha_u \cdot S_{o1}},$$

где p_u – полная мощность тепловыделений в индукторе, Вт.

Перепад температуры в кожухе, °С:

$$\Delta T_2 = \frac{1{,}2 \cdot \delta_к \cdot p_u}{\lambda_к \cdot S_{o1}},$$

где $\delta_к$ – толщина кожуха индуктора, м; $\lambda_к$ – коэффициент теплопроводности кожуха, Вт/(м·°С).

Эквивалентный коэффициент теплопроводности обмотки поперек витков, Вт/(м·°С):

$$\lambda_o = 0{,}35\sqrt{\frac{d}{1{,}3d_i - d}},$$

где d, d_i – диаметры неизолированного и изолированного провода соответственно, м.

Перепад температуры в обмотке, °С:

$$\Delta T_3 = \frac{(A_в + A_н) \cdot p_и}{6 \cdot \lambda_o \cdot S_{o1}},$$

где $A_в$, $A_н$ – толщина обмотки по внутреннему и наружному диаметру соответственно, м.

Средняя температура обмотки, °С:

$$T_{ов} = T_o + \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3.$$

Одним из основных технических требований, предъявляемых к бытовым электрорадиаторам, является величина температуры внешней поверхности корпуса [1], которая в условиях нормальной эксплуатации не должна превышать температуру окружающего воздуха более чем на 85 °С. Исходя из гигиенических условий, температура корпуса электрорадиатора, предназначенного для дополнительного отопления жилых помещений, не должна превышать 95 °С, а для детских и лечебных учреждений – 85 °С. Корпусом в электрорадиаторе трансформаторного типа является вторичный контур. Оценить его тепловое состояние можно по известным методикам [3] в следующей последовательности.

Площадь поверхности излучения корпуса, м^2:

$$S_л = 2(L_к H_к + L_к B_к + H_к B_к),$$

где $L_к$, $H_к$, $B_к$ – длина, высота и ширина корпуса соответственно, м.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м^2·°С):

$$\alpha_к = 1{,}47 \cdot \sqrt[3]{(T_к - T_o)},$$

где $T_к$ – средняя температура корпуса, °С.

Полный средний коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2·°С):

$$\alpha = \alpha_к + \frac{S_л}{S_0}\alpha_л,$$

где S_0 – полная площадь теплоотдачи корпуса, м^2.

Средняя температура вторичного контура, °С:

$$T_2 = T_o + \frac{P_2}{\alpha \cdot S_0},$$

где P_2 – мощность вторичного контура, Вт

Для подтверждения правильности теоретических выводов создан макетный образец электрорадиатора трансформаторного типа мощностью 650 Вт (см. рис. 4). Кольцевой сердечник индуктора изготовлен из холоднокатаной электротехнической стали марки 3404 с толщиной листа 0,35 мм. На сердечнике равномерно намотана первичная обмотка из медного провода марки ПЭТ-155, которая имеет 524 витка. Между первичной обмоткой и магнитопроводом размещены термодатчики (термопара типа ТХК) для контроля температуры. Также термодатчики расположены на внешней и внутренней поверхностях кольцевого индуктора. Вся конструкция заливается компаундом с высоким коэффициентом теплопроводности и закрывается электроизоляционным кожухом из эпоксидного пресс-материала ВГС-Э. В центральном отверстии кожуха размещается короткозамыкающая трубка из алюминия марки АД0, которая приваривается к торцевым переходным элементам, а те, в свою очередь, к краям листа из алюминиевого сплава марки АМг5М, который является тепловыделяющим корпусом.

Рис. 4. Макетный образец электрорадиатора трансформаторного типа

Измерение температуры производилось после прогрева электрорадиатора в течение одного часа с помощью термопары (хромель-алюмель с коэффициентом κ = 0,041 мВ/^{0}С) с припаянным на конце медным диском диаметром 5 мм. Термо-ЭДС снималась вольтметром В7-22А. Результаты замеров показаны на рис. 5, *а*.

Проведенные испытания дали следующие результаты:

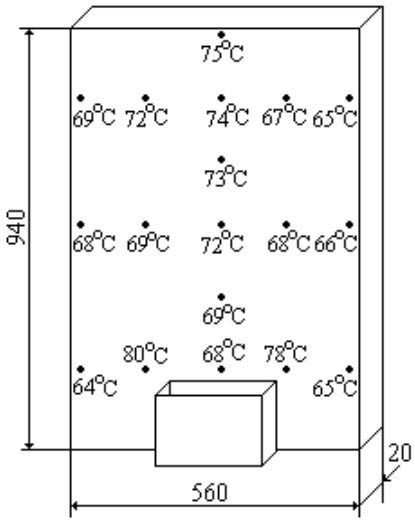
– время выхода электрорадиатора на установившийся режим из холодного состояния составило 9 мин;

– максимальная температура вторичного контура 80 °С наблюдается в зоне сварного шва между листом корпуса и переходным элементом;

– средний коэффициент теплоотдачи с поверхности листа вторичного контура составил $\alpha \approx 6$ Вт/(м^2·°С);

– коэффициент мощности 0,98;

а)



б)

Рис. 5. Результаты замера температур термопарой (а) и термографом (б)

– ЭДС вторичного контура 0,42 В, что значительно меньше допустимого по условиям безопасности напряжения прикосновения 2 В.

Для исследования температурного поля макетного образца применялся портативный компьютерный термограф ИРТИС-2000 (оптико-механический сканирующий инфракрасный прибор для визуализации и измерения тепловых полей). Картина температурного поля представлена на рис. 5, *б*.

По результатам расчётов и испытаний макетного образца получены сравнительные данные, которые приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительные результаты расчетов и эксперимента

Метод определения	Температура (максимальная), °С		
	Первичная обмотка	Магнитопровод	Вторичный контур
Расчет теплового поля методом конечных элементов	136 (149)	140 (147)	–
Тепловой расчет по схеме замещения	142	143	70
Эксперимент методом термопар	145	146	71 (80)
Эксперимент ИРТИС-2000	–	–	69 (79)

Таким образом, результаты испытаний макетного образца полностью подтвердили правильность выполненных расчётов температурного поля и адекватность разработанной инженерной методики теплового расчёта индуктора и вторичного контура с помощью схемы замещения. Предложенную методику целесообразно использовать для оценки теплового состояния при проектировании бытовых электрорадиаторов трансформаторного типа дополнительного обогрева с короткозамкнутой вторичной обмоткой, играющей роль тепловыделяющего элемента.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 16617-87. Электроприборы отопительные бытовые. Общие технические условия. – Взамен ГОСТ 308-78, ГОСТ 16617-80, ГОСТ 18476-81; Введ. 05.10.87. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 28с.
2. Кузьмин, В.М. Электронагревательные устройства трансформаторного типа / В.М. Кузьмин. – Владивосток: Дальнаука, 2001. – 144 с.
3. Сипайлов, Г.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах: учебник для вузов / Г.А. Сипайлов, Д.И. Санников, В.А. Жадан. – М.: Высш. шк., 1989. – 238 с.

Климаш В.С.
V.S.Klimash

ПОСТРОЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ФАЗЫ И РЕГУЛЯТОРОВ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

DESIGNING PHASE TRANSFORMERS AND QUALITY REGULATORS OF ELECTRIC POWER ON THE BASIS OF FREQUENCY TRANSFORMERS

Климаш Владимир Степанович – доктор технических наук, профессор кафедры «Промышленная электроника» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета, Россия, Комсомольск-на-Амуре.
Почтовый адрес: Владимир Степанович Климаш, технический университет, ул. Ленина 27, Комсомольск-на-Амуре, Россия, 681013. телефон:(4217) 53-60-09, факс:(4217) 53-61-50 E-mail:: root@knastu.ru
Mr. Vladimir Klimash – Doctor of Electrical Engineering, Professor of the Department of Industrial Electronics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Russia. Mailing address: Vladimir Klimash, State Technical University, 27 Lenin Av, Komsomolsk-on-Amur Phone :(4217) 53-60-09 Fax:(4217) 53-61-50 E-mail: root@knastu.ru

Аннотация: Предложены новые схемные решения, предназначенные для быстрой и точной разгрузки питающей сети и, как следствие, для улучшения качества электроэнергии и повышения эффективности ее использования. Показана целесообразность использования этих схем для тяговых и промышленных подстанций.

Summary: New circuit designs are proposed for devices designated to relieve the load on the power network in a fast and accurate manner and, as a consequence, to improve the quality of electric power and the efficiency of its use. The optimal application of these circuits for tracing/industrial substations is illustrated.

Ключевые слова: питающая электросеть, мощность, энергия, компенсация, стабилизация напряжения, схемы.

Keywords: power supply network, power, energy, compensation, voltage stabilization, circuit designs.

УДК 621.314:621.382.2.072.1

В настоящее время электротехнической промышленностью не выпускаются вентильные преобразователи фазы. Не уделяется должного внимания им и в литературе. Вместе с тем, интерес к этим статическим преобразователям непрерывно возрастает и обусловлен необходимостью создания новых технологий повышения качества и экономии электроэнергии на базе средств силовой электроники.

Серийно выпускаемые преобразователи частоты регулируют переменное напряжение по двум координатам (частоте и амплитуде). Добавление третьей координаты (фазы) позволяет расширить область применения этих преобразователей [1]. Применительно к машине двойного питания (МДП) преобразователи с трехкоординатным управлением (рис. 1, а) улучшают энергетические показатели и динамические свойства. Заторможенная МДП с нагрузкой в цепи статора, эквивалентом которой является вольтодобавочный трансформатор (ВДТ), не требует регулирования частоты (рис. 1, б). В этом случае преобразователь [2] выполняет амплитудно-фазовое регулирование и предназначен для стабилизаторов трехфазного напряжения и компенсаторов реактивной энергии трансформаторных подстанций (КРЭСН).

Наиболее распространенными устройствами для регулирования параметров переменного тока являются преобразователи со звеном постоянного тока. В их состав входят два одинаковых диодно-транзисторных IGBT – модуля с широтно-импульсной модуляцией

Поступила в редакцию 04.05.2010 г.

(ШИМ), один из которых – активный выпрямитель, а другой – инвертор напряжения [3]. Они освоены промышленностью, стремительно совершенствуются и выпускаются во многих странах мира в качестве рекуперативных преобразователей амплитуды и частоты напряжения (ПЧ-Р) для частотно-регулируемого электропривода с асинхронными двигателями.

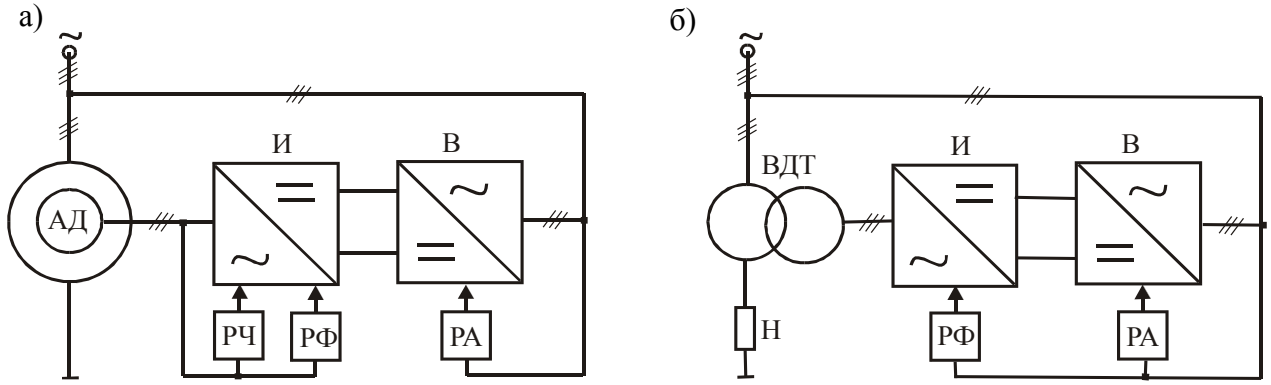


Рис. 1. Структурные схемы преобразователей с промежуточным звеном постоянного тока для АД в схеме МДП (а) и для ВДТ в схеме КРЭСН (б)

В преобразователях амплитуды и фазы напряжения (ПФ-Р) с двухсторонним обменом энергии (рекуперативных) для компенсаторов реактивной энергии со стабилизацией трехфазного напряжения (КРЭСН) [4; 5] с вольтодобавочными трансформаторами требуется частичная переработка ПЧ-Р, связанная с заменой асинхронного канала регулирования частоты на синхронизированный с сетью канал регулирования фазы и обеспечения требований надежности, предъявляемых к системам энергоснабжения. Такой подход позволяет с минимальными затратами на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, подготовку технологического оборудования и производства начать выпуск ПФ-Р для систем КРЭСН и СТН на специализированных предприятиях, выпускающих ПЧ-Р.

При добавлении к КРЭСН (рис. 1, б) LC- и (или) L-фильтров соответственно на выходе и входе ПФ-Р и специальных блоков формирования сигналов управления [6] расширяются функциональные возможности электронных систем регулирования качества электроэнергии промышленных и тяговых подстанций [7].

Регуляторы качества электроэнергии предназначаются для комплектных трансформаторных подстанций и выполняют дополнительно к двум функциям КРЭСН еще четыре – амплитудно-фазовое симметрирование и фильтрацию как входного напряжения, так и выходного тока силового трансформатора КТП.

В настоящее время трансформаторные подстанции находятся в условиях, которые приводят к снижению их энергетических показателей как со стороны сети, так и со стороны нагрузки. Применение регуляторов качества электроэнергии позволяет изменить ситуацию не только в отношении трансформаторной подстанции, но и производителей и потребителей электроэнергии. Устройство устраняет негативное влияние токов на выходе подстанции и фазных напряжений на ее входе. Это, в свою очередь, приводит к комплексному улучшению энергетических показателей подстанции, нагрузки, сети, а также к улучшению массогабаритных и технологических показателей силового трансформатора подстанции, вследствие того, что отпадает необходимость в отводах у обмоток и переключающих устройствах на его высокой стороне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 2166831 РФ, МКИ 7 H02M 5/44, H02J 3/12. Преобразователь амплитуды, фазы и частоты со звеном постоянного напряжения / В.С. Климаш, И.Г. Симоненко (Россия) // Открытия. Изобретения. – 2001. – № 13. – С. 405.
2. Пат. 28219А Украіна, МКИ 6 H02M 5/16. Перетворювач фази з ланкою постійного струму / В.С. Климаш (Россия), П.Д. Андріенко, В.Г. Тереннік, О.В. Міщенко (Украіна) // Открытия. Изобретения. – 1999. – № 8.
3. Соколовский, Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г.Г. Соколовский. – М.: Изд. центр «Академия», 2003. – 272 с.
4. Климаш, В.С. Вольтодобавочные устройства для компенсации отклонений напряжения и реактивной энергии с амплитудным, импульсным и фазовым регулированием: монография. – Владивосток: Дальнаука, ДВО РАН , 2002. – 141 с.
5. Пат. 2173015 РФ, МКИ G05F 1/30, 7 H02J 3/18. Вольтодобавочное устройство с тиристорным амплитудно-фазовым регулированием для компенсации реактивной мощности / В.С. Климаш (Россия). № 2000107174/09; заявл. 22.03.2000; опубл. 27.08.2001, Бюл. № 24. – 12 с.
6. Климаш, В.С. Анализ физических процессов компенсатора реактивной мощности с симметрированием тока сети и новым способом управления / В.С. Климаш, Д.П. Светлаков // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2007. – № 5. – С. 18-22.
7. Иньков, Ю.М. Компенсаторы неактивной энергии со стабилизацией напряжения трансформаторных подстанций / Ю.М. Иньков, В.С. Климаш, Д.П. Светлаков // Электротехника. – 2007. – №7. – С. 34-37

Жарков Р.В., Марьин Б.Н., Фролов Д.Н., Быченко В.Н., Волков К.В., Хохлов С.А.
R.V. Zharkov, B.N. Maryin, D.N. Frolov, V.N. Bychenko, K.V. Volkov, S.A. Hohlov

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ КРУПНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ НА ЦЕХОВОМ УРОВНЕ

A CONCEPTUAL MODEL OF AN INFORMATION SYSTEM FOR LARGESCALE UNDISTRIAL OPERATIONS MANAGEMENT AT SHOPFLOOR CONTROL LEVEL

Жарков Р.В. – аспирант кафедры «Информационные системы» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета
Mr. R.V. Zharkov — PhD Candidate, Komsomolsk-on-Amur State Technical University.

Марьин Б.Н. – доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и технология литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета.
Mr. B.N. Maryin — Doctor in Engineering, Professor, Komsomolsk-on-Amur State Technical University

Фролов Д.Н. – доцент кафедры «Информационные системы» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. E–mail: frolov fdn @ rambler.ru
Mr. Vladimir V.Frolov – PhD in Engineering, Associate Professor at the доцент Department of Aviation Technologies, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. E–mail: frolov fdn @ rambler.ru

Быченко В.Н. – первый заместитель министра по промышленности транспорту и связи Хабаровского края.
Mr. V.N. Bychenko — First Deputy Minister for Industry, Transport and Communications of the Khabarovsk Krai.

Волков К.В. – директор по производству ОАО «Амурметалл»
Mr. K.V. Volkov — Production director JSC “Amurmetal”

Хохлов С.А. – Генеральный директор управляющей компании ОАО «Амурметалл»
Mr. S.A. Hohlov — Director General of the Management Company JSC “Amurmetal”

Аннотация: В работе дается обоснование концептуального подхода к выбору модели управления крупносерийным производством с учетом особенностей его структурной иерархии в соответствии с уровнями управления на предприятии. Авторами предлагается передавать самостоятельность в реализации функций составления точного расписания работ, диспетчеризации и контроля текущего состояния производства в режиме реального времени цеховой подсистемы. Это – MES-системы (Manufacturing Execution Systems).

Summary: The paper provides a substantiation for a conceptual approach to the choice of a model for mass production management, with regard to its structural hierarchy reflecting management levels in a company. The authors suggest that the independent function of work scheduling, dispatching and real time production monitoring should be delegated to a shopfloor control subsystem. This is a MES-type system (Manufacturing Execution Systems).

Ключевые слова: информационная система, оперативное управление, MES-системы.

Keywords: information system, operational management, MES-system.

УДК 65.011.56

В условиях рыночной экономики одной из важнейших задач отечественной промышленности, особенно на крупных наукоемких предприятиях, является оперативное управление производством. Совершенствование методов управления производством продукции основывается на повышении эффективности и оперативности системы управления, широком использовании современных средств вычислительной техники и автоматизированных информационных систем (ИС) для анализа состояния производства, принимаемых при управлении производством решений и прогнозирования развития производства, использовании научного подхода и мирового опыта к решению проблем управления. С развитием вычислительной техники появились различные классы компьютерных информационных систем [4], одни применяются для управления финансово-хозяйственной деятельностью и выполнения планирования производства для всего предприятия, другие отражают оперативные процессы в производстве и нацелены на управление производственными процессами, составление точных расписаний работы оборудования и оперативное регулирование расписаний из-за возникающих отклонений в ходе производства. Существует класс ИС, целью которых является управление технологическими процессам на автоматизированном оборудовании с числовым программным управлением (ЧПУ).

Для выработки общей концепции информационной системы оперативного управления и планирования производства на крупном предприятии необходимо из всего многообразия классов информационных систем рассмотреть те системы, которые применяются при управлении производством, построить иерархию этих систем в соответствии с уровнями управления на предприятии (см. рис. 1), определить границы их действий и полномочий, функции и взаимосвязь друг с другом.

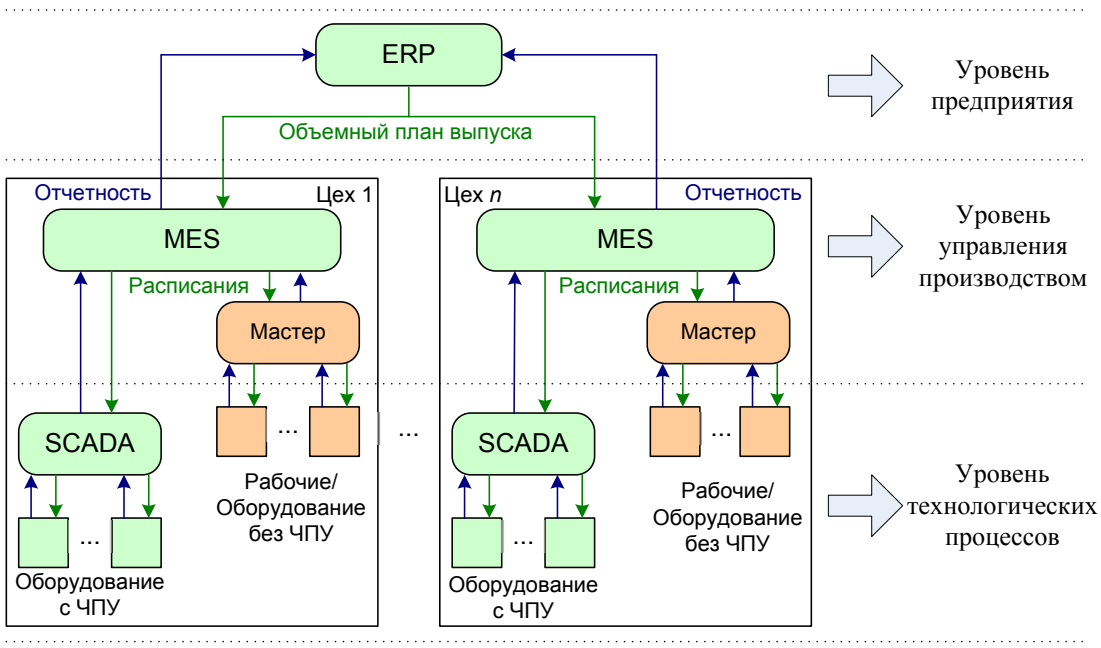


Рис. 1. Трехуровневая система управления на предприятии

Структуру современных автоматизированных систем управления производством на крупном промышленном предприятии можно представить в виде трех уровней информационных систем [3]. На верхнем уровне – уровне управления предприятием – функционирует ERP-система (Enterprise Resource Planning, Планирование ресурсов предприятия). С помощью систем данного класса решаются задачи стратегического характера – управление ресурсами предприятия, укрупненное или объемное планирование. В этой системе для каждого цеха, на основе расцеховки заказов, определяется – сколько и каких машин, узлов и деталей необходимо сделать к определенному сроку. Планирование на верхнем уровне реализовано

по методологии MRP II (Manufactory Resource Planning, Планирование производственных ресурсов) без учета текущего состояния производства, т.е. без учета наличия уже принятых к производству заказов и текущей загрузки производственных мощностей [1]. Время расчета плана на этом уровне достигает нескольких часов, а на крупном предприятии может длиться до суток.

Основными этапами планирования в ERP-системах являются:

1) получение основного производственного план-графика для всего предприятия;

2) планирование потребностей в материалах, мощностях и финансовых ресурсах на основе полученного план-графика производства;

3) контроль выполнения производственной программы производственными подразделениями.

Как только заказы из ERP поступают в цех, то фактически производство становится похожим на «черный ящик» со скрытыми производственными процессами, при этом нельзя точно сказать, к какому сроку будет выполнен тот или иной производственный заказ. Для сложных производств с многоуровневым составом и многотысячной номенклатурой изготавливаемых изделий точность и оптимальность получаемых планов не позволяет говорить об оперативном управлении производством, а выполнение заказов производственными подразделениями становится невозможным в запланированные ERP-системой сроки. Увеличение точности планирования, выполняемого с учетом состояния производства, могло бы привести к невозможности получения плана в разумные сроки. Поэтому лица, принимающие решения на предприятии, не могут использовать данные, получаемые из этих систем в целях оперативного управления, и работа в данных системах носит только учетно-отчетный характер. Следовательно, функции оперативного управления производством должна выполнять отдельная информационная система управления производством, менее нагруженная объемом номенклатуры планирования и находящаяся в самом производстве, т.е. работающая непосредственно в производственных подразделениях. Основными функциями такой системы должны быть составление точного расписания работ в цехе, его диспетчеризация и контроль текущего состояния производства в режиме реального времени.

Объемы работ, распределенные ERP-системой между цехами, в дальнейшем необходимо выполнить на конкретных единицах оборудования, с учетом их переналадок, ремонтов, отказов, транспортных и складских операций, кадрового состава операторов и станочников, других производственных факторов конкретного цеха и возмущений производственной среды. При выполнении объемов работ надо стремиться к тому, чтобы максимально плотно загрузить оборудование и, в то же время, стремиться к высвобождению лишних станков, необходимо так составить расписание работы цеха, чтобы минимизировать незавершенное производство (НЗП). За выполнение этих задач на втором уровне в структуре АСУП отвечает такой класс систем управления производством, как MES-системы (Manufacturing Execution Systems, Производственные исполнительные системы).

Обобщенная структурно-функциональная модель MES-системы, представляющая принцип работы MES-системы, изображена на рис. 2. Основными функциями, составляющими ядро этих систем, являются оперативно-календарное планирование и диспетчеризация производственных процессов в цехах – 5-й и 6-й функциональные блоки соответственно. Именно эти две функции определяют MES как систему оперативного характера, нацеленную на формирование выполнимых расписаний и оперативное управление производственными процессами в цехе. Полученное расписание работ в цехе является информацией, на которой основывается производственная деятельность в цехе.

Оперативность управления определяется быстротой реагирования на возникающие возмущения как во внутренней (отказы оборудования, отсутствие рабочих на рабочем месте, отсутствие технологии или материалов/заготовок в требуемый срок и пр.), так и во внешней (поступление новых заказов, изменение приоритета поступивших ранее заказов и пр.) среде. Показателем оперативности является выполнение цеховых заказов в требуемые сроки в условиях нестабильности как

внешней, так и внутренней производственной среды. Постоянные возмущения во внутренней производственной среде $\vec{W}$ делают невозможным выполнение составленных графиков выполнения работ в цехе, а частое неавтоматизированное перепланирование работ, если такое существует, просто невозможно из-за высокой частоты возникновения этих возмущений. Поступление срочных заказов, представляющих внешние возмущения производственной среды и изображенных пунктирной линией от функционального блока «Получение заказов цехом», требует оперативного изменения в графике работ цеха, что также влечет за собой перепланирование работ. Следовательно, любое составленное расписание работ оказывается невыполнимым без быстрой оперативной корректировки. Поскольку системы MES относятся к классу систем оперативного управления производством и в них имеется модуль диспетчеризации производства, то это снимает ряд проблем, связанных с возмущениями производственной среды. Система с заданным интервалом времени проверяет текущее состояние производства и при обнаружении отклонений $\Delta\vec{S}$ может перепланировать составленное ранее производственное расписание. Следует отметить, что автоматическое перепланирование расписания целесообразно осуществлять только при возникновении критических отклонений, влекущих срыв сроков выполнения заказов цехом, в остальных ситуациях решение о перепланировании принимает диспетчер или плановик цеха, но в любом случае лицо, принимающее решение, получит уведомление от системы о возникшем отклонении. По сравнению с ERP-системами, работающими по принципу выталкивающего планирования и выдающими жесткие директивные планы, MES-системы работают по принципу вытягивающего планирования, т.е. оперативно корректируют планы в процессе их исполнения.

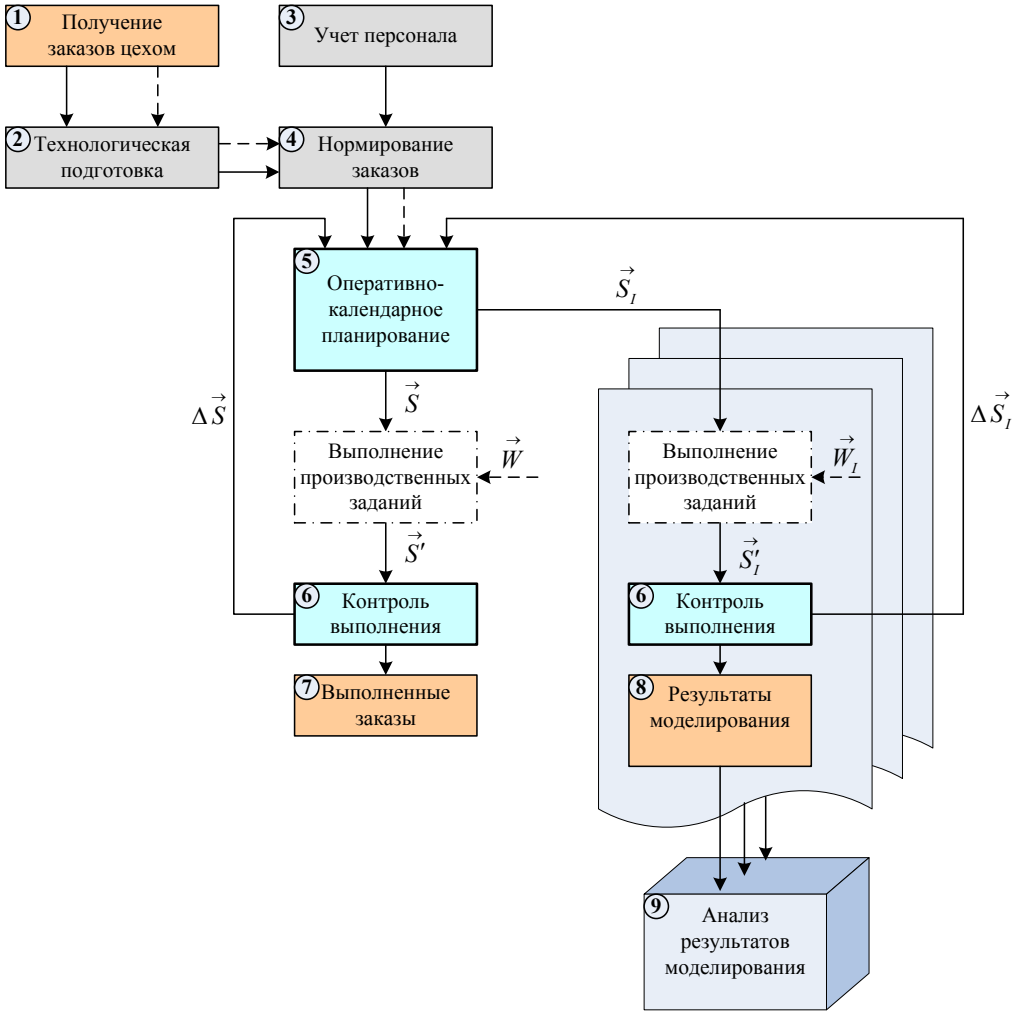


Рис. 2. Обобщенная структурно-функциональная модель MES-системы

На выполнимость составленного в MES-системе расписания работ, кроме возникающих внутренних и внешних возмущений, в значительной степени влияет подготовка производства. Если рабочие места к началу выполнения операций не будут обеспечены требуемым материалом, необходимыми приспособлениями, технологией, чертежами, то перепланирование будет только сдвигать вперед время выполнения таких операций, пока все требования к началу производства не будут удовлетворены. Но в ситуациях, когда эти требования невозможно удовлетворить в разумные сроки, MES-система не несет ответственности за возможный срыв сроков выполнения заказов. Система лишь может уведомить лицо, принимающее решение, о причине невыполнения операции и срыва сроков по заказу, что позволяет оперативно отреагировать и принять определенные управленческие решения для разрешения сложившейся ситуации.

Таким образом, производство становится более прозрачным, выявляются истинные причины невыполнения производственных заказов в сроки, появляется возможность руководству осуществлять непосредственный контроль хода выполнения производственной программы цехом и принимать заранее различные организационные и управленческие решения.

Управление производством в MES-системе носит оперативный характер, поэтому к пользователям системы предъявляются повышенные требования к оперативности внесения информации о событиях, происходящих в реальной производственной системе. Данное требование обусловлено необходимостью постоянного поддержания текущего состояния производства в информационной модели реальной производственной системы. Поскольку система работает всегда с реальными оперативными данными, то внесение в работающую модель системы любых изменений сказывается на дальнейшем ходе реального производства. В производстве может возникнуть ситуация, когда переданный цеху объем заказов не может быть выполнен в установленные сроки из-за ограниченности мощностей или цех внезапно получает срочный заказ, что также невозможно выполнить в требуемый срок на имеющихся мощностях. Тогда для выполнения такой задачи лицу, ответственному за выполнение плана производства цехом, необходимо искать пути выхода из сложившейся ситуации, например, привлекать рабочих на сверхурочную работу, увеличивать установленную сменность в цехе или на отдельном участке с одной смены до двух или трех, вводить дополнительные единицы оборудования. Причем не всегда с полной уверенностью можно сказать, что принимаемые меры окажутся достаточными. При принятии таких решений есть риск принять как недостаточные меры, вследствие которых все равно невозможно будет выполнить план, так и избыточные, которые приведут к лишним издержкам. Но определенно точно можно сказать, что результат будет виден только по итогам производства, а цена ошибки будет дорого стоить.

Принять правильное управленческое решение можно только при наличии оперативной достоверной информации и если человек, принимающий решения, будет знать о последствиях принятого решения. Выполнение первого условия обеспечивают модули MES-системы оперативно-календарное планирование и диспетчеризация. Удовлетворение второго условия возможно при использовании имитационного моделирования. С помощью этого научно-обоснованного метода оценок характеристик сложных систем можно получить прогноз состояния производственной системы с заданными начальными условиями [2]. Здесь речь идет о модуле MES-системы, который расширяет функциональные возможности этой системы и является источником знаний для принятия правильных и научно-обоснованных управленческих решений. Данный модуль позволит пользователю создавать несколько копий конфигурации и данных реальной производственной системы и экспериментировать с этими копиями, изменяя параметры конфигурации, например, добавляя смены, увеличивая продолжительность рабочего дня, вводя в эксплуатацию дополнительные единицы оборудования, изменяя критерии оптимизации построения расписания работ, вводя или убирая какие-либо ограничения в модель производственной системы и т.д. Под конфигурацией реальной производственной системы понимается совокупность параметров, определяющих функционирование системы, и характеристик, отражающих реальное состояние производственной

системы. После выполнения необходимых настроек проводится эксперимент над сконфигурированной копией в имитационной модели системы указанное количество раз. Целью эксперимента является оценка основных характеристик производственной системы, одними из которых являются выполнимость плана, загруженность оборудования и персонала, затраты производства и др., а также выявление причин возможного невыполнения плана. После этого анализ результатов эксперимента в виде рассчитанных параметров производственной системы, которые дают представление последствий принятия управленческих решений, предъявляется лицу, принимающему эти решения, для уверенного и научно-обоснованного их принятия применительно к реальной производственной системе. Возможность проводить эксперименты с копиями конфигурации и данных реальной системы с другой стороны определяет MES-систему как систему поддержки принятия решений при управлении производством.

Особенностью MES-систем является то, что они являются предметно-ориентированными для металлургии, машиностроения, деревообработки, полиграфии и пр., поэтому они тесно связаны с производственными процессами, которыми управляют, и для получения наибольшего эффекта от работы этих систем в их моделях должны быть максимально отражены особенности производства и технологий производственных процессов. Поиск оптимального расписания должен учитывать выбранные критерии оптимизации, соответствующие особенностям производства, в котором работает или должна работать MES-система. Использование модуля имитационного моделирования предъявляет еще более жесткие требования к адекватности модели производственной системы реальному объекту производства. В противном случае использование результатов имитационного моделирования неадекватной реальному объекту модели приведет лицо, принимающее решения, к заблуждению и принятию неправильного решения.

MES-системы играют важнейшую роль в повышении эффективности и оперативности управления производством, принятии правильных управленческих решений на основе своевременной и достоверной информации. Эти системы являются наиболее сложной частью общей системы управления предприятием, недостающим звеном оперативного управления и завершающим этапом планирования производства на предприятии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методология планирования MRP II и MRP II-системы. http://www.e-commerce.ru/biz_tech/implementation/management/metod_mrpII.html
2. Советов, Б.Я. Моделирование систем : учеб. для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – М.: Высш. шк., 2001. – 343 с.
3. Фролов, Е.Б. Оперативно-календарное планирование и диспетчирование в MES-системах. Часть I / Е.Б. Фролов, Р.Р. Загидуллин. http://erpnews.ru/doc2937.html.
4. Фролов Е.Б. MES-системы, как они есть или эволюция систем планирования производства. Часть II. / Е.Б. Фролов, Р.Р. Загидуллин. http://erpnews.ru/doc2593.html.

Учёные записки № II-1(2) 2010
Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета

Золотова Т.В.
T.V. Zolotova

ЛИНЕЙНЫЕ МИНИМАКСНЫЕ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ РИСКОМ В СЛОЖНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМАХ

LINEAR MINIMAX PROBLEMS OF RISK MANAGEMENT IN COMPLEX MANIFACTURING SYSTEMS

Золотова Татьяна Валерьяновна – кандидат физико-математических наук, доцент, докторант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. E-mail: tgold11@mail.ru.
Ms. Tatiana V. Zolotova – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, candidate for a doctor's degree, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: tgold11@mail.ru.

Аннотация: Предложен подход к управлению риском, основанный на решении двухкритериальной задачи с минимаксной функцией риска. Рассмотрены две свертки критериев. Предложены и обоснованы функции риска для динамических процессов.

Summary: An approach to risk management is suggested that is founded on the solution of a two-criteria problem with the minimax function. Two criteria convolutions are examined. Risk functions for dynamic processes are suggested and proved.

Ключевые слова: функция риска, приемлемый риск, минимакс, свертка критериев, задача линейного программирования.

Keywords: risk function, acceptable risk, minimax, convolution of criteria, linear programming problem.

УДК 338.45

Введение

Экономическая деятельность любой сложной системы ориентирована в первую очередь на получение как можно большего выигрыша (успеха). Однако функционированию и развитию многих сложных производственных систем [10] или процессов присущи элементы неопределенности или риска. Мы считаем, что в современных условиях становится актуальным совместное рассмотрение управленческих решений с точки зрения выигрыша и риска, позволяющее принимать выгодные решения с приемлемым уровнем риска, обеспечивающее при этом устойчивое функционирование сложной системы.

При определении риска как математического ожидания величины ущерба представляется целесообразным принимать во внимание все возможные виды опасных происшествий, аварий, катастроф, применительно к данному объекту. Тогда оценку риска [9] производят по сумме произведений вероятностей указанных событий на соответствующие ущербы:

$$Risk = \sum_{j=1}^{J} p_j U_j \,, \qquad (1)$$

где p_j – вероятность возникновения j-го неблагоприятного события; U_j – возможный ущерб от j-го неблагоприятного события, $j = 1,\ldots,J$.

Вся работа над риском носит общее название *управление риском* [2, 6, 7, 8].

Поступила в редакцию 20.04.2010 г.

В общем понимании под управлением риском понимается управление системой или процессом, непременным атрибутом которого являются процедуры учета и оценки факторов риска в целях максимального снижения неопределенности при принятии решений и обеспечения устойчивости (или безопасности функционирования) системы (снижения системного риска). Для решения проблемы минимизации риска при нахождении оптимальной программы деятельности сложной системы предлагается новый подход, связанный с введением функции риска, на выбор которой оказывают влияние характеристики процессов, происходящих в системе.

Пусть сложная система (экономическая, техническая и т.д.) состоит из n подсистем. Будем считать, что каждая из подсистем не влияет на деятельность любой другой подсистемы (коэффициент корреляции между параметрами любых двух подсистем равен нулю), вероятность возникновения более одного неблагоприятного события в системе мала (близка к нулю). Кроме того, управление в системе осуществляется согласно принципу осторожного поведения, исходя из того, что ситуация в системе может складываться наихудшим образом. Тогда для оценки риска всей системы вполне уместно использовать функцию риска, определенную в метрике l_∞:

$$R_\infty(x) = \max_{1\le i\le n} \sum_{j=1}^{J} p_{ij} U_j(i, x_i), \tag{2}$$

где $U_j(i, x_i)$ – возможный ущерб от j-го неблагоприятного события в i-й подсистеме; x_i – переменная, характеризующая деятельность i-й подсистемы; p_{ij} – вероятность возникновения j-го неблагоприятного события в i-й подсистеме.

В работе [11] функция риска (2) используется в задаче управления портфелем ценных бумаг. На наш взгляд, это не является уместным, так как бумаги, входящие в портфель, коррелированны. В то же время, использование функции риска (2) в производственных системах является вполне оправданным и осуществляется впервые.

Если деятельность системы направлена на увеличение значения некоторого критерия $F(x)$, определяющего величину выигрыша (успеха), то выбор управленческих решений, с точки зрения выигрыша и риска, сводится к решению следующей задачи:

$$\min_{x\in X} G(R_\infty(x); -F(x)), \tag{3}$$

где G – вид свертки критериев $R_\infty(x)$ и $F(x)$ [5]; X – область допустимых значений для вектора $x = (x_1, ..., x_i, ..., x_n)$. Значит, управление риском в системе сводится к конкретизации (3) и нахождению оптимального вектора $x = (x_1, ..., x_i, ..., x_n)$. Целью данного исследования является разработка новых математических моделей управления риском с использованием функции риска (2) и их применение к сложным производственным системам.

Постановка двухкритериальной производственной задачи с использованием функции риска

Предположим, что на предприятии существует n производственных процессов, не связанных между собой в одну технологическую цепочку. Каждый производственный процесс выпускает продукцию определенного вида в количестве x_i, $i = 1, ..., n$, вектор $x = (x_1, ..., x_i, ..., x_n)$ представляет собой производственный план предприятия. Прибыль с единицы продукции i-го производственного процесса в текущем производственном периоде составляет π_i, тогда прибыль со всех производственных процессов есть $\sum_{i=1}^{n} \pi_i x_i$. Однако любой производственный процесс сопряжен с неблагоприятными обстоятельствами на производстве, связанными, например, с авариями, увеличением концентраций вредных веществ в

производственной зоне, что, в свою очередь, приводит к повышению уровня заболеваемости персонала или снижению работоспособности. Такие обстоятельства наносят ущерб (или экономические потери) предприятию и, тем самым, приводят к уменьшению общей (суммарной) прибыли. Значит, любой производственный процесс связан с риском. При этом прибыль является случайной величиной, зависящей от значения риска, а ущерб может представлять собой потери прибыли, вызванные неблагоприятными событиями.

Ущерб (или риск) на единицу продукции i-го производственного процесса, связанный с неблагоприятными обстоятельствами, a_i оценивается в стоимостном выражении согласно определенной методике и учитывает все необходимые составляющие ущерба i-го производственного процесса [1]. Тогда, общий ожидаемый ущерб $Risk_i$ на i-м производственном процессе, согласно (1), равен величине

$$Risk_i = a_i x_i . \tag{4}$$

Руководство предприятия стремится так организовать производство, чтобы по возможности снизить ожидаемый ущерб, вызванный негативными техногенными событиями. Таким образом, руководство предприятия при определении производственной программы $x = (x_1,...,x_i,...,x_n)$ сталкивается с задачей управления риском.

Согласно вышесказанному, деятельность какого-либо производственного процесса не влияет на деятельность любого другого процесса на предприятии (коэффициент корреляции любых двух процессов равен нулю). Предположим, что вероятность возникновения более одной аварии или другого неблагоприятного обстоятельства на предприятии незначительна (близка к нулю). Разумное управление на любом предприятии, при котором его функционирование может быть устойчивым, предполагает осуществлять оценку именно максимального ущерба от возникновения возможных аварий и других событий, приводящих к потерям на производстве, т. е. предполагает действовать по принципу осторожного поведения. Поэтому выбор функции риска в виде (2) для данной производственной задачи можно считать вполне оправданным. Определим функцию риска в метрике l_∞, т. е. как максимальный ущерб по всем производственным процессам:

$$R_\infty(x) = \max_{1 \le i \le n} a_i x_i . \tag{5}$$

Задание функции риска в виде (5) объясняется также тем, что управление риском (его снижение) в данной задаче подразумевает изменение (уменьшение) значений $x_i, i = 1,...,n$, поэтому руководство предприятия может интересовать, например, тот производственный процесс, который потребует в текущем плановом периоде уменьшения интенсивности производственных процессов в первую очередь.

Рассмотрим двухкритериальную задачу нахождения такого плана производства, который по возможности максимизирует прибыль предприятия, и одновременно минимизирует значение функции риска (5). Эта задача может быть формализована разными способами, отделяющими те или иные решения из множества Парето.

1. *Формализация производственной задачи с помощью линейной свертки критериев*

Возьмем линейную свертку критериев типа суммы и рассмотрим следующую постановку задачи управления риском:

$$\max_{x \in X} [\lambda \sum_{i=1}^{n} \pi_i x_i - (1-\lambda) \max_{1 \le i \le n} a_i x_i], \tag{6}$$

где $X = \{ x \mid x_i \in [0; y_i], i = 1,...,n, Ax \le b \}$, y_i – величина спроса на продукцию i-го производственного процесса; A и b – технологическая матрица и вектор ограничений на ресурсы предприятия соответственно; $\lambda \in [0;1)$ – параметр, характеризующий степень избегания рис-

ка для предприятия. При $\lambda = 0$ руководство предприятия интересует только минимизация ущерба, вопрос максимизации прибыли при этом остается в стороне. Случай $\lambda = 1$ для задачи управления риском не имеет смысла. Приведем задачу (6) к стандартной форме задачи линейного программирования (ЗЛП):

$$\max_{x,z}[\lambda\sum_{i=1}^{n}\pi_i x_i - (1-\lambda)z]$$
$$a_i x_i \le z, \quad Ax \le b, \quad x_i \le y_i, x_i \ge 0, i = 1,...,n, z \ge 0. \tag{7}$$

Нахождение оптимального плана задачи (7) осуществляется известными методами решения ЗЛП [5].

2. *Формализация производственной задачи на основе принципа нормирования*

В настоящее время в основе многих практических мероприятий по управлению риском лежит *концепция приемлемого риска*, которая состоит в стремлении к снижению риска до безопасного уровня [1]. Предположим, что задан приемлемый уровень риска $Risk_{re}$, т. е. такое значение риска, при котором экономические показатели предприятия существенно не изменятся. Покажем два возможных механизма управления риском, в основе которых лежит концепция приемлемого риска.

Первый механизм управления риском требует, чтобы значение функции риска в оптимальной точке $x^0 = (x_1^0,...,x_i^0,...,x_n^0)$ не превышало значение приемлемого риска: $R_\infty(x^0) \le Risk_{re}$. Тогда задачу управления риском можно формализовать к виду

$$\max_{x}\sum_{i=1}^{n}\pi_i x_i$$
$$a_i x_i \le Risk_{re}, \quad Ax \le b, \quad x_i \le y_i, x_i \ge 0, i = 1,...,n.$$

Второй механизм управления риском подразумевает страхование от возможного ущерба. Пусть s – максимальная величина страхового возмещения, выбираемая предприятием и выплачиваемая страховой компанией в случае возникновения страхового случая, ущерб от которого не менее величины s; $k \in (0;1)$ – доля от страховой суммы s (страховая премия), которую платит предприятие страховой компании. Тогда задачу управления риском, основанную на линейной свертке критериев типа суммы и процедуре страхования, сформулируем в виде

$$\max_{x,s}[\lambda(\sum_{i=1}^{n}\pi_i x_i - ks) - (1-\lambda)\max(\max_{1\le i\le n} a_i x_i - s;0)]$$
$$Ax \le b, \quad x_i \le y_i, \quad x_i \ge 0, i = 1,...,n, s \ge 0. \tag{8}$$

Очевидно, что при оптимальном выборе s должно выполняться неравенство $s \le \max_{1\le i\le n} a_i x_i$. Учитывая это обстоятельство, сведем задачу (8) к ЗЛП:

$$\max_{x,s,z}[\lambda(\sum_{i=1}^{n}\pi_i x_i - ks) - (1-\lambda)(z-s)]$$
$$Ax \le b, \quad s \le z, \quad a_i x_i \le z, \quad x_i \le y_i, \quad x_i \ge 0, i = 1,...,n, s \ge 0. \tag{9}$$

Преобразуем функцию цели к виду $\lambda\sum_{i=1}^{n}\pi_i x_i - (1-\lambda)z + (1-\lambda-k\lambda)s$. При $1-\lambda-k\lambda \le 0$ имеем $s^0 = 0$. Значит, предприятию имеет смысл страховаться, если выполняется соотношение $1-\lambda-k\lambda > 0$ или $\lambda < \frac{1}{k+1}$. Но тогда, приведя целевую функцию к виду

$\lambda\sum_{i=1}^{n}\pi_i x_i-(1-\lambda)(z-s)-k\lambda s$, имеем $s^0=z^0$ и, таким образом, задача (9) для $\lambda<\frac{1}{k+1}$ сводится к задаче, в которой решение не зависит от λ:

$$\max_{x,s}(\sum_{i=1}^{n}\pi_i x_i-ks)$$
$$Ax\le b,\quad a_i x_i\le s,\quad x_i\le y_i,\quad x_i\ge 0, i=1,...,n, s\ge 0.$$

Возможен также вариант страхования по типу «франшизы» при выборе второго механизма управления риском. Пусть q_i – страховой взнос предприятия в расчете на единицу продукции x_i, $i=1,...,n$, $\tilde{s}$ – величина страхового возмещения за единицу превышения приемлемого уровня риска, выплачиваемая страховой компанией. Размер страхового полиса при этом составит $\sum_{i=1}^{n}q_i x_i$. Задача управления риском, основанная на линейной свертке критериев типа суммы и процедуре страхования, примет вид

$$\max_{x}[\alpha(\sum_{i=1}^{n}\pi_i x_i-\sum_{i=1}^{n}q_i x_i)-(1-\alpha)(\max_{1\le i\le n}a_i x_i-\tilde{s}\max(\max_{1\le i\le n}a_i x_i-Risk_{re};0))],$$
$$Ax\le b,\quad x_i\le y_i, x_i\ge 0, i=1,...,n. \tag{10}$$

Предприятию имеет смысл страховаться, если для оптимального x выполняется соотношение $\tilde{s}\max(\max_{1\le i\le n}a_i x_i-Risk_{re};0)\ge\sum_{i=1}^{n}q_i x_i$, а последнее может быть при условии $\max_{1\le i\le n}a_i x_i>Risk_{re}$. Учитывая это замечание, запишем задачу (10) в виде

$$\max_{x}[\alpha(\sum_{i=1}^{n}\pi_i x_i-\sum_{i=1}^{n}q_i x_i)-(1-\alpha)(\max_{1\le i\le n}a_i x_i-\tilde{s}\max_{1\le i\le n}a_i x_i+\tilde{s}Risk_{re})],$$
$$Ax\le b,\quad x_i\le y_i, x_i\ge 0, i=1,...,n. \tag{11}$$

Задача (11) эквивалентна задаче

$$\max_{x}[\alpha(\sum_{i=1}^{n}\pi_i x_i-\sum_{i=1}^{n}q_i x_i)-(1-\alpha)(1-\tilde{s})\max_{1\le i\le n}a_i x_i],$$
$$Ax\le b,\quad x_i\le y_i, x_i\ge 0, i=1,...,n. \tag{12}$$

Для $\tilde{s}\ge 1$ данный механизм управления риском теряет смысл. Для $\tilde{s}<1$ путем введения новой переменной $z=\max_{1\le i\le n}a_i x_i$ сведем задачу (12) к ЗЛП:

$$\max_{x,z}[\alpha(\sum_{i=1}^{n}\pi_i x_i-\sum_{i=1}^{n}q_i x_i)-(1-\alpha)(1-\tilde{s})z)],$$
$$Ax\le b,\quad a_i x_i\le z,\quad x_i\le y_i,\quad x_i\ge 0, i=1,...,n,\quad z\ge 0. \tag{13}$$

3. *Формализация производственной задачи с использованием свертки типа отношения*

Рассмотрим постановку задачи нахождения оптимального плана производства, основывающуюся на свертке критериев типа отношения:

$$\min_{x\in X}\frac{\max_{1\le i\le n}a_i x_i}{\sum_{i=1}^{n}\pi_i x_i}, \tag{14}$$

где $X=\{x\,|\,x_i\in[0;y_i], i=1,...,n, Ax\le b\}$. Выбор такого типа свертки основан на том, что для предприятия может быть важно найти такой план производства, при котором величина риска на единицу прибыли становится минимальной. Отметим, что постановка задачи в виде (14) не нуждается во введении параметра λ, характеризующего степень избегания риска.

Представим задачу (14) в виде ЗЛП. Для этого введем переменные $u = (\sum_{i=1}^{n} \pi_i x_i)^{-1}$, $z = \max_{1 \le i \le n} a_i x_i$. Тогда имеем $a_i x_i u \le zu$, $\sum_{i=1}^{n} \pi_i x_i u = 1$, $x_i u \le y_i u$, $i = 1,..,n$. Введем обозначение $v = uz$, $w_i \le x_i u$. Задача (14) примет вид

$$\min_{u,v,\overline{w}} v,$$
$$a_i w_i \le v,\ A\overline{w} - bu \le 0,\ \sum_{i=1}^{n} \pi_i w_i = 1,\ w_i \le y_i u,\ w_i \ge 0,\ i = 1,...,n,\ u \ge 0,\ v \ge 0. \tag{15}$$

Задача (15) решается известными методами линейного программирования [5]. Пусть $(u^0, v^0, \overline{w}^0)$ – решение задачи (15), тогда $x_i^0 = \frac{w_i^0}{u^0}$, $i = 1,...,n$ – компоненты оптимального плана задачи (14).

Постановка задачи планирования для случая нескольких производственных периодов

Предположим, что план развития предприятия разбит на T производственных периодов (лет). Величина риска (4) для каждого производственного процесса за T производственных периодов может быть аппроксимирована средним значением по всем периодам, т. е.

$$Risk_i^T = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^{T} a_{it} x_i\ , \tag{16}$$

где $Risk_{it} = a_{it} x_i$ – величина риска для i-го производственного процесса в t-м производственном периоде; a_{it} – прогноз риска для t-го периода.

Тогда функция риска за T производственных периодов примет вид

$$R_{\infty 1}^T(x) = \max_{1 \le i \le n} \frac{1}{T} \sum_{t=1}^{T} a_{it} x_i\ . \tag{17}$$

Альтернативу функции риска (17) определим в виде

$$R_{\infty 2}^T(x) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^{T} \max_{1 \le i \le n} a_{it} x_i\ . \tag{18}$$

Различие между функциями риска (17) и (18) демонстрирует пример 1.

Пример 1. Для произвольно выбранного плана $x^* = (2; 3; 1{,}5)$ необходимо произвести расчет значений функций риска (17) и (18).

Таблица 1

Процесс i / Период t	1	2	3
1	0,5	2,0	1,0
2	3,0	0,1	5,0
3	1,4	3,0	1,3
4	2,2	4,7	2,6
5	1,0	0,8	5,2

Таблица 2

Процесс i / Период t	1	2	3
1	1,0	**6,0**	1,5
2	6,0	0,3	**7,5**
3	2,8	**9,0**	1,95
4	4,4	**14,1**	3,9
5	2,0	2,4	**7,8**

Согласно (17), имеем $R_{\infty 1}^T(x^*) = \max_{i=1,2,3} \frac{1}{5} \sum_{t=1}^{T} a_{ijt} x_i^*$, $R_{\infty 1}^T(x^*) = 6{,}36$. Такое максимальное значение риска дает второй технологический процесс, т. е. при выбранном плане $x^* = (2; 3; 1{,}5)$ второй технологический процесс оказывается наиболее рискованным. Соглас-

но (18), имеем $R^T_{\infty 2}(x^*) = \frac{1}{5}\sum_{t=1}^{T}\max_{i=1,2,3} a_{it}x_i^*$, $R^T_{\infty 2}(x^*) = 8{,}88$. При этом наибольший риск для плана $x^* = (2;\,3;\,1{,}5)$ вносит также второй технологический процесс.

Очевидно, имеет место соотношение $R^T_{\infty 2}(x) \ge R^T_{\infty 1}(x)$. В данном примере это неравенство строгое: $R^T_{\infty 2}(x^*) > R^T_{\infty 1}(x^*)$.

Нахождение оптимального плана с использованием функций риска (17) и (18) дает, вообще говоря, различные оптимальные точки $\bar{x}^{01}$, $\bar{x}^{02}$, при этом необязательно имеет место соотношение $R^T_{\infty 2}(\bar{x}^{02}) > R^T_{\infty 1}(\bar{x}^{01})$. Это подтверждает пример 2.

Пример 2. Пусть на предприятии имеются три производственных процесса, на каждом из которых производится продукция определенного типа. Матрица рисков для пяти производственных периодов задана табл. 1. Известна прибыль с единицы продукции каждого процесса $\pi = (20;18;30)$, вектор спроса на продукцию $y = (2;3;2)$, вектор ограничений на ресурсы трех видов $b = (4;3;5)$. Технологическая матрица A представлена табл. 3.

Таблица 3

Процесс / Ресурс	1	2	3
1	1,1	2,1	3,2
2	4	5	2,4
3	6	4,8	9

Для нахождения оптимальной производственной программы возьмем линейную свертку критериев типа суммы с $\lambda = 0{,}5$ и рассмотрим задачу нахождения оптимального плана производства, используя функцию риска (13):

$$\max_{x\in X}\frac{1}{2}\Big(\sum_{i=1}^{3}\pi_i x_i - \max_{i=1,2,3}\frac{1}{5}\sum_{t=1}^{5}a_{it}x_i\Big), \tag{19}$$

где $X = \{x \mid x_i \in [0;\,y_i],\, i = 1,2,3,\, Ax \le b\}$.

Задача (19) эквивалентна следующей ЗЛП:

$$\begin{gathered}\max_{x,z}\frac{1}{2}\Big(\sum_{i=1}^{3}\pi_i x_i - z\Big)\\ \frac{1}{5}\sum_{t=1}^{5}a_{it}x_i \le z,\quad Ax \le b,\quad x_i \le y_i,\, x_i \ge 0,\, i = 1,2,3,\, z \ge 0.\end{gathered} \tag{20}$$

Задача (20) дает оптимальный план $x^{01} = (0;\,0{,}45;\,0{,}32)$. Функция цели в оптимальной точке x^{01} имеет значение 8,3. Значение функции риска есть $R^T_{\infty 1}(x^{02}) = 0{,}96$. Наиболее рискованным является третий процесс.

Теперь возьмем функцию риска (18) и рассмотрим задачу нахождения оптимального плана:

$$\max_{x\in X}\frac{1}{2}\Big[\sum_{i=1}^{3}\pi_i x_i - \frac{1}{5}\sum_{t=1}^{5}\max_{i=1,2,3}a_{it}x_i\Big]. \tag{21}$$

Задача (21) эквивалентна ЗЛП вида

$$\begin{gathered}\max_{x,z}\frac{1}{2}\Big[\sum_{i=1}^{3}\pi_i x_i - \frac{1}{5}\sum_{t=1}^{5}z_t\Big]\\ a_{it}x_i \le z_t,\quad Ax \le b,\quad x_i \le y_i,\, x_i \ge 0,\, i = 1,2,3,\, z_t \ge 0,\ t = 1,\dots,5,\end{gathered} \tag{22}$$

где z представляет собой вектор $z = (z_1, z_2, z_3, z_4, z_5)$.

Задача (21) дает оптимальный план $x^{02} = (0{,}34;\,0{,}23;\,0{,}21)$. Функция цели в оптимальной точке x^{02} принимает значение 8,1. Значение функции риска при этом есть $R^T_{\infty 2}(x^{02}) = 0{,}86$. Наиболее рискованным является второй процесс.

Получили, что $R_{\infty 2}^{T}(x^{02}) < R_{\infty 1}^{T}(x^{01})$.

Можно показать, что для некоторых других исходных данных имеет место неравенство $R_{\infty 2}^{T}(x^{02}) \geq R_{\infty 1}^{T}(x^{01})$.

Аналогичные вопросы возникают в задачах обработки статистической информации. В нашем изложении, a_{it}, $t = 1,...,T$ может быть статистикой риска за прошедшие T периодов. Формально такие задачи похожи, но принципиально отличаются. Традиционной является задача обработки статистических данных, которая приводит к функции риска (17) и построению оптимальной стратегии, опираясь на усредненные данные за прошедшие периоды. В то же время в работе [3] авторы предлагают иной способ обработки статистических данных, при котором в качестве оптимальной стратегии берется та, которая за прошлый период давала бы наибольший эффект. В проблеме управления риском это соответствует функции риска (18).

Заключение

Таким образом, в работе представлены линейные задачи управления риском, в которых использовались следующие свертки критериев выигрыша и риска: линейная свертка критериев, свертка типа отношения, перевод критерия в ограничение. Показано, что функция риска, определенная в метрике l_∞, не только, на наш взгляд, достаточно адекватно описывает риск в производственных процессах, но и удобна в математическом плане, так как все задачи сводятся, в конечном счете, к задаче линейного программирования. Отметим, что погрешность исходных данных в моделях может привести к тому, что ограничения в задаче окажутся несовместными, что отражает отсутствие устойчивости в системе. Соответствующие задачи оптимизации не имеют решения и называются несобственными. Для таких задач предлагаются процедуры минимальной коррекции данных [4], в результате которых аппроксимирующие задачи уже имеют решение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акимов, В.А. Риски в природе, техносфере, обществе и экономике / В.А. Акимов, В.В. Лесных, Н.Н. Радаев. – М.: Деловой экспресс, 2004. – 352 с.
2. Владимиров, В.А. Управление риском: Риск. Устойчивое развитие. Синергетика / В.А. Владимиров, Ю.Л. Воробьев, С.С. Салов. – М.: Наука, 2000. – 429 с.
3. Горелик, В.А. О некоторых задачах фондового инвестирования и менеджмента // Моделирование, оптимизация и декомпозиция сложных динамических процессов / В.А. Горелик, Т.В. Зверева (Золотова). – М.: ВЦ РАН, 1996. – С. 63-85.
4. Горелик, В.А. Модели анализа и коррекции данных в задачах управления эколого-экономическими процессами / В.А. Горелик, Т.В. Зверева (Золотова) // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2009. – № 10. – С. 46-55.
5. Горелик, В.А. Основы исследования операций: учеб. пособие / В.А. Горелик, Т.П. Фомина. – М.: Моск. пед. гос. ун-т, 2004. – 248 с.
6. Измалков, В.И. Техногенная и экологическая безопасность и управление / В.И. Измалков, А.В. Измалков. – СПб.: Межрегион. независ. фонд содействия гражд. обороне, 1998. – 481 с.
7. Карлин, Л.Н. Управление энвиронментальными и экологическими рисками / Л.Н. Карлин, В.М. Абрамов. – СПб.: РГГМУ, 2006. – 332 с.
8. Касьяненко, А.А. Техногенные системы и экологический риск. Ч. 1: учеб. пособие / А.А. Касьяненко. – М.: Изд-во РУДН, 2002. – 93 с.
9. Кириллова, Г.В. Анализ безопасности и оценка риска: учеб. пособие / Г.В. Кириллова. – М.: РГОТУПС, 2003. – 38 с.
10. Моисеев, Н.Н. Математические задачи системного анализа / Н.Н. Моисеев. – М.: Наука. 1981. – 487 с.
11. Cai X.Q., Teo K.L., Yang X.Q., Zhou X.Y. Portfolio optimization with l_∞ risk measure // 35th IEEE Conference on Decision and Control. – Kobe, Japan, 1996. – P. 3682-3687.

Учёные записки № II-1(2) 2010
Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета

Тихомиров В.А., Кутузов Д.Ф.
V.A. Tikhomirov, D.F. Kutuzov

АВТОМАТИЗАЦИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИНИМАЛЬНЫХ ГАБАРИТОВ 3D МОДЕЛЕЙ В CAD СИСТЕМЕ UNIGRAPHICS

ATUOMATED DEFINITION OF MINIMAL DIMENSIONS OF 3D MODELS IN THE 'UNIGRAPHICS' CAD-TYPE SOFTWARE

Тихомиров Владимир Александрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой МОПЭВМ Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. E-mail: kmopevm@knastu.ru.
Mr. Vladimir A.Tikhomirov – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kmopevm@knastu.ru.

Кутузов Денис Федорович – инженер, ЗАО «Флора», системный администратор.
E-mail: d@dmtsoft.ru.
Mr. Denis F.Kutuzov – engineer, JSC "Flora", System Administrator. E-mail: d@dmtsoft.ru

Аннотация: В статье описывается алгоритм и его программная реализация в среде CAD системы Unigraphics, позволяющий автоматизировать процесс определения минимальных габаритов 3D моделей и их сборок. Программный модуль внедрен на Комсомольском-на-Амуре авиационном производственном объединении им. Ю.А.Гагарина и используется при раскрое материала и проектировании упаковочной тары.

Summary: The paper describes an algorithm and its software implementation in the CAD environment of 'Unigraphics' package that automates the process of definition of minimal dimensions of a 3D model and of its subsequent assembly. The program module has been implemented at the JSC 'Yury Gagarin Aviation Plant' (Komsomolsk-on-Amur), and is used for material cutting and design of packaging.

Ключевые слова: минимальные габариты, 3D модель, автоматизация САПР, программирование в Unigraphics, функции Open API Unigraphics.

Keywords: minimal dimensions, 3D model, CAD automation, Unigraphics programming, Open API Unigraphics.

УДК 658.012

Проблема автоматизации определения габаритов 3D моделей в CAD системах неоднократно поднималась на страницах специализированных изданий [1]. Каждый автор решал эту задачу по-своему. Но все предложенные решения, к настоящему времени, имеют весьма тяжеловесные алгоритмы, требующие длительного времени выполнения на компьютере. Для практического применения в повседневной работе технолога это не приемлемо.

В статье рассматривается новый алгоритм автоматизированного определения габаритов 3D моделей (деталей и сборок) в среде CAD системы Unigraphics, имеющий минимальное (несколько секунд) время работы на персональном компьютере и обеспечивающий достаточную для производства точность решения задачи.

Поступила в редакцию 08.04.2010 г.

Общие положения

Система моделирования Unigraphics (UGS) – достаточно мощный инструмент для построения трехмерных моделей. Однако невозможно построить систему, которая решала бы *все* запросы производственников. Поэтому во многих CAD системах, и в частности в UGS, присутствует механизм, с помощью которого квалифицированный пользователь может разрабатывать собственные, встраиваемые в систему, программные модули, решающие нужные пользователю задачи. К таким механизмам в UGS относятся программирование GRIP и Open API [2].

Расширенные возможности открываются при использовании Open API (набора библиотек и подпрограмм, позволяющих внешнему приложению получить доступ к объектам модели UGS). Open API предоставляет возможность программисту создать собственное приложение (динамическую библиотеку), запустить его в среде UGS и манипулировать объектами CAD системы из этого приложения.

На производстве, при работе с системой UGS, появилась необходимость определения габаритов 3D моделей, создаваемых в этой системе. Выяснилось, что такая функция не предусматривается в UGS, и пользователь тратил время на анализ детали, построение дополнительных объектов, вычисление расстояний. Задача пользователя усложнялась при необходимости проведения измерений составных деталей и сборочных единиц.

Проблема нахождения габаритов детали

В современных CAD системах обычно нет инструментов для нахождения минимальных габаритов созданных 3D моделей. В то время как необходимость получения этих данных очевидна – взять хотя бы задачу о проектировании упаковки для изделия или раскрое материала в заготовительно-штамповочном производстве.

Для упрощения работы проектировщика необходимо автоматизировать вычисление габаритов деталей. На рис. 1 приведён пример детали с нанесенными габаритами.

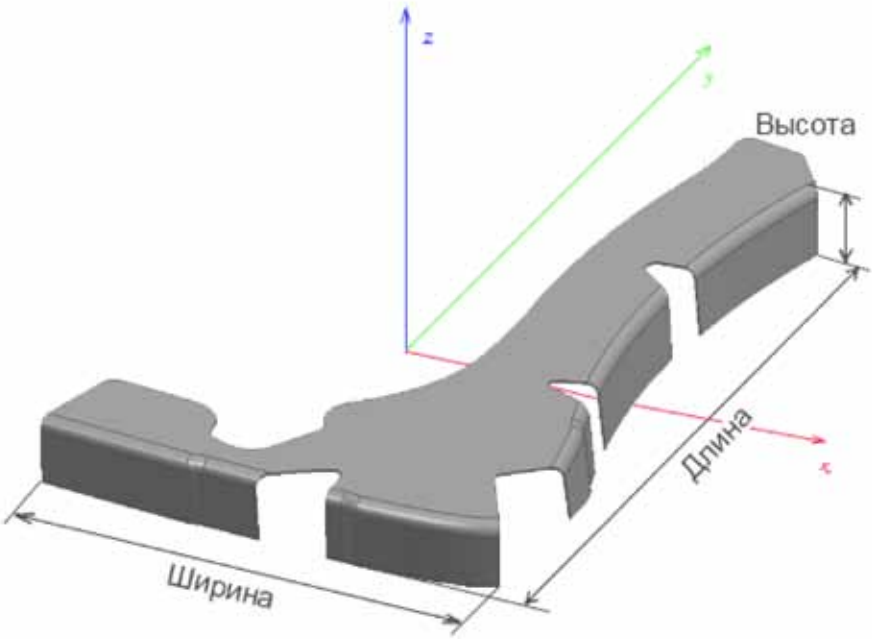


Рис. 1. Габариты модели в рабочей системе координат

В сущности, необходимо найти минимальный параллелепипед, охватывающий 3D модель, и замерить его стороны. Для построения охватывающего параллелепипеда необходимо найти нижнюю «правую», верхнюю «левую» точку модели. После вычисления модуля разности их координат мы получим длину, ширину и высоту модели. Нужный параллелепи-

пед CAD системы вычисляют в текущих координатах своей рабочей сцены. Однако совсем не обязательно, что полученный параллелепипед будет минимальным, ведь 3D модель в текущих координатах сцены может располагаться произвольно и совсем не оптимально.

Для построения алгоритма определения оптимальных габаритов были решены две задачи: разработаны приемы нахождения координат диагональных точек охватывающего параллелепипеда (min, max) и предложена последовательность перебора поворота 3D модели в текущей системе координат для нахождения её оптимального положения в пространстве.

Первая задача могла решаться двумя путями:

1. Перемещением координатных плоскостей параллельно самим себе и определением наличия пересечения этих плоскостей с 3D моделью. Предлагалось пройти по трём измерениям детали с неравномерным шагом и на каждом шаге строить плоскость, перпендикулярную измерению. Для проверки наличия пересечения плоскости и 3D модели предлагалось строить сечение модели плоскостью и если сечение не 0, то деталь не входит в ограничивающий параллелепипед, иначе – входит. В последнем случае выполняются операции уточнения результата, с заданной точностью уменьшая шаг перемещения секущей плоскости. Такой алгоритм способен вычислить габариты абсолютно любой детали, но недостатком этого метода является затраченное время на построение плоскостей, сечений и вычисление шага. На рис. 2 представлен процесс измерения детали таким алгоритмом, для наглядности с равномерным шагом.

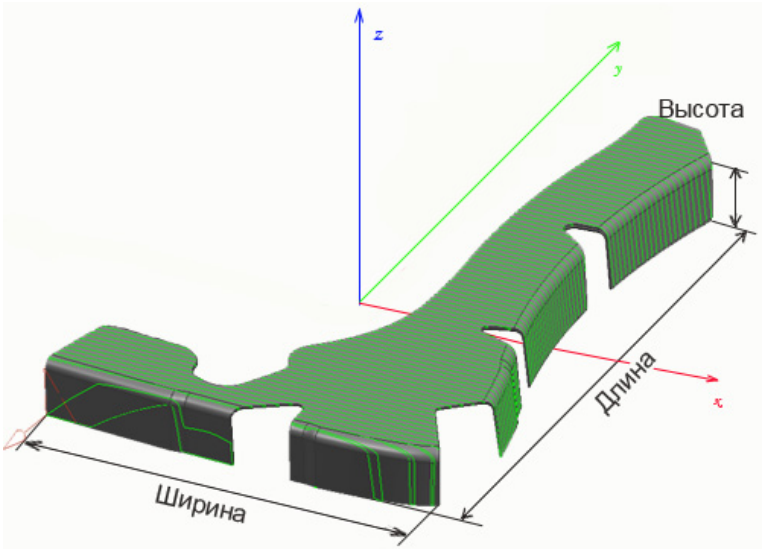


Рис. 2. Замер габаритов пересечением модели координатной плоскостью

2. Преобразованием 3D модели к фасеточному (полигональному) виду и перебору координат всех точек фасеточной модели. Каждая твердотельная модель в системе UGS прорисовывается с помощью функций OpenGL [3], соответственно она состоит из полигонов. При получении всех полигонов возможен расчёт габаритов. Однако не гарантировано, что координаты точек полигона будут равны точкам в выбранной системе измерений. Также неизвестно, какими функциями UGS предоставляет доступ к полигонам детали, на самом низком уровне, т.е. непосредственно к прорисовке. Каждую деталь в системе можно перевести в фасеточную модель (функция UF_FACET_facet_solid), то есть представить деталь в виде полигональной сетки. На рис. 3 приведена деталь с нанесёнными фасетами. После преобразования детали, необходимо получить количество фасет (функция UF_FACET_ask_n_facets_in_model). Идентификаторы всех фасет получаем в цикле функцией UF_FACET_cycle_facets. Каждый идентификатор фасеты можно опросить на координаты точек (функция UF_FACET_ask_vertices_of_facet). Для работы этой функции ей необходимо

передавать указатель на уже выделенную память под массив, а получить его размерность удобнее всего функцией UF_FACET_ask_max_facet_verts, которая возвращает максимальное количество вершин в одной фасете в выбранной фасеточной модели. Количество вершин в текущей фасете определяется с помощью функции UF_FACET_ask_num_verts_in_facet. В результате перебрать все точки модели и найти из них крайние (max, min), не составляет труда.

В ходе исследований для решения задачи был выбран второй путь, как наиболее эффективный по временным критериям. При его использовании достаточно было перебрать все точки детали и найти из них самую нижнюю правую и самую верхнюю левую. Вычислить модуль разности каждой координаты двух точек и получить длину, ширину и высоту (габариты параллелепипеда). Однако наблюдались ситуации, в которых крайняя точка (относительно рабочей системы координат) детали находилась неправильно. Это происходило, если крайняя граница тела была закруглена, и не точка, а, к примеру, сплайн лежал на самом краю 3D модели по одной из осей координат. В таких ситуациях пришлось уточнять имеющиеся краевые точки с помощью первого предложенного метода, но с неравномерным шагом. Уточнения шли до тех пор, пока шаг не становился равен введенному значению.

Для возможности измерения группы деталей необходимо перебрать все выделенные пользователям детали и проделать с каждой из них изложенный выше метод.

Данный метод применим к твёрдотельным, листовым деталям и их граням, именно такие детали вызывают затруднение измерения габаритов.

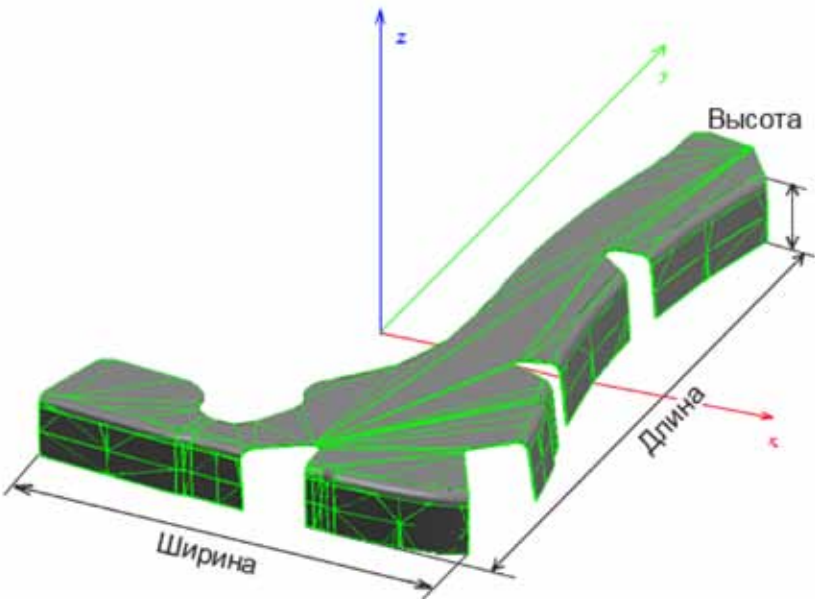


Рис. 3. Разбивка модели на фасеты

Нахождение габаритов сборки

Во многих случаях требуется найти габариты не одной делали, а целой сборки. В таком случае описанный выше алгоритм расширяется.

Из множества объектов в сборке необходимо найти тот, у которого хотя бы одна точка находится на максимальном удалении по оси. Соответственно необходимо искать и ту деталь, хотя бы одна точка которой находится на минимальной координате той же оси. Поиск ведётся для каждой из осей WCS (рабочей системы координат), то есть найденных объектов получится шесть. К каждому из них применяется вышеописанный алгоритм.

Условная реализация описанного алгоритма нахождения диагональных точек охватывающего параллелепипеда представлена в листинге 1 (псевдокод).

Листинг 1

```
Алгоритм Get_polus_part
            Input: tags, count_tags
            Output: x,y,z – габариты детали
      Begin
      Set polus_tags[0..5] = tags[0]
      UF_FACET_ask_vertices_of_facet(tags[0])
      Set polus_vertex[0..1] = vertices[0];
            For i:=1 to count_tags-1 do
                  UF_FACET_ask_vertices_of_facet(tags[i])
                  For j:=0 to tags[i].count_vertices-1 do
                        If vertices[j].x<polus_vertex[0].x then begin
                              Set polus_vertex[0].x:=vertices[j].x
                              Set polus_tags [0]:=tags[i]
                              End if
                        If vertices[j].x>polus_vertex[1].x then begin
                              Set polus_vertex[1].x:=vertices[j].x
                              Set polus_tags[1]:=tags[i]
                              End if
                              … повторение для осей Y и Z
                  End for
            End for

            Exactly (polus_tags [0],+1) // Уточнение максимума по X (WCS)
            Exactly (polus_tags [1],-1) // Уточнение минимума по X (WCS)
          … повторение для осей Y и Z
      End Get_polus_part
```

Разработанная программа позволяет измерить габариты одной детали, группы деталей или составной детали, используя второй метод. Деталь может быть построена по любому методу, разрешены дополнительные построения, округления, сшивка, карманы и др.

Нахождение минимального габарита

Чтобы полученный охватывающий параллелепипед был минимальным, был разработан алгоритм поворота координатных осей CAD системы.

Для нахождения угла поворота, при котором габариты тела будут минимальными, необходимо поворачивать тело по трем осям. Координатные оси достаточно вращать по каждой из осей на угол (180 - $\Delta\alpha$) градусов, где $\Delta\alpha$ - точность вычисления угла вращения (на рис. 4 отражены этапы вращения тела по трем осям). На вращение модели в системе координат UGS и замер габаритов модели в них тратится весьма много времени, поэтому предлагается преобразовывать модель в фасеточный тип, получать все точки модели и далее проводить все операции над массивом этих точек, за счет чего значительно ускоряется работа алгоритма.

В листинге 2 представлен условный код «вращения» системы координат для определения ее оптимального положения.

Листинг 2

```
Алгоритм angle_force
      Input: tag
      Output: angle
      Begin
      Получить все точки объекта
```

```
        For az:=0 to 179 do
        Rotate_Cs(points,{0,0,1},az)
        //Поворот всех точек на угол az по оси Z
            If (get_gabarit(points)<last_gabarit) then
                Set last_gabarit= get_gabarit(points)
                Set angle.z=az
            End if
        End for
        Поворот непосредственно детали на угол angle.z по оси Z
        …
        Далее предыдущий цикл, но по оси Y и X
    End angle_force
```

Поворот каждой точки осуществляется без участия функций UGS (или другой CAD системы). Примененная математическая модель поворота точек в новой системе координат (в псевдокоде) представлена в листинге 3.

Листинг 3

```
Алгоритм Rotate_Cs
    Input: dPoint[3], Axis[3], dAngle
    Output: x,y,z
    begin
    // Производим нормирование
    Set k: = sqrt(Axis[0]*Axis[0] + Axis[1]*Axis[1] + Axis[2]*Axis[2]);
    Set Axis[0]:= Axis[0] / k;
    Set Axis[1]:= Axis[1] / k;
    Set Axis[2]:= Axis[2] / k;

    Set z = dPoint[2] * (cos(dAngle) + (1-cos(dAngle))*Axis[2]*Axis[2])
                                        +dPoint[0] * ((1-cos(dAngle))*Axis[2]*Axis[0]
                    +Axis[1]*sin(dAngle))+dPoint[1] * ((1-cos(dAngle))*Axis[2]*Axis[1]
                                                    + Axis[0]*sin(dAngle));

    Set x = dPoint[2] * ((1-cos(dAngle))*Axis[2]*Axis[0]
        +Axis[1]*sin(dAngle)) +     dPoint[0] * (cos(dAngle)
        + (1-cos(dAngle))*Axis[0]*Axis[0])
        +dPoint[1] * ((1– cos(dAngle))*Axis[0]*Axis[1]
        – Axis[2]*sin(dAngle));

    Set y = dPoint[2] * ((1-cos(dAngle))*Axis[2]*Axis[1] –
        Axis[0]*sin(dAngle)) +dPoint[0]
        *((1-cos(dAngle))*Axis[0]*Axis[1]
        + Axis[2]*sin(dAngle)) +dPoint[1] * (cos(dAngle)
        + (1-cos(dAngle))*Axis[1]*Axis[1]);
end Rotate_Cs
```

Если использовать инструменты UGS [2] для выполнения поворота модели на рабочей сцене CAD системы (см. рис. 4), то для достаточно сложной модели потребуется достаточно много времени (от 1 до 5 мин). При этом невозможен поворот моделей, явно зависящих от других построений, UGS сам не в состоянии это осуществить (без нарушения целостности модели).

В связи с этим, в представленном алгоритме «вращается» не сама модель, а её не параметризированная копия. Это существенно ускоряет процесс вращения и ликвидирует исключительные ситуации.

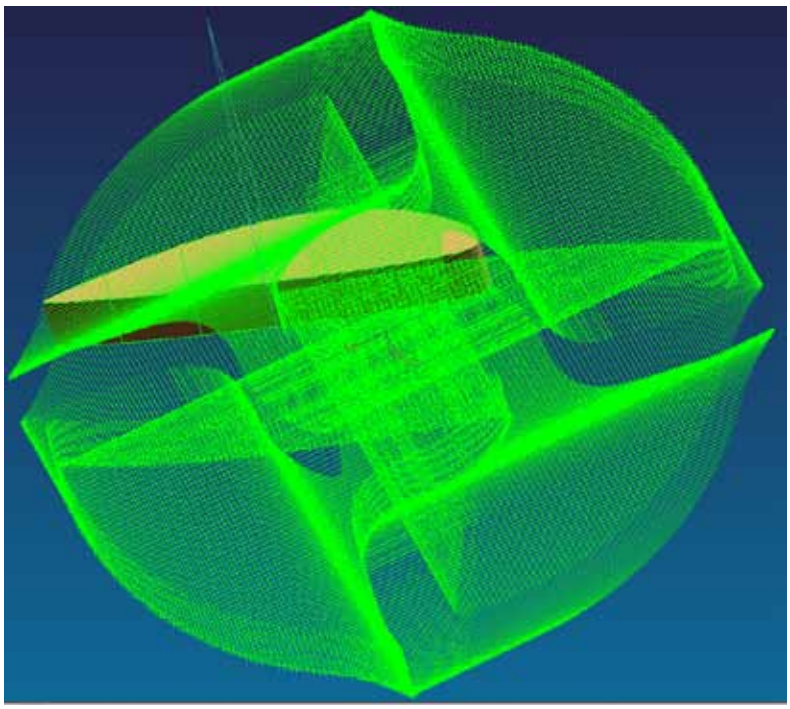


Рис. 4. Вращение модели по оси Z средствами UGS

Написанная программа способна вычислять габариты как параметризованных, так и непараметризованных моделей. Даёт пользователю возможность измерить в CAD системе Unigraphics габариты любой твёрдотельной, листовой 3D модели или их сборок с минимальными затратами. Существует возможность определения габаритов отдельной грани(ей) детали. Разработано специальное меню для вызова программы из панели инструментов UGS.

Программа внедрена в работу технологических служб Комсомольского-на-Амуре авиационного производственного объединения им. Ю.А. Гагарина. Имеется акт внедрения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ермолин, Е. Автоматическое определение минимальных габаритов деталей / Е. Ермолин, М. Богданов, Р. Кусков, К. Лыков, А. Попова // САПР и графика. – 2007. – № 12. – С. 24-28.
2. Краснов, М. Unigraphics для профессионалов / М. Краснов, Ю. Чигишев. – М.: ЛОРИ, 2004. – 141 с.

ПРИМЕЧАНИЯ

1. Unigraphics NX – Программирование//ESG.SPB.RU : сервер группы компаний бюро ESG. 2010. URL: http://www.esg.spb.ru/win /Pr_products/ Unigraphics/Unigraphics_NX/UG_program.htm (дата обращения: 30.03.2010).

Бердоносов В.Д.
V.D. Berdonosov

ЗАКОН ПОЛНОТЫ ЧАСТЕЙ СИСТЕМЫ: МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

THE LAW OF SYSTEM COMPLETENESS: METHODOLOGY ASPECTS

Бердоносов Виктор Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент, профессор Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ktriz@knastu.ru.
Mr. Victor D. Berdonosov – PhD in Engineering, Associate Professor, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktriz@knastu.ru.

Аннотация: рассматриваются некоторые аспекты оценки работоспособности системы в соответствии с законом полноты частей системы. Отмечается, что оценка работоспособности основных элементов системы может быть сделана путём оценки идеальности этих элементов. Кроме того, указывается, что для оценки работоспособности всей системы помимо достаточной идеальности самих элементов не должно быть недопустимого негативного влияния одних элементов на другие. Предлагается получать искомую оценку идеальности по квадранту, в который «попадает» оцениваемый элемент в бинарном пространстве «польза-затраты». Приводится пример, иллюстрирующий предлагаемую методику оценки работоспособности системы.

Summary: Several aspects of system performance assessment in accordance with the Law of system completeness in technical, information and economic systems are considered. It is suggested that performance evaluation of some basic system parts can be made by assessing the ideality of these components. Besides it is noted that for system health assessment as a whole, in addition to sufficient component ideality there should not be any unacceptably negative impact of one component on the other. Moreover, ideality is suggested to be estimated by a quadrant where the analyzed element falls into a binary “advantage-expenses” space . An example is provided of the proposed methodology for assessing the health of a system.

Ключевые слова: закон полноты частей системы, работоспособность элементов системы, зависимость параметров элементов.

Keywords: the law of system completeness, system part functionality, parameter interrelation of system components.

УДК 681.5

Введение

Закон полноты частей системы был предложен Г. Альтшуллером в его первой редакции законов развития технических систем [1]. Этот закон определяет жизнеспособность системы в момент своего рождения. Жизнеспособность системы характеризуется работоспособностью её элементов. Но как определить уровень этой работоспособности? Особенно сложен этот вопрос для пионерских систем. Влияют ли одни элементы на работоспособность других? И если влияют, то как? Попробуем ответить на эти вопросы.

ЗПЧС – слово Альтшуллеру

«Каждая новая техническая система сдает экзамен [2]. Принимает экзамен очень строгая «комиссия» - жизнь, практика. «Комиссия» придирчиво расспрашивает: «Что это такое? Ах, двигатель! Посмотрим, как он работает в этой системе... Что ж, удовлетворительно, ста-

Поступила в редакцию 18.03.2010 г.

вим тройку. А это что такое? Передача от двигателя к рабочему органу? Прекрасная передача, запишем пятерку. А где органы управления? Как, всего две кнопки?! А если изменились условия работы? А если авария? Придется поставить двойку...».

Правило у «комиссии» такое: проходят только те системы, у которых нет двоек. Есть ли пятерки и четверки, много ли набрано баллов – все это не имеет значения. Нужно только, чтобы подсистемы умели работать коллективно, пусть даже на тройку. Как ни странно, почти все современные технические системы были вначале троечниками. У первого парохода была очень слабая и невероятно прожорливая паровая машина, передача от двигателя к гребням колес съедала значительную часть энергии, да и сами колеса работали неважно. Но и в таком виде система подавала великие надежды, потому что сочетание было удачным, все части работали пусть неумело, но дружно.

Техническая система – как ансамбль музыкантов, как спортивная команда – хороша только тогда, когда все части играют согласованно, слаженно, подыгрывая друг другу. Поэтому усилия изобретателей сначала направлены на то, чтобы найти «формулу системы» – удачное сочетание частей. Это первый этап в жизни системы».

И здесь уже сразу появляются вопросы. В каком случае мы ставим элементу системы тройку или более высокую оценку, а в каком двойку?

Ансамбль музыкантов?!

Рассмотрим в качестве примера самолёт. Известно, что для того, чтобы самолёт летал, ему нужны крылья. Но неподвижные крылья летать не могут, их нужно толкать по воздуху, для этого нужен двигатель, но двигатель напрямую на крылья не воздействует, поэтому нужна трансмиссия, то есть корпус. Ну и, конечно, ещё нужен орган управления. Следовательно, самолёт должен иметь: крылья, корпус, двигатель и устройства управления (ручку газа, рычаги управления рулём высоты и рулём направления). Как определить, полетит система, имеющая такой набор элементов, или не полетит?

Возьмём два конкретных технических объекта: самолёт братьев Райт (см. рис. 1, *а*) и самолёт контр-адмирала Можайского (см. рис. 1, *б*). Ведь мы рассматриваем этап рождения системы, поэтому и взяли этих первенцев для примера.

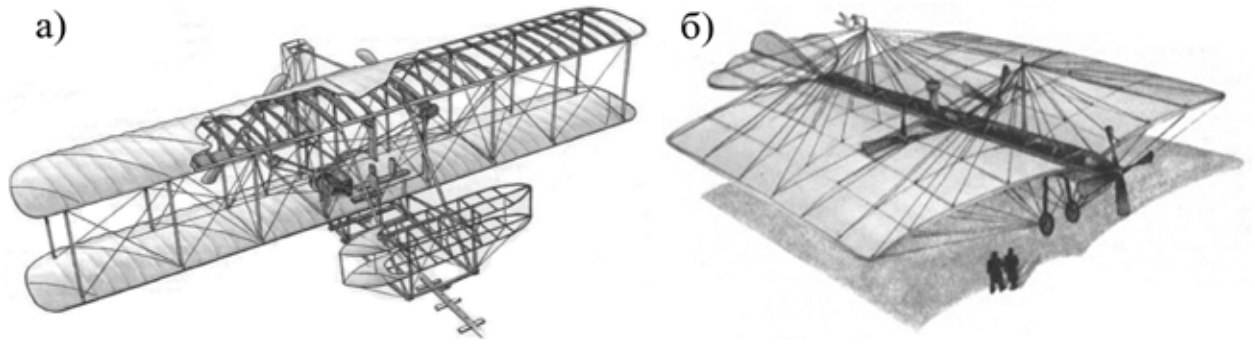


Рис. 1. Самолёты братьев Райт (а) и Можайского (б)

Как известно, один самолёт полетел, а второй только подпрыгивал на несколько метров [3]. Какие же элементы получили неудовлетворительные оценки во втором случае и почему? То есть, более правильный вопрос: по какому критерию (критериям) оценивать элементы системы? В ТРИЗе есть такой критерий – это идеальность, так как каждый элемент можно рассматривать как отдельную систему, которая прошла уже некоторый путь развития и обладает идеальностью. Рассматривая идеальность элементов, нужно иметь в виду, что эти элементы предназначены для создания конкретной системы, в нашем случае – самолёта. Для элементов автомобиля будут другие критерии, а для подводной лодки – третьи и так далее,

то есть, должен быть «ансамбль музыкантов». Для самолёта таким критерием является «лёгкость», для автомобиля – «доступность по цене», для подводной лодки – «безопасность» и так далее.

Итак, первый элемент, который мы начнём рассматривать – это конечно рабочий орган. В нашем случае это крыло. Главная полезная функция крыла – создавать подъёмную силу. Дополнительная функция – менять геометрию для обеспечения устойчивого положения самолёта в воздухе. Посмотрим, как обстоят дела по реализации этих функций у крыла одного и другого самолёта. Подъёмная сила крыла определяется в первую очередь профилем крыла: у плоского крыла (аналог воздушный змей) подъёмная сила меньше, чем у крыла, имеющего выпуклый профиль (см. рис. 2). Ко времени изобретения самолёта этот факт был уже известен и проверен на планерах.

Рис. 2. Профиль крыла

Сразу отметим, что крылья самолёта братьев Райт имели выпуклый профиль [7, 8], а крылья самолёта Можайского были непрофилированными [5, 6], их даже плоскими назвать нельзя было, так как они были такими большими, что конструктивно выполнить их профилированными с тем набором конструкционных материалов было невозможно.

Следующая функция – менять геометрию. Для реализации этой функции братья Райт сразу заложили возможность изгибать крыло, чтобы обеспечить возможность восстанавливать горизонтальную устойчивость самолёта при порывах ветра. То есть, эти крылья имели возможность управляться. Крылья самолёта Можайского такой возможности не имели.

Перейдём к рассмотрению следующего элемента – двигателя. Сразу следует оговориться, что двигатель будет рассматриваться совместно с движителем (воздушным винтом). Полезная функция двигателя: создавать тягу для перемещения самолёта относительно воздуха. Какими параметрами можно характеризовать эту функцию? Мощностью двигателя, удельной мощностью (отношение мощности к весу), КПД (коэффициентом полезного действия). Двигатели рассматриваемых двух самолётов были принципиально различны. Братья Райт использовали двигатель внутреннего сгорания мощностью 12 л.с., весом не более 200 фунтов (90,8 кг) [7]. Можайский использовал два паровых двигателя: один мощностью 20 л.с., весом 47,6 кг; второй мощностью 10 л.с., весом 28,6 кг. Оба двигателя работали от прямоточного парового котла весом 64,5 кг [6]. Сведём параметры двигателей в табл. 1.

Таблица 1

Параметры двигателей

	бр. Райт	Можайский
Мощность (л.с.)	12	20 + 10
Вес (кг)	90,8	47,6 + 28,6 + 64,5
Удельная мощность (л.с./кг)	0,13	0,21

По табл. 1 видно, что и по мощности, и по удельной мощности двигатель, установленный на самолёт Можайского, выигрывал, а вот самолёт не взлетел. Причём все исследователи в первую очередь винят именно двигатель, в частности его большой вес, в том, что самолёт не взлетел. Таким образом, решающим оказался не параметр пользы (мощность), а затратный параметр (вес) этого элемента (двигателя). Но этот затратный параметр недопустимо понизил идеальность не двигателя, а идеальность всей системы, через идеальность другого элемента – крыла. Поясним это. Для того чтобы поднять такой тяжёлый двигатель, нужна большая подъёмная сила; для получения большой подъёмной силы нужны большие кры-

лья, но большие крылья и неэффективны, и неуправляемы, и тяжёлы. Следует иметь в виду, что такое качество больших крыльев было обусловлено недостатками их конструкции и конструкционными материалами того времени. Можно констатировать, что существовало противоречие, которое не было разрешено.

Таким образом, получается, что для правильного анализа необходимо оценивать идеальность не только отдельных элементов системы, но и идеальность их совокупности, то есть всей системы. Учесть это можно, введя оценки воздействия одних элементов системы на другие элементы.

Как же получить оценки идеальности? Это сейчас, спустя столетие, очень легко рассуждать, что хорошо, а что плохо. Но ведь и сейчас тоже рождаются технические системы, и очень важно знать, какой элемент системы является тем «бутылочным горлышком», который мешает системе отправиться в «счастливую жизнь». При оценке элементов новой системы у изобретателей, как правило, нет образца для сравнения. Все оценки носят экспертный характер. Несомненно, любая оценка должна базироваться на идеальности. То есть должны учитываться как польза, так и затраты. Предлагается использовать простейшую графическую модель: по вертикальной оси откладывается польза, по горизонтальной – затраты. Квадрант оценки идеальности элемента определяется соотношением пользы и затрат, этот квадрант заштриховывается.

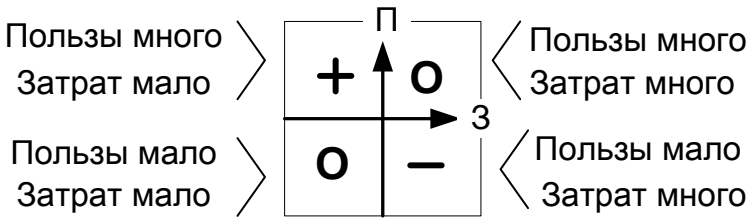


Рис. 3. Графическое представление оценки идеальности

Для оценки идеальности всей системы предлагается формировать таблицу, по строкам которой располагаются оценки элементов системы и взаимодействий между ними.

Таблица 2

Оценка идеальности всей системы

	РО	Тр	Дв	ОУ
РО				
Тр				
Дв				
ОУ				

Оценки идеальности в ячейках табл. 2 имеют следующий смысл. По диагонали располагаются оценки идеальности соответствующих элементов системы. В ячейках, расположенных вне диагонали, оценки воздействия одного элемента на другой. Например, оценка влияния двигателя на рабочий орган будет располагаться в первой ячейке третьей строки.

Посмотрим, как выглядят матрицы оценок для рассматриваемых самолётов.

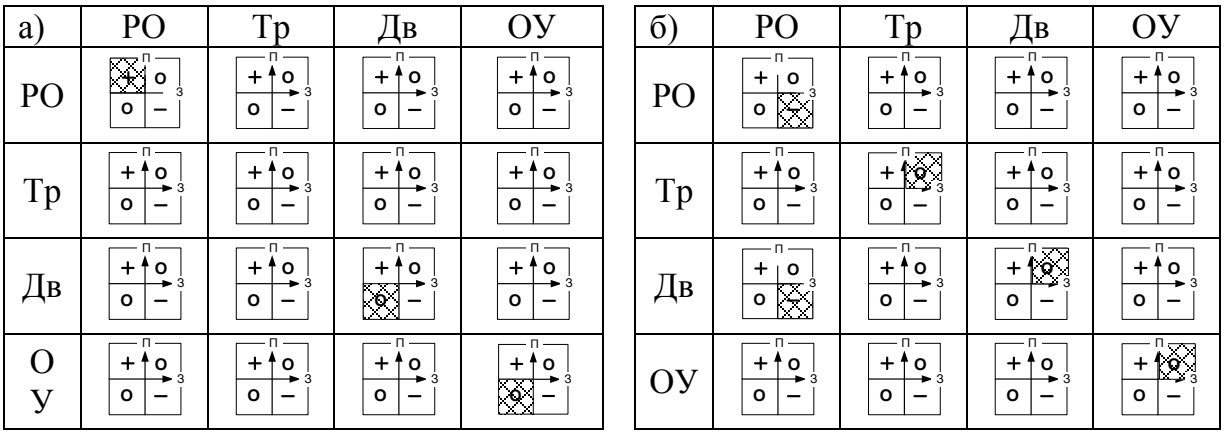


Рис. 4. Оценка идеальности самолёта бр. Райт (а) и самолёта Можайского (б)

Прокомментируем заполнение ячеек этой таблицы (см. рис. 4).

Крылья (РО) самолёта бр. Райт – большая подъёмная сила, малый вес (~ 60 кг), оценка идеальности – «+». Бр. Райт специально построили аэродинамическую трубу и в ней испытали около двухсот моделей крыльев с разными профилями, выбрав профиль с максимальной подъёмной силой.

Двигатель (Дв) – небольшая мощность (12 л.с.), небольшой вес (90,8 кг), оценка идеальности – «**о**».

Орган управления – минимальное количество, простота монтажа, оценка идеальности – «**о**».

Корпуса (Тр) у самолёта бр. Райт практически не было, поэтому идеальность его не оценивалась.

Воздействия, с точки зрения влияния на идеальность, одних элементов на другие не ощущались, поэтому внедиагональные элементы не оценивались.

Перейдём к оценкам идеальности элементов самолёта Можайского.

Крылья (РО) – маленькая подъёмная сила, большой вес (~ 60 кг), оценка идеальности – «–».

Корпус (Тр) – прочный корпус в виде лодки, большой вес, оценка «**о**».

Двигатель (Дв) – большая мощность (в сумме 30 л.с.), большой вес (в сумме 140,7 кг), оценка «**о**».

Органы управления (ОУ) – большое количество, сложные в монтаже, оценка «**о**».

Просматривая влияние одних элементов на другие, видим, что двигатель сильно «влияет» на крылья; большой вес двигателя требует большой подъёмной силы от крыльев, оценка «–».

Перейдём к определению интегральной оценки идеальности всей системы, для этого воспользуемся максиминным критерием (критерий максимального пессимизма). В соответствии с этим критерием у альтернативных систем берутся наихудшие (минимальные) параметры, и выигрывает та система, у которой её наихудший параметр лучше (максимальнее) наихудших параметров остальных систем. Мы возьмём только первую часть максиминного критерия, то есть для каждой системы будем брать наихудшие значения идеальности, и если это значение не «–», то система работоспособна (самолёт полетит), а если хотя бы одна оценка равна «–», то неработоспособна (самолёт не полетит). Из рис. 4 видно, что у самолёта бр. Райт нет ни одной оценки «–», а у самолёта Можайского две оценки «–», следовательно, самолёт бр. Райт жизнеспособен и будет летать, а самолёт Можайского нет. Этот вывод, кстати, подтверждают и полномасштабные, аэродинамические исследования модели самолёта Можайского в ЦАГИ [4].

Выводы

Предложена методика оценки работоспособности элементов системы, основанная на анализе идеальности не только самих элементов, но и взаимодействия между ними, причём идеальность предлагается оценивать по квадранту, в который попадает оцениваемый элемент в бинарном пространстве «польза-затраты».

ЛИТЕРАТУРА

1. Альтшуллер, Г.С. Творчество как точная наука / Г.С. Альтшуллер. – М.: Советское радио, 1979. – 208 с.
2. Альтов, Г.С. И тут появился изобретатель / Г.С. Альтов. – М.: Детская литература, 1989. – 146 с.
3. Бурмистров В. Неизвестное об известных. Событие века – полет человека http://www.westeasttoronto.com/scgi-bin/news_reader/read_article.pl?articleID=1780 03.07.2007.
4. Ковтун, А. Кто первый? / А. Ковтун // Родина. – 2004. – № 8.
5. Можайский, Александр Фёдорович. Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki / Можайский,_Александр_Фёдорович
6. Строителев, К.С. Русский моряк А.Ф. Можайский – изобретатель первого в мире самолета http://www.navy.ru/history/b-mozhaisky.htm
7. Robert Q. Riley One Hundred Years After the Wright Brothers' Conquest of the Air http://www.rqriley.com/wrights.htm
8. The History of the Airplane Part 3: The Wright Brothers - First Flight http://inventors.about.com/library/inventors/bl_wright_brothers.htm

Комаровский Ю. А.
Mr. Yu. A. Komarovskiy

СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ДОПЛЕРОВСКИМИ СПУТНИКОВЫМИ НАВИГАЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ

SEASONAL FLUCTUATIONS IN THE PRECISION OF COORDINATES OBTAINED FROM DOPPLER SATELLITE NAVIGATION SYSTEMS

Комаровский Юрий Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры теории и устройства судна Морского государственного университета им. адм. Г. И. Невельского (г. Владивосток). E-mail: komarovskiy@msun.ru.
Yuriy A. Komarovskiy – PhD in Engineering, senior Researcher at the Department of Ship Theory and Naval Architecture of Maritime State University named adm. G. I. Nevel'skoi (city of Vladivostok). E-mail: komarovskiy@msun.ru.

Аннотация: Показано, что увеличение светлого времени суток приводит к ухудшению точности определения координат доплеровскими спутниковыми навигационными системами.

Summary: The paper shows that an increase in daytime duration leads to degradation in the precision of coordinates obtained by Doppler satellite navigation systems.

Ключевые слова: КОСПАС-САРСАТ, транзит, среднее квадратическое отклонение .

Keywords: KOSPAS-SARSAT, transit, mean square error.

УДК 629.783

Работа любой спутниковой навигационной системы зависит от состояния трансионосферного канала распространения радиоволн. Не составляет исключение из этого правила международная спутниковая система КОСПАС-САРСАТ, призванная обнаруживать сигналы бедствия и определять географические (геодезические) координаты лиц, терпящих бедствие на суше и на море. В ней источниками сигналов служат аварийные радиобуи (АБР), которые активируются в случае бедствия. Физические параметры ионосферы изменяются в течение года. Поэтому крайне желательно иметь оценку влияния сезонных изменений в ионосфере на точность определения координат людей, нуждающихся в помощи.

Максимум ионизации, влияющий на геометрию распространения радиоволн, приходится на область F ионосферы. Поведение главного максимума ионизации определяется временем года и местным временем суток. Максимум электронной концентрации в суточном ходе обычно сдвинут относительно полудня. При этом сдвиг зависит от широты, сезона и даже от долготы места АБР. Сезонная аномалия области F заключается в необычном увеличении максимума ионизации зимой по сравнению с летним сезоном. Высота главного максимума ионизации в средних широтах северного полушария изменяется в течение суток сложным образом, глубоко спускаясь утром и достигая максимума высоты вблизи полуночи. Высота слоя F зимой ниже, чем летом.

Если систематические погрешности объясняются колебаниями высоты и плотности слоя F, то случайные погрешности обсервованных координат АБР возникают по целому ряду причин. Главная из них кроется в стохастическом характере флуктуаций полного элек-

Поступила в редакцию 20.05.2010 г.

тронного содержания (TEC –Total Electron Content) в трансионосферном канале распространения радиоволн от АБР. Нерегулярности TEC вызываются сложными процессами в структурах ионосферы и зависят от географического места расположения АБР, сезона, состояния магнитосферы, солнечной активности и уровня космического излучения. Суточная вариация TEC определяется главным образом зенитным углом Солнца. В монографии [1] утверждается, что ионообразование возрастает быстро около восхода Солнца и остаётся почти постоянным до захода. При спокойной ионосфере наблюдается регулярное изменение TEC. Амплитуды и фазы суточных вариаций TEC зависят от географического места, времени суток и от времени года.

Чтобы оценить сезонные изменения погрешностей координат АБР системы КОСПАС-САРСАТ, в данной работе анализируются параметры распределения погрешностей координат судового приёмника FSN-70 спутниковой навигационной системы доплеровского типа Транзит. Технические характеристики систем КОСПАС-САРСАТ и Транзит близки [2]. Определение координат в них производится одним и тем же интегрально-доплеровским способом. Ранее автором были получены характеристики точности FSN-70 в зимнее время года [3]. В настоящей статье рассматриваются параметры распределения погрешностей координат FSN-70 в весенний и осенний периоды года. Для исследований были взяты массивы данных с 3 марта по 16 апреля и с 3 сентября по 14 октября. Эти массивы выбраны из данных, полученных во время наблюдений в лаборатории кафедры Промыслового судовождения и промышленного рыболовства Дальневосточного филиала Всесоюзного института повышения квалификации руководящих работников и специалистов рыбного хозяйства СССР во Владивостоке с 1987 по 1989 годы. Приёмник FSN-70 в этот период работал непрерывно круглые сутки. Обсервованные широты и долготы распределились по времени суток по шкале универсального координированного времени (UTC) так, как это показано на рис. 1.

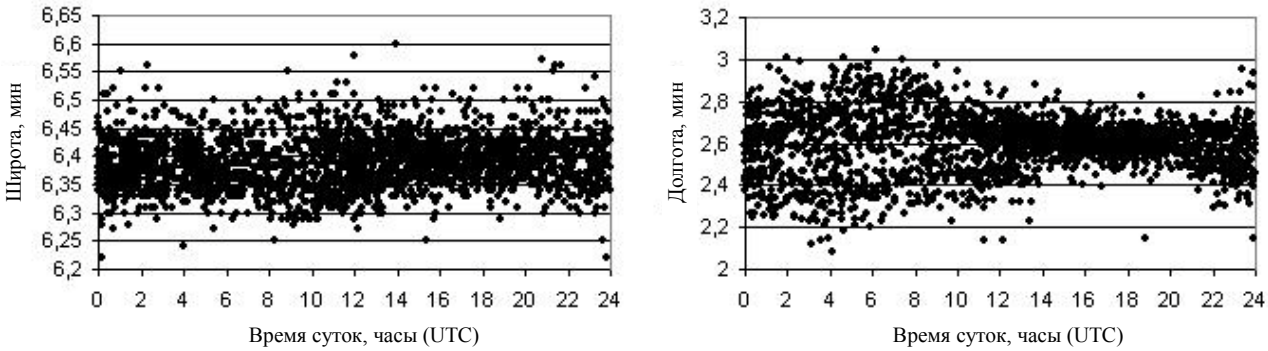


Рис. 1. Суточный ход обсервованных широт и долгот весной-осенью

На рис. 1 на левой панели можно видеть сравнительно стабильное распределение во времени суток значений широт. Дисперсия долготы распределяется во времени суток неравномерно.

Далее были рассчитаны средние, средние квадратические отклонения (СКО), асимметрии, эксцессы и размахи варьирования исходных массивов наблюдений. Результаты вычислений сведены в табл. 1. Для сравнения в эту таблицу внесены такие же параметры, полученные ранее для зимних наблюдений [3].

Как следует из табл. 1, по сравнению с зимними наблюдениями погрешности определения координат весной и осенью значительно возросли. И если СКО широты увеличилось на 8,9 %, то СКО долготы возросло на 93,7 %. Иным показателем точности выступает размах варьирования координат. Размах варьирования широты весной и осенью увеличился в 1,6 раза, а долготы возрос в 2,8 раза по сравнению с зимними наблюдениями.

Таблица 1

Параметры распределений координат зимних и весенне-осенних наблюдений

Параметры распределения	Широта		Долгота	
	Зима	Весна-осень	Зима	Весна-осень
Среднее, мин	6,3942	6,3897	2,5974	2,5993
СКО, м	79,97	87,15	98,22	190,24
Асимметрия	0,204	0,375	-0,176	-0,233
Эксцесс	-0,291	0,627	-0,629	0,454
Размах варьирования, м	425,9	703,6	461,2	1302,2

Другим аспектом точности выступают смещения средних значений широты и долготы относительно координат антенны приёмника FSN-70, полученных с высокой точностью геодезическими способами. Понятно, что в процессе сбора экспериментальных данных положение антенны не менялось. Обозначим через $\Delta\varphi_m$ и $\Delta\lambda_m$ смещения в метрах средних координат. Тогда

$$\Delta\varphi_m = (\varphi'_{CP} - \varphi'_0)\frac{a(1-e^2)arc1'}{\sqrt{(1-e^2\sin^2\varphi_0)^3}}, \quad \Delta\lambda_m = (\lambda'_{CP} - \lambda'_0)\frac{arc1'a\cos\varphi_0}{\sqrt{1-e^2\sin^2\varphi_0}}, \tag{1}$$

где φ'_{CP} и λ'_{CP} – средние по всем наблюдениям значения широт и долгот соответственно, выраженные в угловых минутах, φ'_0 и λ'_0 – точные координаты антенны приёмника, выраженные в угловых минутах; a – размер в метрах большей полуоси референц-эллипсоида WGS-84, e – первый эксцентриситет референц-эллипсоида WGS-84.

Расчёты по формулам (1) показали, что в зимних наблюдениях смещения средних значений координат по широте и по долготе были 0,37 м к северу и 1,899 м к востоку соответственно. Средние значения широты и долготы в наблюдениях весной и осенью сместились на 7,962 м к югу и на 4,476 м к востоку. Таким образом, с позиции абсолютных погрешностей зимой координаты АБР в среднем определяются точнее, что может служить слабым утешением для терпящих бедствие.

Как отмечалось выше, существует суточная вариация TEC, которая определяется положением Солнца. В зимних наблюдениях [3] влияние суточной вариации TEC на обсервованные координаты определялись регрессионными полиномиальными степенными трендами, коэффициенты которых вычислены методом наименьших квадратов,

$$\begin{cases} \overline{\varphi}(t) = 6{,}34703 + 0{,}004511t + 0{,}000421t^2 - 0{,}000026t^3, \\ \overline{\lambda}(t) = 2{,}523298 + 0{,}015022t - 0{,}000492t^2 - 0{,}000004t^3, \end{cases} \tag{2}$$

где $\overline{\varphi}(t)$ и $\overline{\lambda}(t)$ – значения трендов широты и долготы соответственно, выраженные в угловых минутах; t – время в часах по шкале UTC.

Аналогичные тренды, полученные в результате обработки весенних и осенних наблюдений, имеют вид:

$$\begin{cases} \overline{\varphi}(t) = 6{,}385304 - 0{,}0023954t + 0{,}00034653t^2 - 0{,}000009376t^3, \\ \overline{\lambda}(t) = 2{,}570508 + 0{,}0104267t - 0{,}000676116t^2 - 0{,}000009635t^3. \end{cases} \tag{3}$$

На рис. 2 представлены графики трендов (2), (3) широт (левая панель) и долгот зимних наблюдений (сплошные линии) и наблюдений весной и осенью (пунктирные линии).

На рис. 2 можно видеть незначительные суточные изменения широты весной и осенью по сравнению с зимним суточным ходом. Причина тому кроется в продолжительности

светлого времени суток. Для анализа точности координат весной и осенью данные выбирались по суткам, симметрично отдалённых от дней весеннего и осеннего равноденствий. За сутки весной и осенью тренд широты изменился на 0,02 мин (37 м). На 5 ч сместился максимум тренда широты в сторону большего времени суток по сравнению с зимним максимумом.

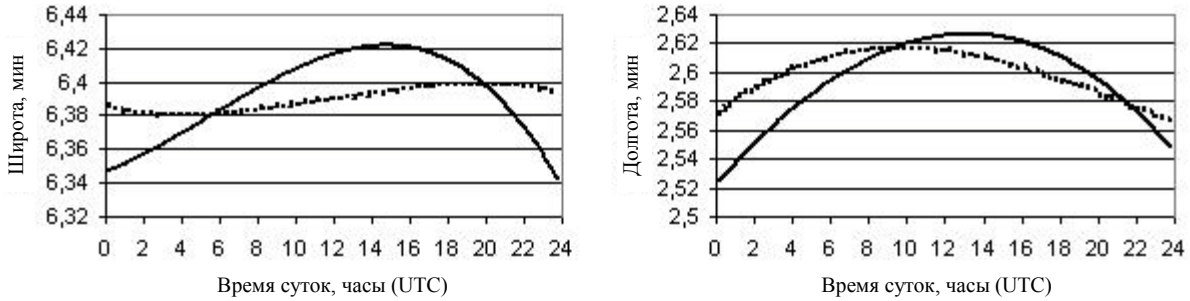


Рис. 2. Суточные тренды координат в зимних наблюдениях (сплошные линии) и в наблюдениях весной и осенью (пунктирные линии)

Как можно видеть на правой панели (см. рис. 2), суточный тренд долготы, полученный в ходе весенних и осенних наблюдений, по своей форме незначительно отличается от зимнего тренда. Суточное изменение тренда долготы весной и осенью заметно меньше зимнего и составило 0,051 мин (69,5 м). Максимум тренда долготы весной и осенью наступает раньше зимнего максимума на 4 ч.

Для оценки сезонных изменений точности определения координат терпящих бедствие экипажей и пассажиров судов и самолётов существенное значение имеет априорная информация о возможных отклонениях координат, которые определены системой КОСПАС-САРСАТ, от действительных координат. С этой целью были рассчитаны отклонения в метрах осреднённых за час координат от соответствующих высокоточных координат по формулам (1), в которых φ'_{CP} и λ'_{CP} рассчитывались следующим образом:

$$\varphi'_{CP_j} = \frac{1}{n_j}\sum_{i=1}^{n_j}\varphi'_{ji}\ , \quad \lambda'_{CP_j} = \frac{1}{n_j}\sum_{i=1}^{n_j}\lambda'_{ji}\ , \tag{4}$$

где j – номер часа суток по времени Владивостока; n_j – общее число широт и долгот, зарегистрированных в j-м часе суток за весь период наблюдений весной и осенью; φ'_{ji} и λ'_{ji} – значения обсервованных широт и долгот в угловых минутах, зарегистрированные в j-м часе суток за весь период наблюдений весной и осенью.

Графики суточных отклонений, рассчитанных по формулам (1) и (4), можно видеть на рис. 3.

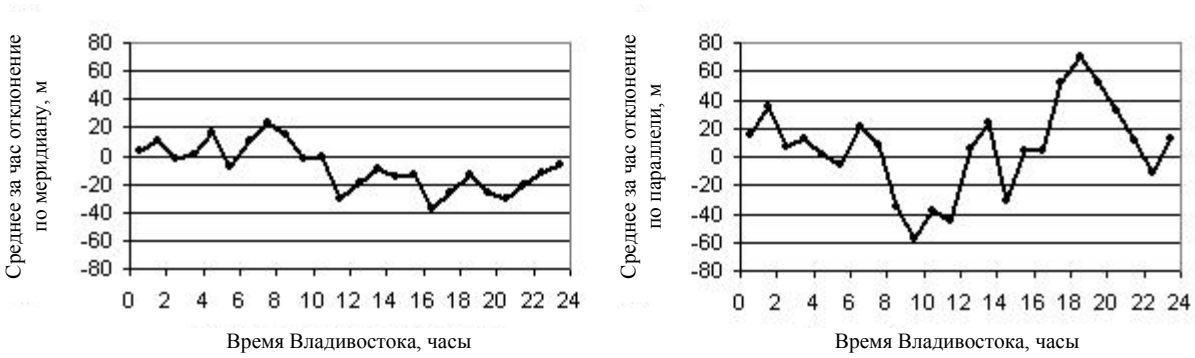


Рис. 3. Суточные изменения осреднённых координат

Анализ графиков (см. рис. 3) позволяет сделать вывод о незначительных отклонениях осреднённых за час координат по меридиану по сравнению с отклонениями по параллели. Если в первой половине суток осреднённые координаты отклоняются почти на 20 м к северу

от действительного места, то во второй половине они располагаются к югу на расстоянии до 40 м. Незначительные отклонения к востоку (до 40 м) имеют место у осреднённых координат в ночные часы суток весной и осенью. К полудню наблюдаются отклонения до 60 м к западу, а в 19 ч – до 70 м к востоку.

Чтобы оценить ожидаемые предельные отклонения координат, вычислим по каждому j-му часу суток средние квадратические отклонения (СКО) в метрах широт $\sigma_{m_j}^{(\varphi)}$ и долгот $\sigma_{m_j}^{(\lambda)}$:

$$\begin{cases} \sigma_{m_j}^{(\varphi)} = \sqrt{\dfrac{\sum\limits_{i=1}^{n_j}\left(\varphi'_{ij} - \varphi'_{CP_j}\right)^2}{n_j}} \cdot \dfrac{a(1-e^2)arc1'}{\sqrt{(1-e^2\sin^2\varphi_0)^3}}, \\ \sigma_{m_j}^{(\lambda)} = \sqrt{\dfrac{\sum\limits_{i=1}^{n_j}\left(\lambda'_{ij} - \lambda'_{CP_j}\right)^2}{n_j}} \cdot \dfrac{a\cos\varphi_0 arc1'}{\sqrt{1-e^2\sin^2\varphi_0}}. \end{cases} \quad (5)$$

Графики вычисленных за каждый час суток СКО широт и долгот представлены на рис. 4.

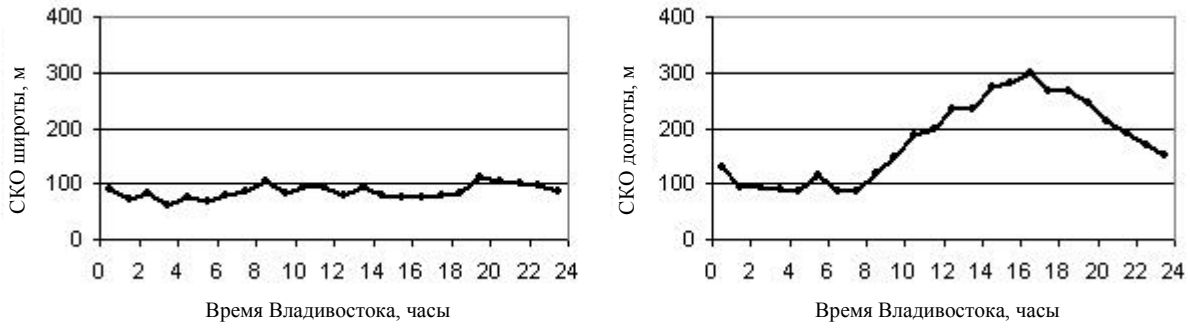


Рис. 4. Суточный ход СКО широты и долготы весной и осенью

Нетрудно заметить, что случайные погрешности определения широты места катастроф остаются практически неизменными на протяжении суток и составляют ±100 м с вероятностью 0,68 в предположении гауссовского закона распределения случайных погрешностей. Как можно видеть на правой панели (см. рис. 4), случайные погрешности определения долготы сохраняют уровень ±100 м с полуночи до 8 ч утра, то есть до восхода Солнца. Затем погрешности долготы увеличиваются, достигая уровня ±300 м в 19 ч местного времени.

Полученные результаты помогают рассчитать максимальные погрешности определения места катастроф системой КОСПАС-САРСАТ весной и осенью. Если применять правило трёх сигм, то максимальные погрешности в метрах по меридиану $\Delta\varphi_{max}$ и по параллели $\Delta\lambda_{max}$ следует вычислять таким образом:

$$\begin{cases} \Delta\varphi_{\max} = \max\Delta\varphi_m + 3\times\max\sigma_{m_j}^{(\varphi)}, & \textit{если } \Delta\varphi_m \textit{ к северу}, \\ \Delta\varphi_{\max} = \max\left|\Delta\varphi_m\right| + 3\times\max\sigma_{m_j}^{(\varphi)}, & \textit{если } \Delta\varphi_m \textit{ к югу}, \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Delta\lambda_{\max} = \max\Delta\lambda_m + 3\times\max\sigma_{m_j}^{(\lambda)}, & \textit{если } \Delta\lambda_m \textit{ к востоку}, \\ \Delta\lambda_{\max} = \max\left|\Delta\lambda_m\right| + 3\times\max\sigma_{m_j}^{(\lambda)}, & \textit{если } \Delta\lambda_m \textit{ к западу}. \end{cases}$$

Отсюда следует, что весной и осенью в первой половине суток местного времени максимальные погрешности координат по меридиану с вероятностью 0,95 составляют 320 м к

северу, а во второй половине они достигают 340 м к югу. Максимальные погрешности по параллели с той же вероятностью могут достигать 660 м к западу в первой половине суток и 970 м к востоку.

Если в оценках максимальных отклонений действительного места аварии от координат, полученных с помощью системы КОСПАС-САРСАТ, не учитывать время определения координат, то для организации поиска и спасения необходимо рассматривать площадь прямоугольника со сторонами 660 м и 1630 м. Поэтому поисковые галсы должны выполняться спасательными средствами и группами на курсах 90 и 270 градусов.

Распределение обсервованных координат относительно их средних значений в осеннее и в весеннее время года можно видеть на рис. 5.

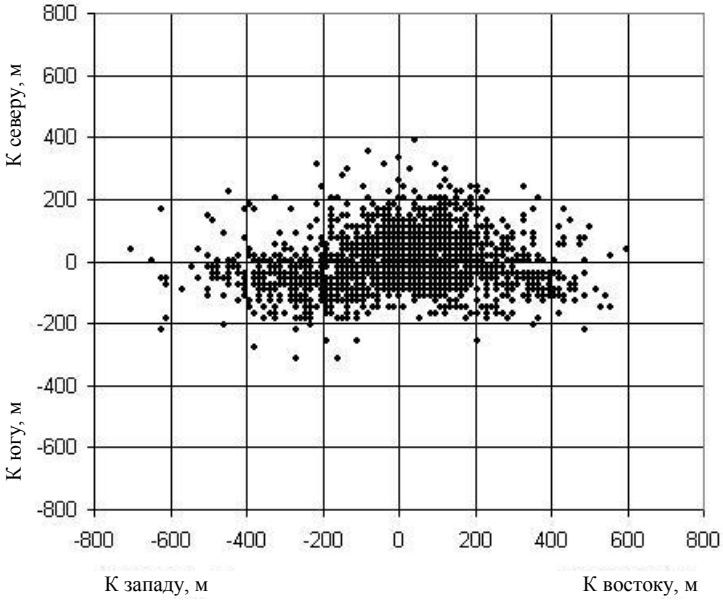


Рис. 5. Распределение центрированных координат весной и осенью

Для понимания процессов в ионосфере, влияющих на сезонные изменения точности определения координат катастроф, полезно рассмотреть распределение качественных обсерваций по времени суток. Качественными обсервациями считались только те, которые имели признак “ОК” и сопровождались углами кульминации спутников не менее 11 и не более 74 градусов. На рис. 6 показаны графики изменения процента качественных обсерваций по каждому часу суток для зимних наблюдений (левая панель) и для наблюдений весной и осенью. Процент качественных обсерваций (см. рис. 6) рассчитывался по следующей формуле: $p_j\% = (n_j/N)\times 100$, где n_j – количество качественных обсерваций в j-м часу суток, N – общее количество качественных обсерваций за время наблюдений. Зимой было получено 1189 таких обсерваций. В наблюдениях осенью и весной $N = 2129$.

На рис. 6 можно проследить влияние солнечного терминатора на качество обсерваций. Наибольший процент надёжных определений координат в зимнее время приходился на тёмное время суток, когда физические параметры ночной ионосферы стабилизировались перед восходом и после захода Солнца.

На правой панели (см. рис. 6) видно, что удачных обсерваций весной и осенью становится меньше во время восхода и захода Солнца. Увеличение надёжных обсерваций в дневное время объясняется увеличением светлого времени суток, в течение которого ионосфера успевает стабилизироваться.

Судя по рис. 6, характер суточного хода количества надёжных обсерваций весной и осенью менее изменчив по сравнению с зимним временем. Следует отметить присутствие ярко выраженного 12-часового периода колебаний $p_j\%$ независимо от сезона года.

Подводя итог проделанному исследованию, следует сделать вывод о влияния сезона года на точность определения координат терпящих бедствие. С увеличением продолжительности светлого времени суток точность ухудшается. В зимних наблюдениях на долю качественных приходилось 69,65 % обсерваций. В весенних и осенних наблюдениях их число увеличилось до 77,56 %. Следовательно, на долю обсерваций сомнительной точности приходится почти каждое четвёртое определение координат катастроф. Поэтому необходимо продолжить исследования, направленные на оценку точности координат доплеровских спутниковых навигационных систем, полученных при углах кульминации спутников менее 11 и более 74 градусов.

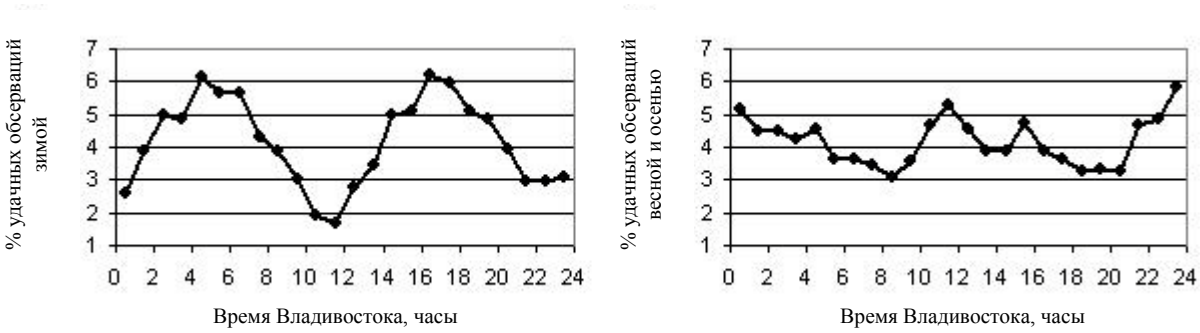


Рис. 6. Суточный ход процента качественных обсерваций

ЛИТЕРАТУРА

1. Дэвис, К. Радиоволны в ионосфере / К. Дэвис. – М.: Мир, 1973. – 502 с.
2. Международная космическая радиотехническая система обнаружения терпящих бедствие / А. И. Балашов [и др.]; под ред. В. С. Шебшаевича. – М.: Радио и связь, 1987. – 376 с.
3. Комаровский Ю. А. Повышение точности определения координат доплеровскими спутниковыми навигационными системами / Ю. А. Комаровский // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Вып. № I-1(1)/2010. Серия: Науки о природе и технике. – Комсомольск-на-Амуре: КнАГТУ, 2010. – С. 40-43.

Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета № II-1(2) 2010

Котляров В.П., Воробьев А.А.
V.P. Kotlyarov , A.A. Vorobiev

О РЕШЕНИЯХ ПОВЫШЕНИЯ КРИПТОСТОЙКОСТИ ШИФРОВ С ПОМОЩЬЮ КОНТИНУАЛЬНОГО МНОЖЕСТВА

ON SOLUTIONS TO IMPROVE CRYPTOGRAPHIC ENDURANCE OF CIPHERS USING CONTINUUM SET

Котляров Валерий Петрович – кандидат технических наук, профессор кафедры «Информационные системы», декан факультета компьютерных технологий Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Россия, 681013, г.Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, д. 27, тел.: +7–(4217)–59–46–59, e–mail: fct@knastu.ru
Mr. Valeriy P.Kotlyarov – Ph.D., Professor of the Department of Information Systems, Dean of the Faculty of Computer Science, Komsomolsk-on-Amur State Technical University», 27, Lenina prospect, 681013 Komsomolsk-on-Amur, Khabarovsky region, Russian Federation, tel: +7–(4217)–59–46–59, e–mail: fct@knastu.ru

Воробьев Антон Александрович – студент пятого курса (специальность 230401 «Прикладная математика») Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Россия, 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, д. 27, тел.: 8-909-845-58-72, e–mail: zeromem@acm.org
Mr. Anton A.Vorobiev – last-year student, discipline No. 230401 «Applied Mathematics», Komsomolsk-on-Amur State Technical University», 27, Lenina prospect, 681013 Komsomolsk-on-Amur, Khabarovsky region, Russian Federation, cell.: 8-909-845-58-72, e–mail: zeromem@acm.org

Аннотация: В данной работе рассмотрена проблема, общая для симметричного шифрования, шифрования с открытым ключом, – атака методом «грубая сила». Предложено решение в виде использования континуального множества действительных чисел через взаимно-однозначное отображение дискретных натуральных величин на сферу Римана с возможностью повышения криптостойкости при помощи варьирования запятой.

Summary: The paper considers a problem that is common for symmetric encryption and public key encryption – the so-called "brute force" attack. Proposed is a solution to it in the form of using a continuum set of real numbers via one–to–one mapping of discrete natural values onto the Riemann sphere with a possibility of increasing the cipher endurance by binary point variations.

Ключевые слова: криптография, сфера Римана, варьирование запятой, «грубая сила», защита информации, континуальные множества.

Keywords: cryptography, Riemann sphere, comma variations, brute force, information security, continuum sets.

УДК 003.26, 004.056.5

Симметричное шифрование, шифрование с открытым ключом, предложенные много десятилетий назад [5], имеют кроме преимуществ ряд недостатков. Одним из недостатков

Поступила в редакцию 03.05.2010 г.

является проблема «bruteforce» (англ. грубая сила), то есть атака методом «грубая сила». В качестве преимуществ можно указать простоту основной идеи указанных алгоритмов.

В симметричных алгоритмах атака методом «грубая сила» заключается в переборе всевозможных ключей. В алгоритмах с открытым ключом часто используются в качестве функции с секретом сложные математические задачи, требующие, без знания секрета [4, 5], больших ресурсов для вычислений. Примером таких задач может служить задача о разложении достаточно больших чисел на множители (факторизация) или дискретное логарифмирование.

Известно [4], что указанные выше задачи являются сложными для решения, хотя данное утверждение и не совсем верно, так как не доказано, что они действительно являются сложными, и отсутствие быстрого алгоритма решения не говорит о несуществовании такого.

Показать "тенденцию" к нахождению все более быстрых алгоритмов, а также невозможность предсказания временного периода, в течение которого подобные задачи будут решены, можно на примере задачи разложения на множители.

В 1979 г. Рон Ривест [4] высказал предположение, что еще 40 квадриллионов лет понадобится для разложения на множители числа порядка 10125. А как произошло на самом деле: уже в 1994 г. на множители разложили число порядка 10129, благодаря параллельным вычислениям 1800 компьютеров в течение 8 месяцев.

В то же время с развитием вычислительных мощностей алгоритмы также развиваются: алгоритм квадратной сетки, сетка общего поля чисел, сетка специальных чисел [4]. В 1989 г. никто не говорил бы о практическом применении сетки общего поля чисел, в 1993 сказали бы, что реализация практически возможна, а сегодня они уже есть и работают быстрее алгоритма квадратной сетки.

Известны (см. рис. 1) результаты разложения на множители за период с 1983 по 1994 гг., вследствие которых нелинейность прогресса [4] в данной области очевидна. При этом даже Аржан Лестра – ведущий в мире «раскладыватель» на множители не берется делать предсказания, следовательно, никто не застрахован от компрометации атакой «грубой силой».

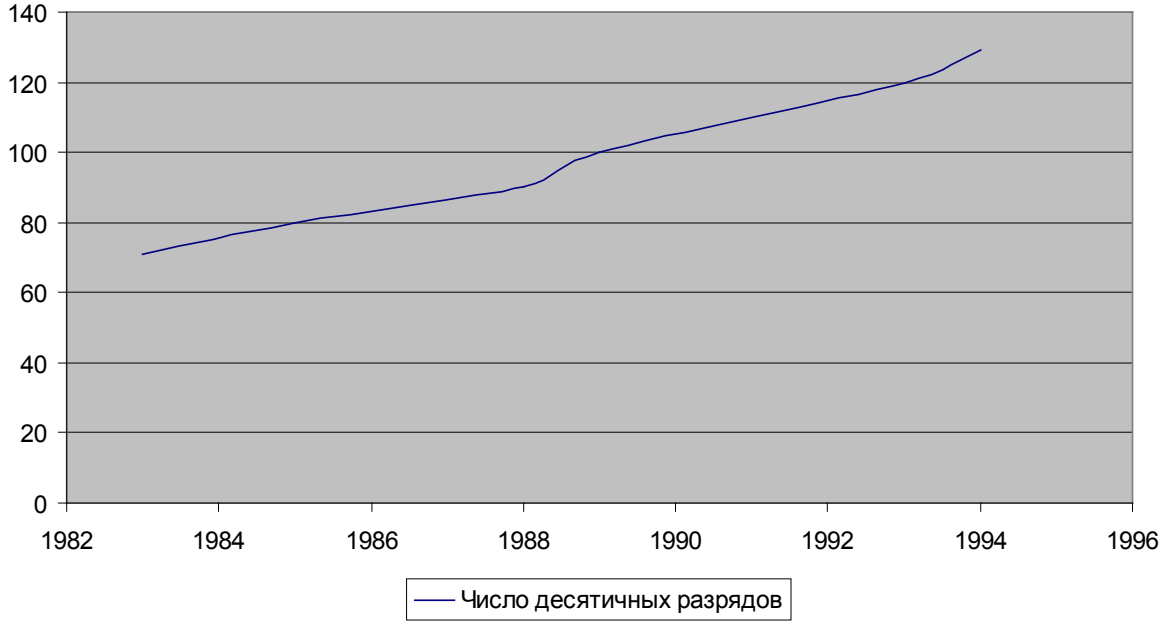


Рис. 1. Диаграмма зависимости числа десятичных разрядов от года

Из такого опасного положения выходят, например, увеличением длины ключа. Но, как и на взлом ключа требуется время, пропорциональное длине, так и на шифрование сообщения необходимо время, также зависящее от размера ключа.

Исходя из текущего положения, логично задать вопрос: можно ли предоставить такой криптографический алгоритм, которой бы совершенно не поддавался данному виду атаки?

Ответ на этот вопрос неоднозначный. Но главная идея состоит в том, чтобы дискретное количество элементов представить элементами континуального множества. Тогда для перебора необходимо будем перебрать весь континуум, что невозможно.

Решение о повышении криптостойкости шифров

Одним из вариантов взаимно-однозначного преобразования дискретных элементов натуральных чисел в совокупность действительных чисел на практике может служить отображение на сферу Римана.

Пусть дано некоторое множество дискретных данных $I = \{a_i\}, i = 1,2,\ldots,n.$. Предполагаем, что каждый элемент a_i является 8-битовым беззнаковым целым числом в диапазоне $[0,255]$.

Сопоставим ему некоторое равномощное множество $K = \{b_i\}$, т.е. другими словами $|I| = |K|$. Из данного сопоставления получим некоторую совокупность упорядоченных пар $C = \{(a_i, b_i)\}, i = 1,2,\ldots,n.$ Назовем шумовой функцией некоторую функцию $n(i)$ генерации элементов $b_i = n(i)$.

Тогда пары (a_i, b_i) можно считать некоторыми точками комплексных чисел z_i на комплексной плоскости Ψ.

Из теории функций комплексной переменной [3] известно, что эти пары могут быть биективно отражены на сферу Римана некоторого радиуса R с выколотой вершиной, так как предполагаем невозможность постановки точки в бесконечности.

В результате такого отображения совокупность упорядоченных пар перейдет в совокупность троек чисел

$$S = \{x(a_i, b_i), y(a_i, b_i), z(a_i, b_i)\} = \{x_i, y_i, z_i\}. \quad (1)$$

Покажем возможность данного отображения.

Пусть дана декартова система координат, причем оси x и y лежат в заданной комплексной плоскости Ψ, и на плоскости имеем заданную точку $a(x_i, y_i)$. Также имеем сферу Римана радиусом R с выколотой верхней вершиной P, которая касается Ψ в начале координат, причем точка P лежит на оси z. Проведем некоторую прямую через данную выколотую вершину сферы $b(0,0,2R)$ и точку на плоскости. Имеем пересечение прямой со сферой в двух местах, – в самой выколотой точке и в некоторой иной точке $\alpha(x, y, z)$ сферы. Поиск данной точки сводится из аналитической геометрии к решению системы:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 + (z - R)^2 = R^2, \\ \dfrac{x - x_i}{0 - x_i} = \dfrac{y - y_i}{0 - y_i} = \dfrac{z - 0}{2R - 0}. \end{cases} \quad (2)$$

На самом деле здесь присутствуют четыре уравнения, но нам нужны будут только три из них, причем решение $\begin{cases} x = 0 \\ y = 0 \\ z = 2R \end{cases}$ нас не удовлетворяет по построению.

Второе решение имеет вид:

$$x = \frac{4x_i R^2}{4R^2 + y_i^2 + x_i^2}, y = \frac{4y_i R^2}{4R^2 + y_i^2 + x_i^2}, z = 2R - \frac{8R^3}{4R^2 + y_i^2 + x_i^2}. \quad (3)$$

Покажем биективность данного отображения.

Действительно, по указанной выше схеме мы находили общую точку сферы и прямой. Последняя задана с помощью двух точек C и P – точки плоскости и точки выколотой вершины сферы соответственно (см. рис. 2). Отсюда находим точку Q – точку пересечения прямой со сферой. Обратно, даны две точки P и Q на сфере. Необходимо найти точку на плоскости. Очевидно, что при данных двух точках система (2) и равенства (3) дадут нам ту же самую прямую, которая пересечет комплексную плоскость Ψ в требуемой точке C. Таким образом, комплексная плоскость оказывается вложенной в сферу.

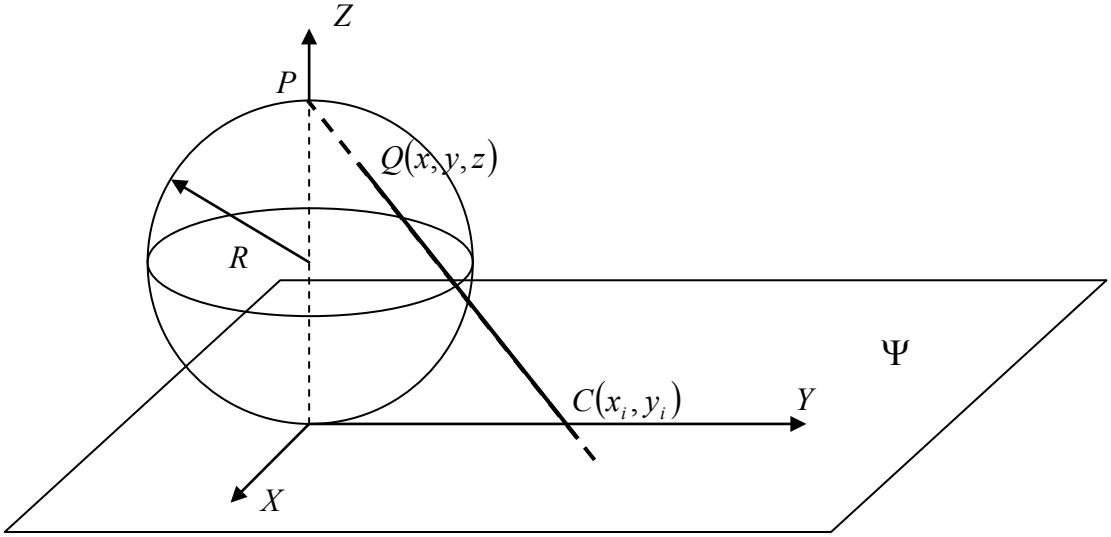


Рис. 2. Отображение комплексной величины C на сферу Римана

При вычислении значений (3) вероятнее всего мы получим числа с плавающей точкой, и, соответственно, потери точности неизбежны. Следовательно, задача состоит в том, чтобы найти и исследовать параметры обратного преобразования для однозначного обращения данных в первоначальное состояние, а также узнать и подобрать такие из них, чтобы выполнялось условие невозможности использования атаки методом «грубая сила».

Основная гипотеза состоит в том, что варьируя бесконечно малые величины заданного порядка $\varepsilon > 0$, действующие по неустойчивой схеме [1] (т.е. небольшое изменение бесконечно малого влечет сильное искажение данных), невозможно будет использовать перебор всего отрезка действительных чисел, так как мощность любого бесконечно малого отрезка на множестве действительных чисел есть континуум.

Кроме того, добавление четвертого параметра к каждой тройке координат точек $Q_i, i = 1,2,\ldots,n.$, а для определенности предположим, что это будет масса точки, можно определить некоторую механическую систему материальных точек, что при некоторых допущениях дает нам аппарат динамики твердого тела, базирующийся на законах Ньютона.

Произведем первичный анализ исходя из полученных формул биективного отображения на сферу.

Каждая точка Q_i в пространстве образована соотношениями (3), причем в общем случае компоненты Q_i принадлежат континуальному множеству. Чтобы получить и произвести оценки погрешностей, рассмотрим различные случаи представления этих отношений. Для

упрощения положим, что мы рассматриваем некоторое соотношение $\frac{x}{y}$, где $x > 0, y > 0$, так как полученные выводы можно легко расширить и для формул (3).

Логично, что при делении одного числа на другое мы можем получить ответ лишь с некоторой долей точности. Из теории погрешностей известно [1], что, зная относительную погрешность числа, можно восстановить некоторое количество значащих цифр. Очевидно, что для однозначного восстановления информации нам необходимо определить, сколько в том или ином случае взять цифр, чтобы обратное преобразование дало ожидаемый результат.

Для соотношения $\frac{x}{y}$ основные варианты использования можно представить в виде

$$\frac{x}{y} = z_{\approx} + \sigma_z z_{\approx}, \tag{4}$$

где $z_{\approx}$ – приближенный результат дроби; σ_z – относительная погрешность результата дроби, $x \in \{N, Q, R\}, y \in \{N, Q, R\}, x > 0, y > 0$

Рассмотрим самый простой первый случай, когда числитель и знаменатель являются числами натуральными, тогда в формуле (3) очевидно, что $x_i \in N, y_i \in N, R \in N$. Так как числа натуральные, значит, операция выполняется на числах без погрешностей. Но результат деления может оказаться как конечной десятичной дробью, так и бесконечной периодической. Отсюда встает вопрос: с какой точностью передать значение (4) удаленной стороне, чтобы имелась возможность однозначно обратить данные в исходное состояние и повысить криптостойкость?

Гипотетически, точность, с которой нужно передавать число, можно определить по количеству значимых цифр. Но для данных рассуждений нам потребуется знать, сколько будет цифр в результате операции, если известно начальное количество знаков в каждом из операндов. Определить для операции сложения количество знаков не составляет труда, поэтому рассмотрим операцию умножения. Для этого сформулируем и докажем теорему.

Теорема 1: Пусть x и y – целые, причем x состоит из $n > 0$ цифр, а y состоит из $m > 0$ цифр. Тогда $z = xy$ не превышает $m + n$ цифр. Числа x и y представлены в десятичной системе.

Доказательство:

Для определенности положим, что $n \le m$.

В десятичной системе записи возможные цифры в числе представляются в виде от 0 до 9. То есть, если мы хотим из k цифр составить целое число, то минимальное такое число будет $1\underbrace{000\ldots0}_{k-1\text{ раз}}$, а максимальное, – $\underbrace{999\ldots9}_{k\text{ раз}}$.

Докажем теорему по методу индукции.

1. Пусть $m = 2$, тогда n может быть либо 1, либо 2. Имеем в максимальном случае: $99 \cdot 9 = 891\,(3\text{ знака})$ и $99 \cdot 99 = 9801\,(4\text{ знака})$. Условие выполняется.
2. Предполагаем, что $m = k, k \in N$, тогда $n \in [1, k]$ и условие также выполняется.
3. Покажем, что условие выполняется и при $n = k + 1$.

Пусть $x = 9\underbrace{99\ldots9}_{k\text{ раз}}$ и $y = 9\underbrace{99\ldots9}_{i\text{ раз}}$, где $i = \overline{1, k}$. Данные числа можно представить в виде следующих сумм:

$$x = \underbrace{99\ldots9}_{k} + 9 \cdot 10^k,$$

$y = \underbrace{99\ldots9}_{i-1} + 9 \cdot 10^{i-1}$.

Рассмотрим их произведение.

$xy = \underbrace{99\ldots9}_{k} \cdot \underbrace{99\ldots9}_{i-1} + \underbrace{99\ldots9}_{k} \cdot 9 \cdot 10^{i-1} + \underbrace{99\ldots9}_{i-1} \cdot 9 \cdot 10^{k} + 9 \cdot 9 \cdot 10^{k+i-1}$.

По пунктам 1 и 2 первые три произведения можно свернуть. Тогда имеем:

$xy = \underbrace{99\ldots9}_{k+i-1} + \underbrace{99\ldots9}_{k+1}\underbrace{00\ldots0}_{i-1} + \underbrace{99\ldots9}_{i}\underbrace{00\ldots0}_{k} + 81\underbrace{00\ldots0}_{k+i-1} =$

$$\left(\underbrace{99\ldots9}_{k+i-1} + 81\underbrace{00\ldots0}_{k+i-1}\right) + \left(\underbrace{99\ldots9}_{k+1}\underbrace{00\ldots0}_{i-1} + \underbrace{99\ldots9}_{i}\underbrace{00\ldots0}_{k}\right)$$

Первая скобка дает число $81\underbrace{99\ldots9}_{k+i-1}$ с $k+i+1$ знаком, вторая скобка аналогично дает число с $k+i+1$ знаком. Отсюда при сложении получаем число максимум с $k+i+2$ знаками.

Так как произведение коммутативно, то теорема будет справедливой и для $n > m$. Таким образом, по методу математической индукции теорема доказана.

Покажем максимальное количество цифр, достаточных для однозначного восстановления информации.

Выберем число $\frac{1}{3}$ с некоторой точностью (обозначим его как $\frac{1}{3_{\approx}}$) и получим из данного числа число $\frac{1}{9}$ с некоторой точностью, далее умножим приближенное значение на 9, тем самым показав, какие условия способствуют его округлению к точному результату 1.

Пусть $\frac{1}{3_{\approx}} = 0.3333$ с погрешностью $\sigma_{\frac{1}{3_{\approx}}} = 0.0001$. Тогда

$\frac{1}{3_{\approx}} \frac{1}{3_{\approx}} = \frac{1}{9_{\approx}} = 0{,}11108889$ с погрешностью $\sigma_{\frac{1}{9_{\approx}}} = 0.0002$.

Но $9 \cdot \frac{1}{9} \approx \left(\frac{1}{3_{\approx}} \frac{1}{3_{\approx}} + \sigma_{\frac{1}{9_{\approx}}} \frac{1}{3_{\approx}} \frac{1}{3_{\approx}}\right) \cdot 9 = \overbrace{0.111111107778}^{k} \cdot 9 = 0.99999970002 \approx 1$.

Из полученного результата видно, что для восстановления исходных данных достаточно взять значащие цифры и операцией округления привести значение к точному результату.

Определим достаточное количество цифр в потоке передачи шифротекста для корректного восстановления данных. В приведенном примере мы могли бы передавать в поток данных $\frac{1}{3_{\approx}} \frac{1}{3_{\approx}}$, но тогда для применения теории погрешностей нам необходимо передавать и относительную погрешность, что неудобно. Потому логично вести передачу результата $\left(\frac{1}{3_{\approx}} \frac{1}{3_{\approx}} + \sigma_{\frac{1}{9_{\approx}}} \frac{1}{3_{\approx}} \frac{1}{3_{\approx}}\right)$. Теория погрешностей [1] утверждает необходимость выбрать минимум столько цифр, сколько имеется значащих цифр. Но, исходя из различных вариаций умножения чисел с определенной точностью, по аналогии с примером выше, гипотетически нет смысла брать более, чем $n+m+1$. Действительно, исходя из теоремы 1, можно легко показать ее справедливость и для чисел вида $\frac{1}{x}, x \in Z$. Произведение $\frac{1}{3_{\approx}} \frac{1}{3_{\approx}}$ не превышает $n+m$

цифр, а слагаемое $\sigma_{\frac{1}{9_{\approx}}} \frac{1}{3_{\approx}} \frac{1}{3_{\approx}}$ дает максимум плюс 1 цифру. Тем самым, если мы будем передавать $\left(\frac{1}{3_{\approx}} \frac{1}{3_{\approx}} + \sigma_{\frac{1}{9_{\approx}}} \frac{1}{3_{\approx}} \frac{1}{3_{\approx}} \right)$ с более чем $n+m+1$ цифрой, это не окажет никакого влияния на значащие цифры конечного результата, а значит, и не играет важной роли в операции восстановления данных.

Покажем, что для повышения криптостойкости можно использовать следующую простую схему. Представим, что данные в потоке передаются числами с плавающей точкой. Причем за 1 такт мы получаем лишь 1 цифру. В каком месте разделение разряда в числе – в потоке данных данная информация отсутствует. Отсюда получается, что для обратных преобразований, требующих достаточной точности числа, неизвестно, в каком месте числа поставить запятую (это особенно важно, когда небольшая погрешность в исходном значении дает сильное отклонение результата). Эту информацию можно представлять дополнительным ключом (назовем его степенным ключом), который и определяет, в каком месте необходимо поставить знак (варьирует запятую). Без необходимых данных о положении запятой вычислительная сложность самого алгоритма перебора возрастет в число различных положений запятой. В случае, когда информация о положении запятой известна, сложность остается прежней. Действительно, пусть вычислительная сложность обратимости некоторого алгоритма шифрования равна q. Дополняя схему отображением на сферу Римана, а следовательно и переходом к числам с плавающей запятой, данная схема позволяет повысить сложность решения задачи обратимости криптоалгоритма в k раз, где k – возможные различные положения запятой. То есть по основной теореме умножения комбинаторики мы имеем максимально возможную сложность алгоритма kq, что и требовалось показать.

Заключение

Из сказанного можно сделать следующие выводы:

1. Переход от дискретных величин не более чем счетных множеств с помощью преобразования со сферой к величинам континуальных множеств сводит на нет возможность атаки методом «грубой силы».
2. Полученные после преобразований числа с плавающей точкой как элементы континуального множества предоставляют возможность применять, например, аппарат динамики твердого тела, базирующийся на законах Ньютона.
3. Введение варьирования запятой в совокупности чисел с плавающей точкой из континуального множества позволяет повысить вычислительную сложность атаки методом «грубой силы» до k раз, где k – возможные различные положения запятой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Демидович, Б.П. Численные методы анализа. Приближение функций, дифференциальные и интегральные уравнения. – 3-е изд. / Б.П. Демидович, И.А. Марон, Э.З. Шувалова. – М.: Наука, 1967. – 368 с.
2. Новиков, Ф.А. Дискретная математика для программистов. – 2-е изд. / Ф. А. Новиков. – СПб.: Изд-во Питер, 2006. – 364 с.
3. Свешников, А.Г. Теория функций комплексной переменной. – 5-е изд. / А.Г. Свешников, А.Н. Тихонов. – М.: Физматлит, 2004. – 336 с.
4. Шнайер, Б. Прикладная криптография: Протоколы, алгоритмы, исходные тексты на языке Си / Б. Шнайер. – М.: Изд-во Триумф, 2002. – 816 с.
5. Ященко, В.В. Введение в криптографию. / В.В. Ященко. – М.: МЦНМО, "ЧеРо", 1998. – 271 с.

Космынин А.В., Щетинин В.С.
A.V. Kosmynin, V.S. Scthetinin

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ НА БЕСКОНТАКТНЫХ ОПОРАХ ЗА СЧЁТ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗОМАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ

IMPROVING HIGH-SPEED SPINDLE ASSEMBLIES ON NO-CONTACT BEARINGS USING GAS-MAGNETIC BEARINGS

Космынин Александ Витальевич, доктор технических наук, профессор, декан ФЭТМТ Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (КнАГТУ). Тел. 8(4217)534191. E-mail: avkosm@knastu.ru
Alexander V.Kosmynin – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Power Engineering, Transport and Marine Technologies, State Komsomolsk-on-Amur Technical University (Komsomolsk-on-Amur), phone: 8(4217)534191, e-mail: avkosm@knastu.ru.

Щетинин Владимир Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, докторант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (КнАГТУ). Тел. 8(4217)531474. E-mail: schetynin@mail.ru
Mr. Vladimir S. Schetinin – Doctor of Engineering, Associate Professor, candidate for a doctoral degree, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, phone: 8(4217)531474, e-mail: schetynin@mail.ru.

Аннотация: Рассмотрено влияние магнитной силы на несущую способность и жесткость шпиндельного узла с газомагнитной опорой. Сделан сравнительный анализ эксплуатационных характеристик шпиндельного узла с газомагнитной и газостатической передней опорой. Определены области технологического использования таких шпиндельных узлов.

Summary: The paper investigates the influence of magnetic force on bearing ability and rigidity of spindle assembly with a gas-magnetic bearing. A comparative analysis of performance of a spindle assembly with a gas-magnetic/gas-static front support is made. Areas for industrial use of such spindle assemblies are defined.

Ключевые слова: шпиндельный узел, газомагнитная опора, шпиндельные подшипники, газостатические подшипники, несущая способность, жесткость шпиндельного узла.

Keywords: spindle assemblies, gas-magnetic bearings, spindle bearings, gas-static bearings, bearing ability, rigidity of spindle assemblies.

УДК 62-229.331:621.924

Подъем промышленного производства в стране, в том числе и предприятий машиностроительного комплекса, обусловливает спрос на металлорежущие станки. При этом возрастает потребность в высокоточном и высокопроизводительном оборудовании.

Скоростной параметр станка зависит от вида шпиндельного узла (ШУ) и типа опор, применяемых в нем. Высокие скорости вращения шпинделя достигаются на опорах с газовой смазкой [1, 2], магнитных подшипниках [1, 3] и немного меньше на опорах качения [1].

Точность обработки зависит во многом от технологической схемы обработки. Известно, что наибольшая точность достигается при обработке детали за один установ. Кроме этого сокращается и вспомогательное время обслуживания станка. Поэтому черновые и чистовые операции желательно проводить на одном станке без открепления детали. Для этого необхо-

Поступила в редакцию 18.01.2010 г.

дим шпиндель, который должен иметь достаточную несущую способность для черновых операций и высокую жесткость на финишных операциях.

ШУ на подшипниках качения обеспечивает высокую несущую способность и невысокую жесткость [1], так как контакт происходит, согласно теории эластогидродинамики, по малому пятну контакта тела качения и дорожки качения. Газостатические и газодинамические опоры ШУ обеспечивают достаточно высокую жесткость, но при этом имеют сравнительно небольшую несущую способность.

Разработанная в КнАГТУ конструкция газомагнитной опоры (ГМО) [4] вполне удовлетворяет требованиям, предъявляемым к подшипникам ШУ шлифовальных станков. При выключенном питании соленоида ГМО способна работать в режиме газостатического подшипника, а при включенном соленоиде – в режиме газомагнитного воздействия на шпиндель. При этом в последнем случае опора имеет несущую способность выше в сравнении с традиционным газостатическим подшипником.

В настоящее время характеристики ГМО остаются не изученными, что требует особого внимания этому вопросу. В работе [5] приводятся статические испытания несущей способности такой опоры. Результаты исследований показали, что несущая способность ГМО по сравнению с газостатическим подшипником практически удваивается.

Выполним сравнительную оценку характеристик ШУ с передней газостатической и газомагнитной опорой по двум основным параметрам – жесткости и несущей способности. В обоих случаях задний подшипник шпинделя газостатический.

Несущая способность передней комбинированной опоры определяется как результирующий вектор двух векторов – магнитной силы $\vec{Q}_м$ и силой, создаваемой давлением газа $\vec{Q}_г$:

$$\vec{Q}_1 = \vec{Q}_м + \vec{Q}_г .$$

Нагрузка на шлифовальном круге определяется на основе известной методики С.А. Шейнберга. Типовая схема ШУ с креплением шлифовального круга на консоли шпинделя показана на рис. 1.

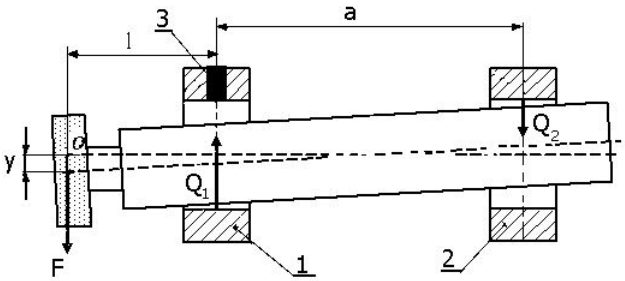


Рис. 1. Схема шпиндельного узла:1 – передний газомагнитный подшипник; 2 – задний газостатический подшипник; 3 – магнитопровод соленоида

Нагрузка на шлифовальном круге находится из двух уравнений статики:

1) суммы проекций сил на ось *Y*:

$$Q_1 - Q_2 - F = 0,$$

2) уравнения моментов относительно точки *O*:

$$Q_1 l - Q_2 (a + l) - M = 0,$$

где Q_2 – несущая способность задней опоры; M – восстанавливающий момент от перекоса, равный сумме моментов переднего подшипника, заднего подшипника и подпятника.

Жесткость, измеренная на шлифовальном круге, определяется по формуле

$$J = dF / dy,$$

где *y* – смещение оси круга.

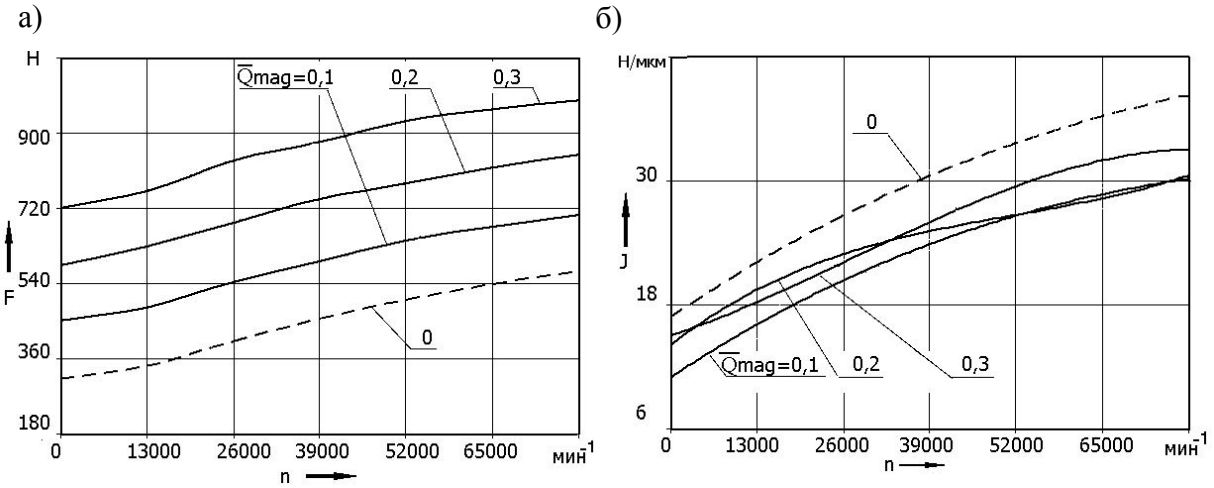


Рис. 2. Эксплуатационные зависимости шпиндельного узла:
а – несущей способности (F); б – жесткости (J) от быстроходности
(для $P_{изб}$ = 5 атм, L_1 = 60 мм, D_1 = 50 мм)

Усилие, развиваемое электромагнитом $Q_м$, рассчитывается согласно выражению:

$$Q_м = K_э h^{-2} S,$$

где $K_э$ – коэффициент, учитывающий электрические параметры соленоида; h – зазор между шпинделем и вкладышем подшипника; S – площадь поперечного сечения магнитопровода.

Газовая составляющая несущей способности ГМО $Q_г$ находилась с помощью решения модифицированного уравнения Рейнольдса теории газовой смазки [2].

Результаты расчетов представлены на рис. 2, на которых $\overline{Q}_м$ – относительная магнитная сила, равная отношению текущего значения магнитной силы к максимально возможной грузоподъемности ГМО при отключенном электромагните.

Из показанных зависимостей видно, что на частотах вращения шпинделя до 65 000 мин$^{-1}$ нагрузка на шлифовальном круге с включённым электромагнитом передней опоры вдвое выше, чем при отключенном ($\overline{Q}_м$ = 0). При этом потеря жесткости составляет около 20 %. Снижение жёсткости происходит вследствие увеличения магнитного зазора с ростом эксцентриситета. На режиме работы передней опоры ШУ с включенным электромагнитом можно обрабатывать детали на черновых и получистовых операциях с припусками для соответствующих видов обработки. После выключения электромагнита, без переустановки детали, проводятся чистовые и финишные виды обработки с меньшими силами резаниями, когда не требуется большая нагрузка на шлифовальном круге. При этом жесткость, измеренная на шлифовальном круге, заметно возрастает, что позволяет получить точность, заданную требованиями на обработку детали.

Приведенный выше анализ основных эксплуатационных характеристик высокоскоростных ШУ с передней газомагнитной опорой показывает, что данное техническое решение позволит более эффективно использовать станочное оборудование за счет уменьшения вспомогательного времени на установку и снятие детали. Кроме этого, обработка детали за один установ позволяет добиться наибольшей точности из всех технологических схем обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пуш, А.В. Шпиндельные узлы: Качество и надёжность / А.В. Пуш. – М.: Машиностроение, 1992. – 228 с.
2. Эксплуатационные характеристики газовых опор высокоскоростных шпиндельных узлов / А.В. Космынин, Ю.Г. Кабалдин, В.С. Виноградов, С.П. Чернобай. – М.: Изд-во «Академия Естествознания», 2006. – 219с.
3. Журавлёв, Ю.П. Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение / Ю.П. Журавлев. – СПб.: Политехника, 2003. – 206с.
4. Пат. 2347960 РФ. Способ работы подшипникового узла и подшипниковый узел / Космынин А.В., Щетинин В.С.; заявитель и патентообладатель Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т.- № 2007120545/11; заявл. 01.06.07; опубл. 27.02.09, Бюл. № 6. – 1 с.
5. Космынин, А.В. Применение магнитной силы в газостатических опорах высокоскоростных шпиндельных узлов / А.В. Космынин, В.С. Щетинин, Н.А. Иванова // Вестник машиностроения. – 2009. – № 5. – С. 19-21.

Сарилов М.Ю., Биленко С.В., Алтухова В.В., Линев А.С.
M.Y. Sarilov, S.V. Bilenko, V.V. Altukhova, S.A. Linev

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

ARTIFICIAL NEURON NETWORSK IN ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING CONTROL SYSTEMS

Сарилов Михаил Юрьевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. E-mail: sarilov@knastu.ru.
Mr.Mikhail Y.Sarilov – Doctor of Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Chemical Production Machinery and Equipment, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: sarilov@knastu.ru.

Биленко Сергей Владимирович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. E-mail: s.bilenko@knastu.ru.
Mr.Sergey V.Bilenko – Doctor of Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Mechanical Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), e-mail: s.bilenko@knastu.ru.

Алтухова Виктория Викторовна – старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. E-mail: kaftm@knastu.ru.
Ms.Victoriya V.Altukhova – Senior Lecturer of the the Department of Mechanical Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), e-mail: kaftm@knastu.ru.

Линев Александр Сергеевич – бакалавр техники и технологии, магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. E-mail: kaftm@knastu.ru.
Mr.Alexander S.Linev – Bachelor of Engineering and Technology, Master's candidate, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), e-mail: kaftm@knastu.ru.

Аннотация: Показано, что нейронные сети являются корректной информационной средой для моделирования рабочих процессов электроэрозионной обработки. Предложена методика, позволяющая оценить в режиме реального времени качество получаемой при электроэрозионной обработке поверхности и адаптивно управлять режимом обработки.

Поступила в редакцию 10.01.2010 г.

Summary: The paper shows that neural networks are a correct information environment for simulation of work processes of electrical discharge machining. A method is offered that allows for real-time evaluation of the quality of a surface resulting from electroerosive machining and for an adaptive control of machining operations.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, нейронная сеть, моделирование, качество, шероховатость, режим, акустическая эмиссия.

Keywords: electroerosive electric erosion machining, neural network, simulation, quality, roughness, operation, acoustic emission.

УДК 621.9.048.4:681.324

В случаях, когда технологические процессы носят принципиально нестационарный характер, как, например, в условиях электроэрозионной обработки (ЭЭО), системы управления технологическим оборудованием должны обеспечивать высокую надежность и производительность. Одним из наиболее качественных способов решения задач поиска оптимальных параметров технологического процесса по критериям точности и качества в зависимости от условий обработки является применение систем адаптивного управления. Систематизировать процесс построения систем управления позволяет применение принципа самоорганизации и методов искусственного интеллекта [1]. Использование алгоритмов искусственного интеллекта открывает возможность осуществления более современного подхода к решению данной проблемы в электроэрозионной обработке. Перспективной структурой в классе адаптивных систем управления технологическими режимами ЭЭО является система, в которой реальный процесс и модель процесса располагаются в контуре управления последовательно (см. рис. 1). Такие системы базируются на диагностических моделях процесса и реализуют поисковый алгоритм адаптивного управления. Эффективным математическим механизмом обобщения и распознавания могут служить искусственные нейронные сети (ИНС).

Нейронные сети открыли новые возможности в области распознавания образцов, принятия решений и решения задач в различных областях техники. Способность к моделированию нелинейных процессов, работе с зашумленными данными и адаптивность дают возможность применять нейронные сети для решения широкого класса задач. Именно нейронные сети служат физической реализацией искусственного интеллекта.

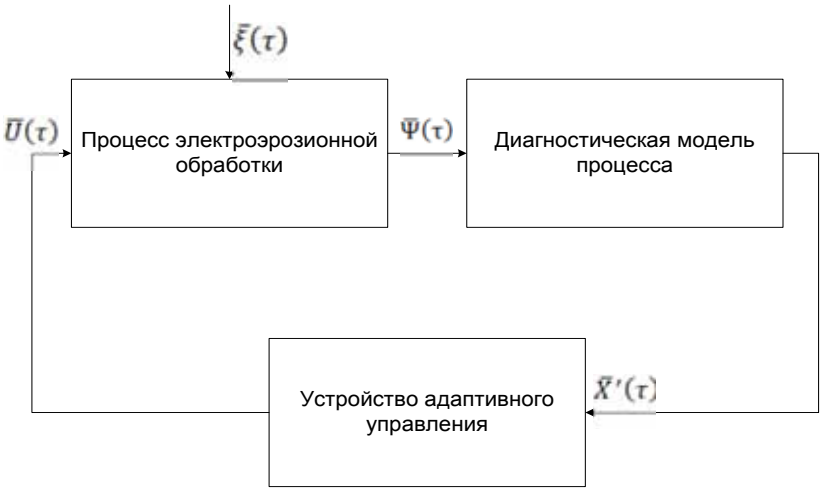


Рис. 1. Структурная схема построения адаптивного управления процессом электроэрозионной обработки: $\overline{U}(\tau)$ – вектор управления; $\overline{\xi}(\tau)$ – вектор возмущающих воздействий; $\overline{X}'(\tau)$ – вектор предполагаемых значений выходных параметров процесса; $\overline{\Psi}(\tau)$ – вектор физически измеримой информации в процессе

Нейросеть может быть достаточно формально определена как совокупность простых процессорных элементов, часто называемых нейронами. Каждый искусственный нейрон обладает группой синапсов – однонаправленных входных связей, соединенных с выходами других нейронов, а также имеет аксон – выходную связь данного нейрона, с которой сигнал поступает на синапсы следующих нейронов. Каждый синапс характеризуется величиной синоптической связи или ее весом, который по физическому смыслу эквивалентен электрической проводимости. Текущее состояние нейрона определяется как взвешенная сумма его входов:

$$Y = F \cdot \sum_{i=1}^{n} X_i w_i \,.$$

При моделировании ИНС с помощью ЭВМ нейрон обычно представляют в виде массива ячеек [w_1, w_2, … w_n], хранящихся в памяти компьютера, функционирование нейрона эмулируется путем программы подсчета выходной величины Y по значению входов X_1, X_2, ..., X_n [3; 4].

Нелинейная функция F называется активационной и может иметь различный вид. Следует отметить важную роль нелинейности активационной функции, так как, если бы она не обладала данным свойством, то вся работа нейронной сети как совокупности нейронов сводилась бы к формированию на выходах сети тривиальной линейной комбинации ее входных значений [1].

Процесс функционирования ИНС, то есть сущность действий, которые она способна выполнять, зависит от величин синаптических связей, поэтому, задавшись определенной структурой ИНС, разработчик сети должен найти оптимальные значения всех переменных весовых коэффициентов. Этот этап называется обучением ИНС и от того, насколько качественно он будет выполнен, зависит способность сети решать поставленные перед ней проблемы во время эксплуатации. На этапе обучения кроме параметра качества подбора весов важную роль играет время обучения. Как правило, эти два параметра связаны обратной зависимостью и их приходится выбирать на основе компромисса.

Перспективным направлением комплексного изучения эрозионных, тепловых и гидродинамических процессов и механизма образования поверхностного слоя заготовки является системный энергетический подход [5; 6; 7], согласно которому процесс электроэрозионной обработки следует рассматривать как систему диссипативных процессов (см. рис. 2), описываемую энергетическим уравнением. В этом случае энергии, происходящих при обработке процессов, являются компонентами системы, а сигнал виброакустической эмиссии (ВАЭ), излучаемый в процессе обработки, следует рассматривать как отображение внутреннего состояния системы. Каждая из компонент системы имеет свои свойства и характер по-

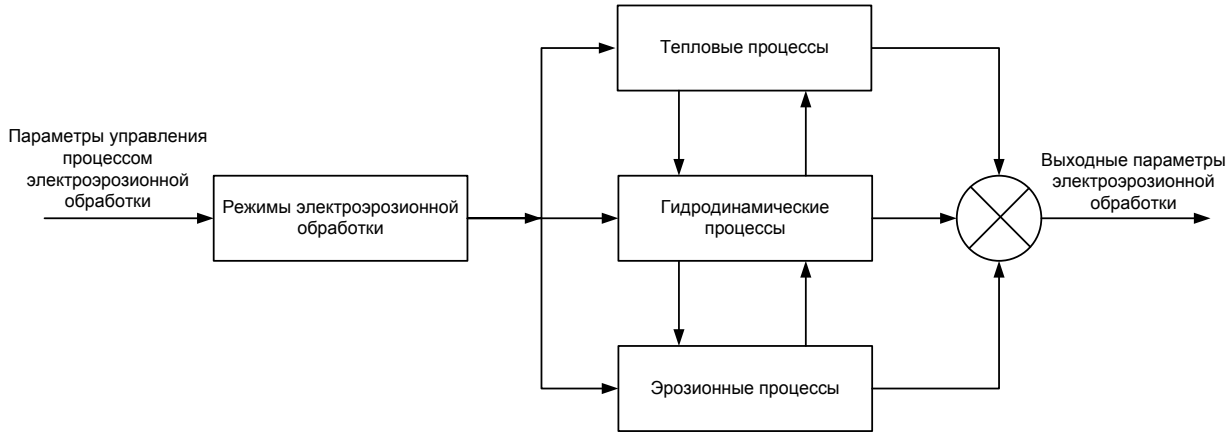


Рис. 2. Схема процесса ЭЭО в виде системы диссипативных процессов

ведения. Если все возможные проявления системы сводятся к сумме проявлений ее компонент, то такая система является простой. Для описания простых систем традиционно применяются методы анализа, состоящие в последовательном расчленении системы на компоненты и построении моделей все более простых элементов. Таковым в своей основе является метод математического моделирования, в котором модели описываются в форме уравнений, а предсказание поведения системы основывается на их решении.

Практика показывает, что существенным недостатком подобного подхода является неудовлетворительная точность (неадекватность) моделей. Подавляющее большинство технологических процессов ЭЭО не может быть представлено в виде простых систем. Тесная взаимосвязь процессов, происходящих в зоне обработки, повышает сложность системы, формализующей процесс обработки до такого уровня, когда наблюдаемое поведение и свойства системы не сводятся к простой сумме свойств отдельных ее компонент. В системе возникают качественно новые свойства, которые не могут быть установлены посредством обособленного изучения процессов. Выходом из этого положения является построение модели на основе синтеза компонент. Основным принципом синтетического информационного моделирования является принцип «черного ящика». В противоположность аналитическому подходу, при котором моделируется внутренняя структура системы, в синтетическом методе «черного ящика» моделируется внешнее функционирование системы. Функционирование системы в рамках синтетической модели описывается чисто информационно, на основе результатов экспериментов. В качестве «черного ящика» следует рассматривать совокупность взаимосвязанных диссипативных процессов, происходящих в зоне обработки. Входными данными модели являются сигналы ВАЭ, излучаемые процессом ЭЭО, а на выходе получим предполагаемые значения зависимых параметров ЭЭО – степень износа инструмента, температуру в зоне обработки, зашлакованность зоны обработки. Информационные модели, как правило, проигрывают формальным математическим моделям и экспертным системам по степени объяснимости выдаваемых результатов, однако отсутствие ограничений на сложность моделируемых систем определяет их важную практическую значимость. Задачи, решаемые с помощью информационного моделирования, не ограничиваются только диагностикой внутреннего состояния сложных технических систем. Синтетические информационные модели способны также прогнозировать динамику изменения системы, оценивать полноту описания исходной системы и сравнивать информационную значимость ее параметров. Удобным и естественным базисом для представления информационных моделей являются искусственные нейронные сети. В литературе [3] приведены доказательства того, что для любого алгоритма существует нейронная сеть, которая его реализует. Универсальную методику построения нейросетевых моделей процесса электроэрозионной обработки на базе ИНС встречного распространения можно описать следующим образом [2]:

Шаг 1: Формирование обучающей выборки, характеризующей широкий спектр условий протекания технологического процесса и состоящей из векторов $\psi(\tau_j)$ доступной для физического измерения диагностической информации о процессе и соответствующих им векторов выходных параметров процесса $X(\tau_j)$.

Шаг 2: Обобщение и классификация входных образов $\psi(\tau_j)$ диагностической информации с целью определения множества $\Theta(\Psi)$ возможных фазовых состояний технологического процесса путем самообучения слоя Кохонена.

Шаг 3: Сопоставление каждого отдельно взятого фазового состояния Θ_k процесса с наиболее вероятными значениями его выходных параметров X_k' путем обучения слоя Гроссберга.

Для диагностирования качества обработанной поверхности и устойчивости процесса ЭЭО была разработана нейросетевая модель. Эта модель позволяет в режиме реального времени оценить мгновенные значения степени износа инструмента, зашлакованность и диагностировать шероховатость получаемой поверхности по сигналам ВАЭ. Оценка мгновенных значений зави-

симых параметров обработки основывается на структурно-энергетическом представлении процесса ЭЭО в виде системы диссипативных процессов, описываемой энергетическим уравнением. Предполагается, что каждый из рассмотренных процессов сопровождается виброакустическими колебаниями определенной амплитуды и спектральной плотности. Суммарный сигнал ВАЭ представляет собой суперпозицию колебаний, характеризующих каждое из составляющих, и является отображением внутреннего состояния процесса ЭЭО.

Таким образом, задача моделирования каждого из параметров сводится к созданию обучающей выборки сигналов ВАЭ, характеризующей фазовые переходы процесса ЭЭО (явные или размытые) в связи с изменением контролируемой величины, и соответствующего обучения нейронной сети. Обучающие выборки для нейросетевых диагностических моделей, как правило, формируются на основе однофакторных экспериментов. Спроектированная трехслойная нейронная сеть, позволяющая повысить устойчивость процесса ЭЭО и, как следствие, улучшить качество обработанных поверхностей, представлена на рис. 3.

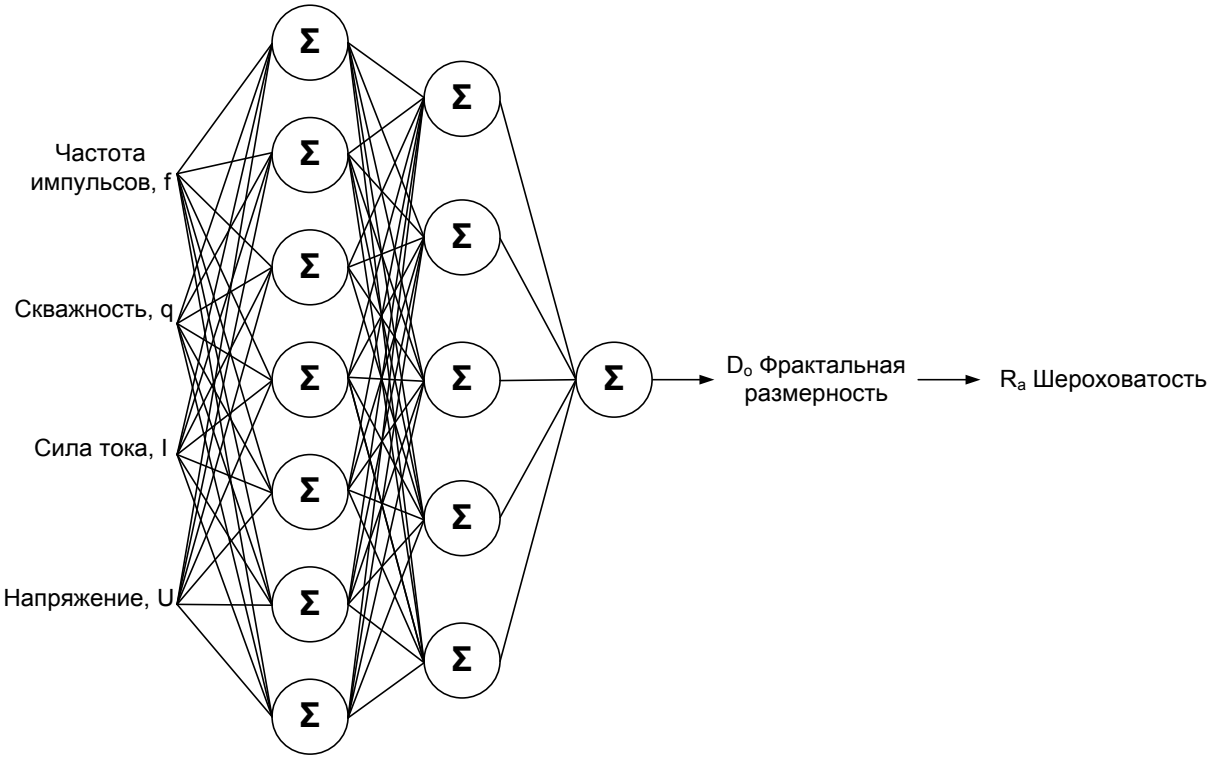


Рис. 3. Трехслойная нейронная сеть управления процессом ЭЭО

На вход системы подаются частота импульсов f, скважность q, сила тока I и напряжение U, а выходом является фрактальная размерность сигналов ВАЭ D_0, которая является критерием устойчивости процесса и показателем получаемой шероховатости при электроэрозионной обработке.

На рис. 4 представлена блок схема исследовательского стенда по реализации искусственных нейросетей при электроэрозионной обработке, созданная в лаборатории технической диагностики Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета.

В рамках задач искусственного интеллекта с применением методов оптимизации важная роль отводится использованию генетических алгоритмов, то есть определенным образом построенные комбинации переборных и градиентных методов. Эти алгоритмы обладают высокой способностью к сходимости в процессе нахождения оптимума. Для обеспечения функционирования системы оптимального управления необходимо предусмотреть в составе системы альтернативный механизм поиска оптимального режима обработки, которым может быть экспертная система, основанная на базе знаний.

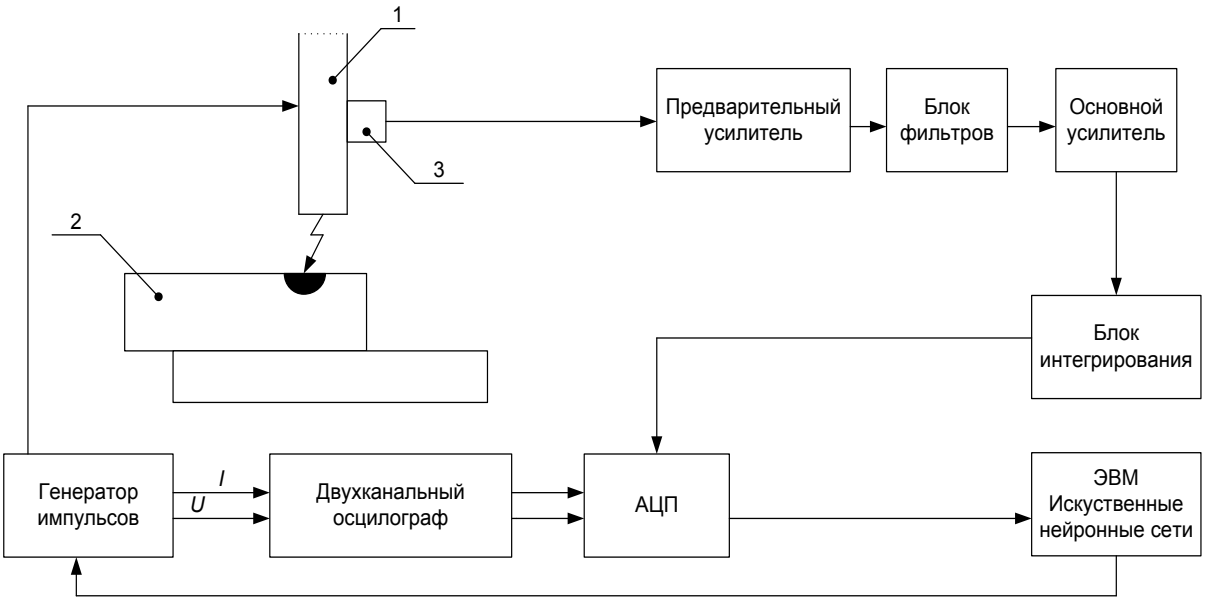


Рис. 4. Блок-схема исследовательского стенда: 1 – электрод-инструмент; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – виброакустический датчик

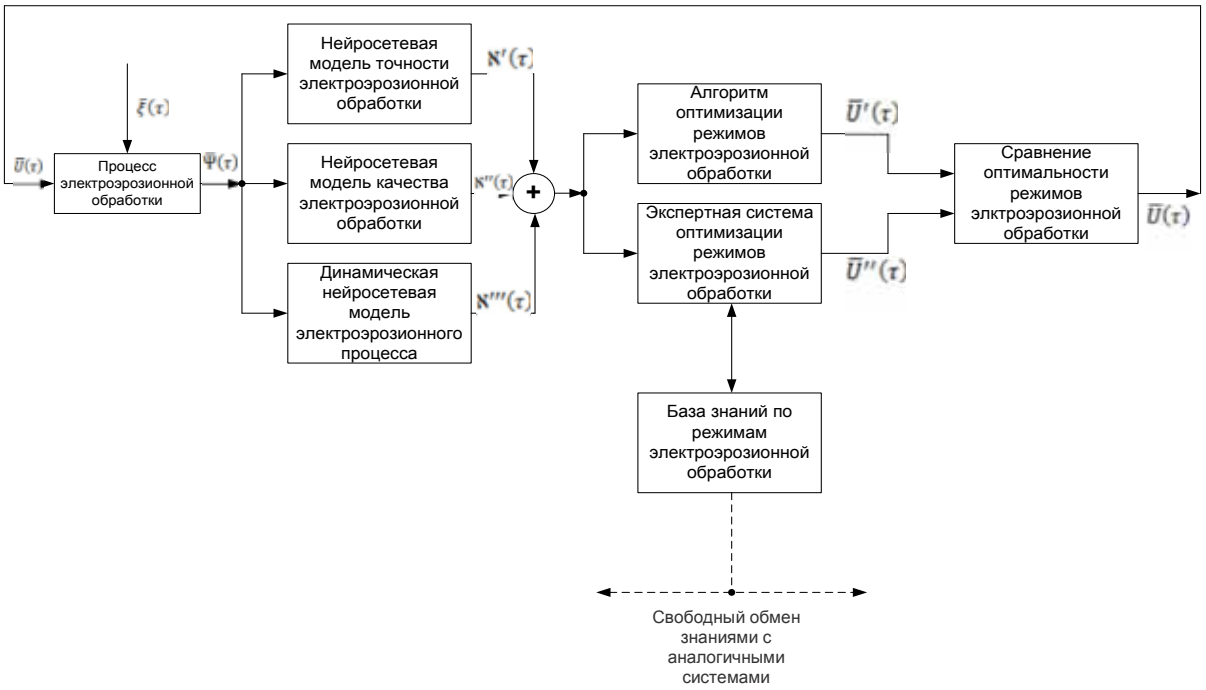


Рис. 5. Структурная схема системы адаптивного управления электроэрозионным станком, построенная на основе принципов искусственного интеллекта

Методы оптимизации режимов электроэрозионной обработки на основе генетических алгоритмов, при всей их приблизительной точности в нахождении оптимума, обладают способностью работать в условиях минимального количества априорной информации о характере процесса. Поэтому логичным подходом к построению адаптивной системы управления

электроэрозионными процессами является совместное использование в контуре поиска оптимального режима и генетического алгоритма и экспертной системы. Такой подход позволяет конструировать системы управления электроэрозионными станками с ЧПУ, способные эффективно функционировать, особенно в условиях серийного и массового производства.

Структура системы управления станком, построенная на основе принципов искусственного интеллекта, представлена на рис. 5 и обладает всеми необходимыми компонентами интеллектуально устройства. Это набор диагностических нейросетевых моделей.

Кроме того, система содержит совокупность встроенных знаний, позволяющих функционировать в совершенно незнакомых условиях начала обработки новой партии деталей, реализованную в виде алгоритма оптимизации режимов. Также в состав системы входит механизм накопления опыта и усовершенствования собственных знаний, роль которого выполняет самообучающая экспертная система. Важной особенностью предлагаемой системы управления электроэрозионным станком является ее открытость для свободного обмена информацией и знаниями с внешней средой, для ускорения сбора информации о наиболее оптимальных режимах электроэрозионной обработки в условиях массового и серийного производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кабалдин, Ю.Г. Управление динамическими процессами в технологических системах механообработки на основе искусственного интеллекта / Ю.Г. Кабалдин, С.В. Биленко, С.В. Серый. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2003. – 201 с.
2. Кабалдин, Ю.Г. Применение принципа самоорганизации и методов искусственного интеллекта в задачах синтеза систем управления технологическими процессами / Ю.Г. Кабалдин, С.В. Биленко, А.М. Шпилев, А.А. Бурков // Материалы международной научной конференции «Синергетика. Самоорганизующиеся процессы в технологиях и системах». – Комсомольск-на-Амуре, 2000. – С. 41-44.
3. Иванова, В.С. Синергетика и фракталы в материаловедении / В.С. Иванова, А.С. Баланкин, И.Ж. Бунин, А.А. Оксогоев. – М.: Наука, 1994. – 383 с.
4. Иванова, В.С. От дислокаций до фракталов: сборник тезисов докладов / В. С. Иванова. – М.: ФИПС, 1999. – С. 15-17.
5. Мицкевич, М.К. Электроэрозионная обработка материалов / М. К. Мицкевич, А. И. Бушин, И. А. Бакуто и др.; под ред. И. Г. Некрашевича. – Минск: Наука и техника, 1988. – 216 с.
6. Лифшиц, А.Л. Электроимпульсная обработка металлов / А.Л. Лифшиц, А.Т. Кравец, И.С. Рогачев, А.Б. Сосенко. – М.: Машиностроение,1967. – 198 с.
7. Золотых, Б.Н. Физические основы электроэрозионной обработки / Б.Н. Золотых, Р.Р. Мельдер. – М.: Машиностроение, 1977. – 42 с.

Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета № II-1(2) 2010

Смирнов А.В., Суходоев И.Г.
A.V. Smirnov, I.G. Sukhodoyev

ВЛИЯНИЕ РАЗДВИЖКИ ЛИНИЙ НАДДУВА ЧАСТИЧНО ПОРИСТЫХ ГАЗОСТАТИЧЕСКИХ ОПОР НА ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

THE IMPACT OF THE RELATIVE SEPARATION OF PRESSURIZATION ORIFICES IN PARTIAL POROUS AIRSTATIC BEARINGS UPON THEIR PERFORMANCE

Смирнов Алексей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Тепловые энергетические установки» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: faks@knastu.ru.
Mr. Alexey V.Smirnov – PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Heat&Power Plants, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: faks@knastu.ru.

Суходоев Иван Георгиевич – ассистент кафедры «Тепловые энергетические установки» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: faks@knastu.ru.
Mr. Ivan G.Sukhodoyev – Assistant Lecturer at at the Department of Heat&Power Plants, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: faks@knastu.ru.

Аннотация: Рассмотрены особенности работы газовых опор и области их применения. Исследовано влияние раздвижки линий наддува на эксплуатационные характеристики частично пористых газостатических подшипников.

Summary: The paper considers the features of gas bearings and their application area. The influence of the relative separation of pressurization orifices on performance capabilities of partially porous gas static bearings is analyzed.

Ключевые слова: газостатический подшипник, пористая вставка, линия наддува, эксплуатационные характеристики.

Keywords: gas static bearings, porous insert, pressurization orifice, performance.

УДК 621.822

Начиная с 50-х гг. XX столетия в связи с бурным развитием техники практически во всех развитых странах начались интенсивные теоретические и экспериментальные исследования опор с газовой смазкой.

Такой интерес к газовым опорам был вызван благодаря их определенным преимуществам по сравнению с другими видами подшипников.

К основным преимуществам газовых опор можно отнести:

1) упрощение конструкции подшипникового узла (упразднение системы смазки);

2) способность работать при высоких температурах и давлениях без потери своих эксплуатационных качеств;

3) малое трение, обусловленное небольшой динамической вязкостью газа;

4) малое тепловыделение в опорах;

5) высокую точность вращения вследствие усредняющего эффекта газовой смазочной пленки;

6) отсутствие металлического контакта, а следовательно, и износа опор, что обеспечивает высокую долговечность;

Поступила в редакцию 16.01.2010 г.

7) почти полное отсутствие вибраций и низкие шумовые характеристики.

Благодаря этим качествам, газовые опоры успешно используются во многих отраслях промышленности, в малогабаритных турбодетандерах, приборах морской и воздушной навигации, устройствах для гидростабилизации морских судов, в зубоврачебном и медицинском оборудовании, измерительных устройствах, информационном оборудовании, космической технике, в машиностроении в шлифовальных шпинделях и сверлильных фрезерных головках, в метрологическом оборудовании и т.д. [1; 2; 3].

К настоящему времени наиболее полно из газостатических опор исследованы подшипники с дросселирующими отверстиями, карманами, микроканавками. Однако практическому применению опор с газовой смазкой препятствует склонность этих опор к потере устойчивости. Во избежание вибрации и с точки зрения экономного расхода газа через подшипник нужно стремиться к весьма малым диаметрам питающих отверстий (меньше 0.1 мм). Но при постоянном давлении наддува и толщине смазочного слоя вместе с уменьшением расхода газа при весьма тонких питающих отверстиях уменьшается и несущая способность подшипника. Поэтому приходится увеличивать число питающих отверстий и габариты опоры. Это привело ученых к идее создания газовых подшипников с пористым вкладышем.

Пористые газовые подшипники с внешним наддувом обладают при прочих равных условиях повышенной несущей способностью и виброустойчивостью по сравнению с подшипниками с дискретными отверстиями. Это достигается за счет множества питающих отверстий в пористом вкладыше, при помощи которых давление питания эффективно распределяется по всему пространству зазора.

Но применение полностью пористых подшипников приводит к повышенному расходу газа. К тому же при механической обработке таких подшипников возможна пластическая деформация поверхностного слоя пористого материала. В связи с этим перспективными представляются подшипники с частично пористой стенкой вкладыша, то есть с пористыми вставками. Такие подшипники более технологичны, чем подшипники со сверлеными отверстиями или микроканавками, и более экономичны, чем полностью пористые подшипники.

Наиболее важными (основными) показателями подшипников являются характеристики жесткости смазочного слоя и несущей способности, влияние которых на работу подшипникового узла хорошо известно в практике. Поэтому проблема создания газовых подшипников с высокими эксплуатационными характеристиками имеет первостепенное значение.

В настоящей работе анализируются результаты исследований эксплуатационных характеристик (коэффициента несущей способности C_Q, коэффициента жесткости смазочного слоя k_S, относительного расхода газа $\overline{G}$, угла положения нагрузки ψ) частично пористой

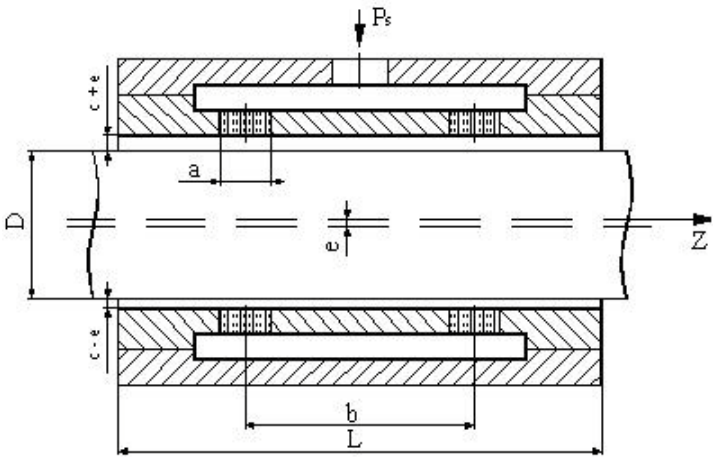


Рис. 1. Газостатический подшипник
с пористыми вставками

газовой опоры (см. рис. 1) при изменяющемся числе сжимаемости B (безразмерной частоты вращения вала) в зависимости от относительной раздвижки линий наддува $\overline{b} = b/L$ (b – расстояние между линиями наддува, L – длина подшипника).

Исследование влияния относительной раздвижки линий наддува на эксплуатационные характеристики подшипников выполнено при значениях относительной раздвижки $\overline{b}$, равных 0.2, 0.4 и 0.6.

Зависимость коэффициента несущей способности от относительной раздвижки линий наддува и числа сжимаемости представлена на рис. 2.

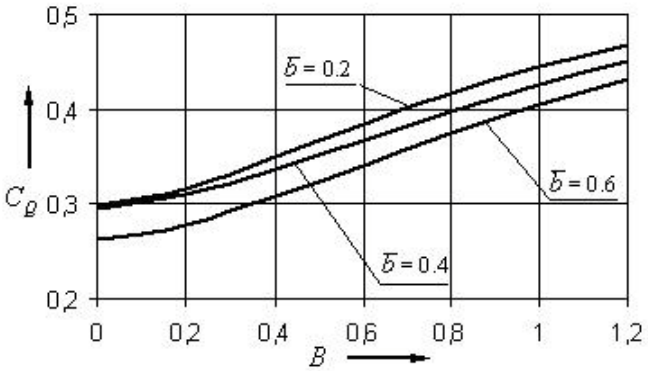


Рис. 2. Зависимость коэффициента несущей способности C_Q от числа сжимаемости B и относительной раздвижки линий наддува $\overline{b}$

Анализ представленных зависимостей показывает, что с точки зрения обеспечения наибольшей несущей способности наиболее выгодной является малая относительная раздвижка линий наддува. Это объясняется стремлением повысить несущую способность опор за счет увеличения сопротивления движению газа в области, примыкающей к торцам подшипника.

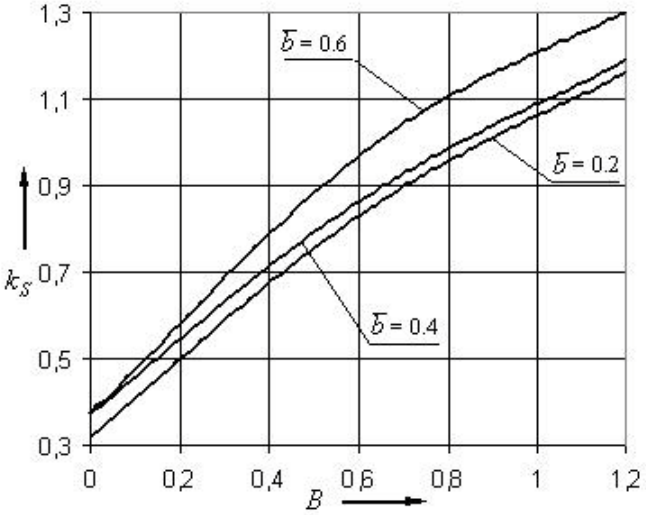


Рис. 3. Зависимость коэффициента жесткости k_S от числа сжимаемости B и относительной раздвижки линий наддува $\overline{b}$

Иная картина изменения наблюдается у жесткостных характеристик газостатических опор (см. рис. 3). При увеличении относительной раздвижки рядов пористых вставок эффект смазочного клина преобладает над внешним наддувом, вследствие чего коэффициент жесткости смазочного слоя у таких подшипников оказывается выше, чем у опор с малой относительной раздвижкой линий наддува.

Зависимость относительного расхода от относительной раздвижки линий наддува и числа сжимаемости показана на рис. 4.

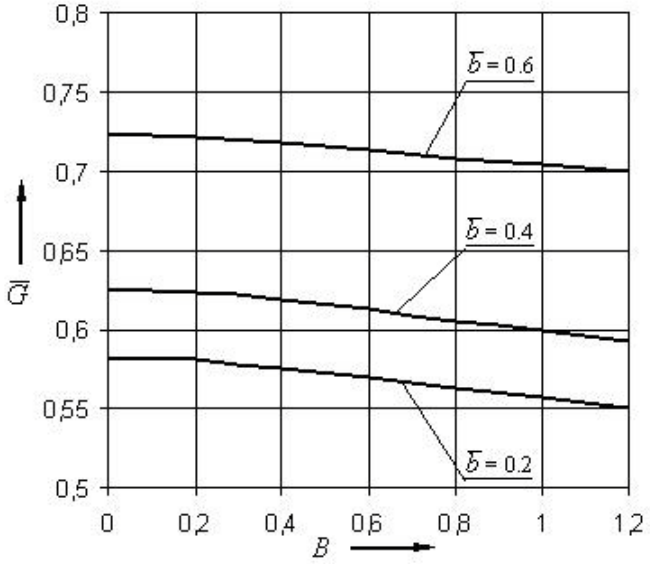


Рис. 4. Зависимость относительного расхода газа $\overline{G}$ от числа сжимаемости B и относительной раздвижки линий наддува $\overline{b}$

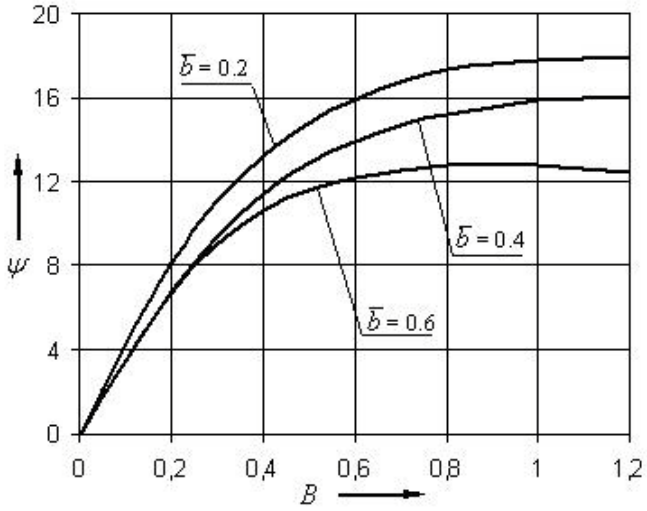


Рис. 5. Зависимость угла положения нагрузки ψ от числа сжимаемости B и относительной раздвижки линий наддува $\overline{b}$

Видно, что связанное с уменьшением относительной раздвижки линий наддува повышение сопротивления движению смазки ведет к снижению относительного расхода.

Зависимость угла положения нагрузки ψ от числа сжимаемости B и относительной раздвижки линий наддува $\overline{b}$ показана на рис. 5.

Представленные зависимости позволяют сделать вывод, что уменьшение относительной раздвижки линий наддува является нежелательным, вследствие заметного роста угла положения нагрузки, который связан с усилением внешнего наддува.

Из проведенного анализа влияния на эксплуатационные характеристики относительной раздвижки линии наддува можно сделать следующие выводы. Увеличение величины $\overline{b}$, то есть приближение линий наддува к торцам вкладыша подшипника приводит к уменьшению коэффициента несущей способности и увеличению относительного расхода газа. Однако при этом коэффициент жесткости возрастает с одновременным уменьшением угла положения нагрузки, что положительно сказывается на работе подшипника. Уменьшение же величины $\overline{b}$ приводит к обратным тенденциям. Таким образом, с целью получения оптимального сочетания эксплуатационных характеристик относительную раздвижку линий наддува необходимо задавать в области значения 0.4.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гросс, У.А. Обзор работ в области газовых подшипников с внешним наддувом за период с 1959 года / У. А. Гросс // Проблемы трения и смазки. – М.: Мир, 1969. – Т. 91. – № 1. – С. 180-185.
2. Подшипники с газовой смазкой / под ред. Н.С. Грэссэма и Д. У.Паулла. – М.: Мир, 1966. – 424 с.
3. Шишкин, И.Л. Турбомашины на газовых опорах / И.Л. Шишкин. – Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 1985. – 168 с.

Ким В.А., Отряскина Т.А.
V.A. Kim, T.A. Otryaskina

ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ НА МИКРОСТРУКТУРУ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

THE INFLUENCE OF PLASTIC DEFORMATION IN METALS DURING CUTTING UPON THE MICROSTRUCTURE OF THE SURFACE LAYER

Ким Владимир Алексеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kmtnm@knastu.ru.
Mr. Vladimir A.Kim – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Materials Technology and New Materials Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kmtnm@knastu.ru.

Отряскина Татьяна Александровна – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ktm@knastu.ru.
Ms. Tatiana A.Otryaskina – PhD Candidate, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktm@knastu.ru.

Аннотация: Используя методику компьютерной металлографии и количественного описания интерфейса структурного состояния поликристаллического материала, выполнен анализ микроструктуры обработанной поверхности при резании металлов. Установлено влияние скорости резания на количественные характеристики микро- и мезоструктур поверхностных слоев.

Summary: Using the methods of computer-aided metallography and quantitative description of the interface of structural condition of a polycrystalline material, the analysis of the microstructure of the processed metal surface at cutting is done. It is found that the speed of cutting impacts the quantitative parameters of micro- and mesa-structures in the surface layers.

Ключевые слова: металлография, интерфейс структурного состояния, резание металлов, пластическая деформация, текстура.

Keywords: metallography, the interface of structural condition, metal cutting, plastic deformation, grain.

УДК 539.374:621.9

Введение

Интенсивная пластическая деформация и температура при резании материалов определяют качество механической обработки, которая прямым образом связана с микро- и мезоструктурой поверхностного слоя. Физическая мезомеханика рассматривает кинетику структурных изменений материала при механическом воздействии как динамическую систему разномасштабных потоков дефектов кристаллического строения и других носителей пластической деформации и раскрывает важное понятие – интерфейс структурного состояния. Под интерфейсом структуры понимают комбинацию структурных элементов, наиболее полно отражающих деформационно-температурные изменения в материале и его состояние. В поликристаллических и гетерогенных материалах к ним относят форму зерен и отдельных фаз, границы их раздела, а также характер распределения точечных объектов. Из перечисленных структурных характеристик наибольшей информативностью обладают границы раздела зерен и фаз, которые по праву называют интерфейсом структуры [4; 5].

Поступила в редакцию 04.04.2010 г.

Обоснование количественных показателей интерфейса структурного состояния

Развитие структуры определяется стремлением ее свободной энергии к минимуму, в приложении к замкнутым границам раздела поликристаллического материала это условие представляется как [5]

$$\Delta F = \sum_{i=N} \left(S \cdot \gamma - V \cdot \mu \right)_i \to \min , \quad (1)$$

где S и V – площадь поверхности и объем i-го микроструктурного образования; γ и μ – удельная поверхностная энергия и химический потенциал; N – общее количество микрообъектов в заданном объеме.

Условие (1) в дифференциальной форме принимает вид:

$$d\left(\Delta F\right) = 0 . \quad (2)$$

Площадь поверхности микрообъекта можно представить фрактальным соотношением [3]:

$$S \propto \Delta^D , \quad (3)$$

где Δ – средний диаметральный размер; D – фрактальная размерность.

Из (2) с учетом (3) вытекает соотношение, соответствующее условию развития наиболее вероятной структуры:

$$Q_C = \sum_{i=N} \left(\frac{D}{3} \cdot \frac{S}{V} \right)_i \propto \frac{\mu}{\gamma} . \quad (4)$$

Полученная зависимость (4) является количественным показателем организации микроструктуры (Q_C), соответствующим минимуму приращения свободной энергии, который определяется соотношением химического потенциала к удельной поверхностной энергии.

Металлографический шлиф представляет срез объемной структуры материала в некоторой плоскости сечения, поэтому показатель Q_C в приложении к плоскостному отображению структуры принимает вид:

$$Q_C = \sum_{i=N} \left(\frac{D_Г}{2} \cdot \frac{P_З}{S_З} \right)_i , \quad (5)$$

где $D_Г$ – фрактальная размерность границы раздела; $P_З$ и $S_З$ – периметр и площадь микрообъекта в плоскости металлографического шлифа.

Плотность границ раздела представляет отношение:

$$q = \frac{P}{S} . \quad (6)$$

Тогда (5) окончательно примет вид:

$$Q_C = \sum_{i=N} \left(\frac{D_Г}{2} \cdot q \right)_i . \quad (7)$$

При наличии фрактальной взаимосвязи между различными масштабными уровнями структуры показатель Q_C применим и для анализа как микро-, так и мезоструктуры.

Пластическая деформация материала приводит к повышению плотности дефектов кристаллического строения и, как следствие этого, увеличению химического потенциала μ. Минимальная величина приращения свободной энергии в этом случае обеспечивается за счет увеличения поверхностной энергии границ раздела. Удельная поверхностная энергия определяется типом кристаллической решетки и характером атомарной связи и незначительно изменяется с повышением химического потенциала [1; 2]. Поэтому баланс между внутренней и поверхностной энергией структурного образования обеспечивается за счет роста площади границы раздела или повышения ее развитости. Количественно это проявляется в увеличении фрактальной размерности $D_Г$ и плотности q границ раздела. Следовательно, количественный показатель организации структуры Q_C характеризует внутреннюю энергию и плотность дефектов кристаллического строения. Любые структурные процессы, приводящие

к повышению химического потенциала и плотности дефектов кристаллического строения, приводят к росту показателя Q_C.

Современные компьютерные средства обработки изображений позволяют определять по фотографиям мезо- и микроструктур все необходимые количественные характеристики для расчета показателя Q_C.

Цель настоящей работы – количественное описание (с использованием компьютерной металлографии) поверхностных структур, сформированных при точении, и их связь с режимами резания и деформационными процессами.

Методика исследования

Заготовки в виде диска толщиной 5 мм из стали 3 подвергались радиальному точению резцом из Т15К6 на разных скоростях в диапазоне 600…800 м/мин. Корни стружек получали с помощью специальной установки – откидного резца [6]. Корень стружки отрезался от заготовки вместе с примыкающей к нему обработанной поверхностью, заливался в цилиндрической стальной капсуле сплавом Вуда и подвергался металлографическому исследованию.

Микроструктура определялась на микроскопе «Микро-200» при 400 кратном увеличении. Полученные цифровые фотографии микроструктур обрабатывались с помощью специальной программы Image.Pro.Plus.5.1. Процедура обработки микроструктур включала корректировку контраста, выделение границ зерен и границ раздела фрагментированных элементов, пространственную калибровку в соответствии с кратностью увеличения, измерение площади (S_i) и периметра (P_i) каждого микроструктурного образования и фрактальную размерность границ (D). На одной фотографии микроструктуры фиксировалось от 400 до 4500 объектов микроструктуры. По полученным результатам вычислялись плотность границ по формуле (6) и количественный показатель организации структуры Q_C по формуле (7).

На рис. 1 представлены фотографии микроструктур стали 3 в исходном состоянии и поверхностного слоя, сформированного при различных скоростях точения, там же изображены результаты компьютерной обработки по выделению границ раздела («скелетированные» отображения).

Для определения количественного характера распределения микроструктуры по глубине поверхностный слой разбивался на зоны толщиной 25 мкм и шириной, равной ширине зафиксированной области. В каждой зоне рассчитывались количественные характеристики микроструктур по формулам (6) и (7) и их средние значения. Глубина залегания зоны от поверхности определялась как координата центра ее площади. Полученные результаты представлены на рис. 2, 3 и 4.

Результаты и их анализ

Сравнительный анализ микроструктур (см. рис. 1) материала в исходном состоянии и поверхностных слоев, сформированных при точении, показывает следующее.

Исходную микроструктуру обрабатываемого материала можно в целом охарактеризовать как равновесную. Данное заключение обосновывается тем, что большинство зерен имеет форму, близкую к равноосной. Стыковка зерен между собой осуществляется по вершинам с тройными углами, близкими к 120^0, что, согласно закону Херинга, соответствует равенству химических потенциалов структурного состояния в соседних зернах [4]. Количественно такая структура характеризуется низкой плотностью (q) и малой величиной фрактальной размерности (D) границ раздела. Плотность границ раздела (q) отражает структурно-энергетическое состояние кристаллита или его химический потенциал, а фрактальная размерность (D) - структурно-энергетическое состояние границы раздела или суммарную величину ее поверхностной энергии.

На рис. 2, 3 и 4 исходная структура обрабатываемого материала представляет крайнюю правую точку, в которой пересекаются кривые 2, 3 и 4, соответствующие микроструктурам 2, 3 и 4 на рис. 1.

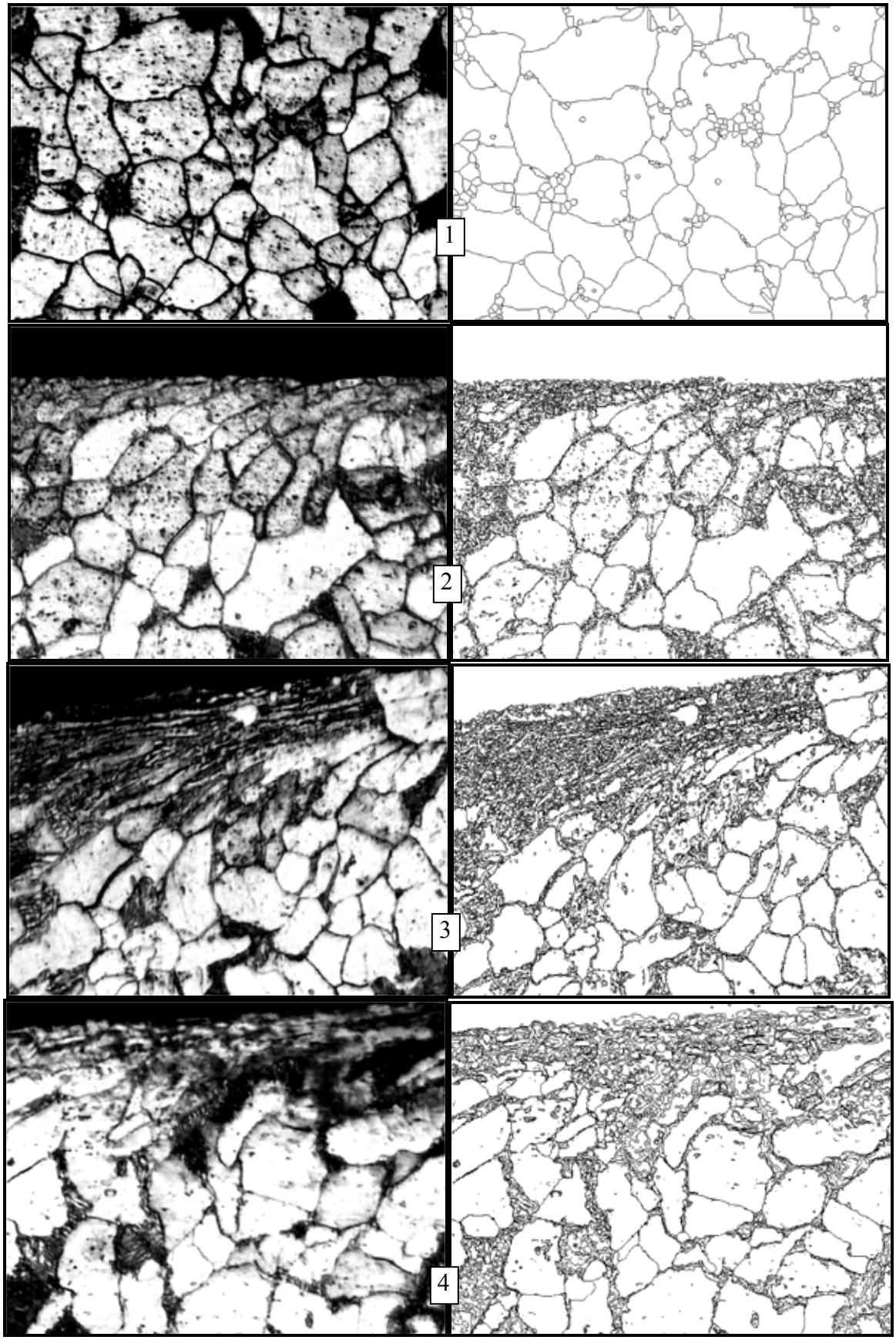


Рис. 1. Поверхностные микроструктуры образцов из стали 3 и их «скелетированное» представление (х400): 1 – в исходном состоянии; 2 – точение на V = 600 м/мин, S = 0,085 мм/об; 3 – точение на V = 800 м/мин, S = 0,085 мм/об; 4 – точение на V = 800 м/мин, S = -0,115 мм/об

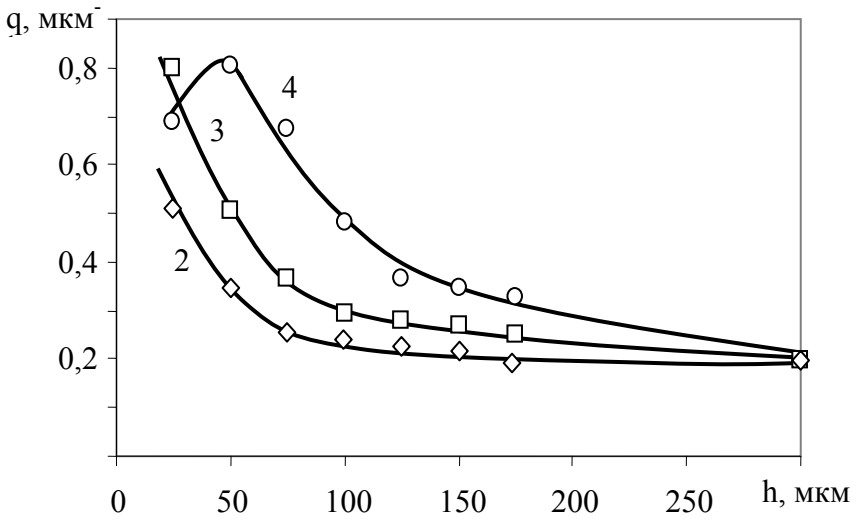


Рис. 2. Распределение плотности границ раздела по глубине обработанной поверхности

Микроструктура поверхностного слоя, сформированная при точении, отличается высокой структурно-энергетической неоднородностью, которая проявляется в неравноосности зерен и значительном отклонении углов при вершине тройных стыков от равновесных значений, при этом больший угол соответствует большей величине химического потенциала внутри кристаллита.

Пластическая деформация сопровождается деформационным разворотом зерен, изменением их формы и разбивкой на более мелкие фрагменты. Зоны активных пластических деформаций распределены неравномерно, их локализация преимущественно происходит в зоне вокруг стыка между крупными зернами или объединением зерен (кластеров).

При деформационной разбивке крупных зерен часто наблюдается образование прямолинейных границ раздела, указывая, что первоначально возникает плоскость сдвига двойникового типа или полигональная субграница, которая в дальнейшем развивается до уровня высокоугловой границы раздела. Возникающие при такой разбивке границы между зернами первоначально сохраняют геометрию субграницы. Зерна, разделенные такой границей, отличаются повышенной «сцепляемостью» между собой и образуют мезомасштабный кластер с подвижной внешней границей раздела.

В результате мезомасштабного скольжения образуются упорядоченные границы, близкие по форме к прямолинейным, отличающиеся высокой подвижностью, между которыми располагаются текстурированные кластеры деформации. Положение границ раздела между текстурированными кластерами отражает направление деформационного смещения обрабатываемого материала поверхностного слоя на мезомасштабном уровне, инициированного процессом резания. При приближении к обработанной поверхности плотность границ раздела возрастает, и только у структуры, сформированной на режимах V = 800 м/мин и S = 0,115 мм/об, наблюдается незначительное снижение этой характеристики.

На рис. 3 приведен характер распределения фрактальной размерности границ раздела D по глубине обработанной поверхности. Видно, что в области, охваченной пластической деформацией, происходит резкий подъем фрактальной размерности, а снижение этого показателя у самой поверхности указывает, что в данной зоне формируются микроструктуры, границы раздела которых характеризуются большей упорядоченностью и меньшей развитостью. Направление границ раздела в этой области стремиться к параллельности вектору скорости резания. Образование таких границ раздела вызвано высокой температурой и более

интенсивной пластической деформацией за счет трения обработанной поверхности с задней поверхностью режущего клина. Процессы отпуска в этом слое отражаются на микроструктуре и физико-механических свойствах кристаллитов, пластическая деформация которых из-за высокой температуры происходит при меньших контактных напряжениях.

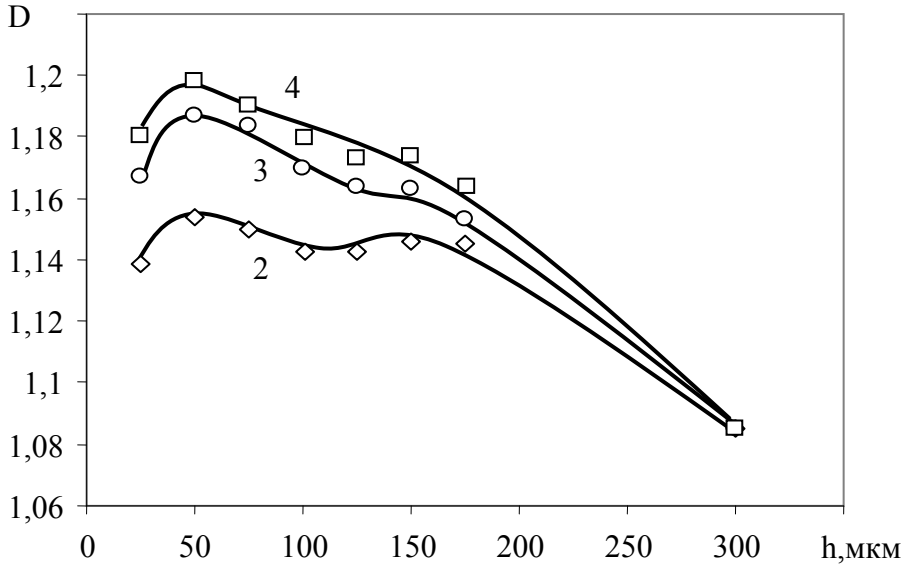


Рис. 3. Распределение фрактальной размерности границ раздела по глубине обработанной поверхности

Снижение фрактальной размерности в слое, примыкающим к обработанной поверхности, указывает на начало локального повышения равновесности микроструктуры за счет снижения ее химического потенциала, который в суммарном выражении может еще достигать больших величин за счет внутренних концентратором напряжений в самом кристаллите. Суммарное структурно-энергетическое состояние материала отражается показателем структурной организации (Q_C), объединяющей плотность границ (q) и фрактальную размерность (D) всех микрообъектов, находящихся в пределах одного микроснимка. На рис. 4 видно, что, не смотря на зафиксированное снижение фрактальной размерности в зоне у поверхностного слоя во всех исследованных случаях, уменьшение показателя структурной организации Q_C наблюдается только при точении на режимах V = 800 м/мин, S = 0,115 мм/мин.

Активность пластической деформации зависит от режимов резания и условий контактного взаимодействия. С повышением скорости резания характер распределения плотности и фрактальной размерности границ раздела по глубине сохраняется, но сами их численные значения возрастают.

На микроструктуре обработанных поверхностей наблюдается высокая плотность точечных объектов по сравнению с исходной структурой. Учитывая, что режимы подготовки шлифов и их травление производились в одних и тех же условиях, можно предположить, что подобные точечные образования являются или следами выхода дислокаций или микролокальными зонами концентраций напряжений вокруг других дефектов кристаллического строения, вызванных пластической деформацией. При приближении к поверхности плотность точечных образований возрастает.

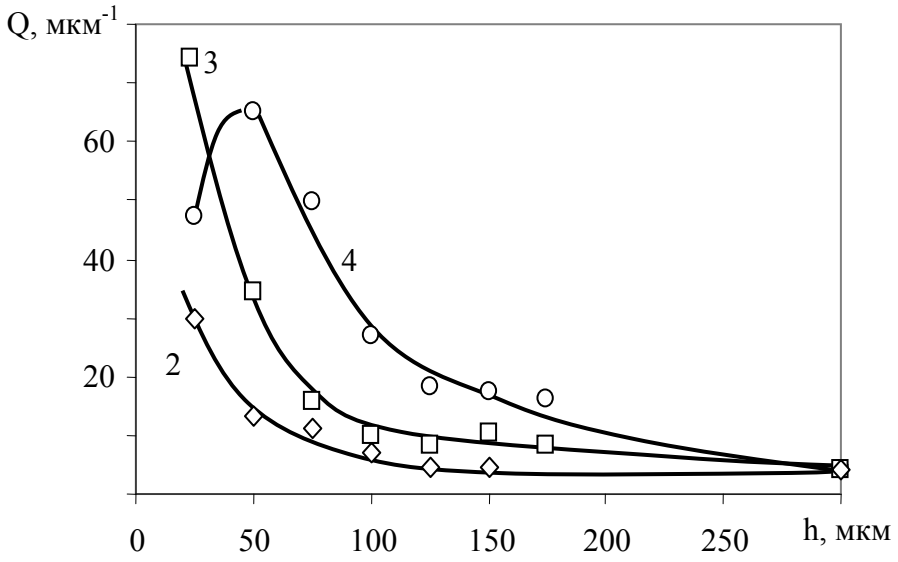


Рис. 4. Распределение показателя структурной организации
по глубине обработанной поверхности

Выводы

Компьютерная обработка микроструктур поверхностных слоев, формирующихся при обработке материалов резанием, выявляет деформационные процессы, включающие разбивку зерен, их ротационный разворот и развитие границ мезоструктур.

Наибольшую информацию о предыстории развития структуры и ее состоянии несут границы зерен и фаз, выполняют своеобразную функцию микроструктурного интерфейса, который количественно описывается плотностью границ раздела (q), фрактальной размерностью (D) и показателем структурной организации (Q_C).

ЛИТЕРАТУРА

1. Вест, А. Химия твердого тела. Теория и приложения: в 2 ч. Ч. 1 / А. Вест; пер с англ. – М.: Мир, 1988. – 558 с.
2. Жуховицкий, А.А. Физическая химия / А.А. Жуховицкий, Л.А. Шварцман. – М.: Металлургия, 1987. – 688 с.
3. Иванова, В С. Синергетика и фракталы в материаловедении / В.С. Иванова, А.С. Баланкин, И.Ж. Бунин, А.А. Оксогоев. – М.: Наука, 1994. – 382 с.
4. Кристиан, Д. Теория превращения в металлах и сплавах / Д. Кристиан. – М.: Мир, 1978. – 806 с.
5. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах / Р.Р. Балахонов, А.В. Болеста, М.П. Бондарь и др.; отв. ред. В.Е. Панин. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. – 520 с.
6. Щелкунова, М.Е. Диагностика состояния режущего инструмента на основе вероятностных и информационных параметров акустической эмиссии и термо-ЭДС: диссертация канд. техн. наук / М.Е. Щелкунова. – Комсомольск-на-Амуре, 2000. – 120 с.

Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета № II-1(2) 2010

Пронин А.И., Мокрицкий Б.Я., Виноградов С.В.
A.I. Pronin, B.Y. Mokritsky, S.V. Vinogradov

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СВЕРХТВЁРДЫХ МАТЕРИАЛОВ И РЕЖУЩЕЙ КЕРАМИКИ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

APPLICATION OF SUPERFIRM MATERIALS AND CERAMIC INSERTS TO TURNING PROCESSING OF TOUGH MATERIALS

Пронин Александр Иннокентьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mdsov@knastu.ru.
Mr.Aleksandr I.Pronin – PhD in Engineering, senior lecturer of the Department of Mechanical Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, mdsov@knastu.ru.

Мокриций Борис Яковлевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: boris@initkms.ru.
Mr.Boris Y.Mokritsky – PhD in Engineering, senior lecturer of the Department of Mechanical Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University

Виноградов Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sergwin72@rambler.ru.
Mr.Sergey V.Vinogradov – PhD in Engineering, senior lecturer of the Department of Mechanical Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University

Аннотация: Изложены результаты исследований работоспособности резцов из различных инструментальных материалов при обработке труднообрабатываемых материалов. Выявлен механизм изнашивания и указаны пути повышения работоспособности инструмента, оснащенного режущей керамикой и сверхтвердыми материалами.

Summary: The paper presents the results of researches of performance of cutters made from various tool materials at the processing of hard materials. The mechanism of wear is revealed and ways to increase the performance of tools equipped with ceramic inserts and superfirm material components are specified.

Ключевые слова: режущая керамика, сверхтвердые материалы, жесткость, технологическая система, упрочнение инструмента, износ, кубический нитрид бора, устойчивость, закаленная сталь, оптимальная скорость резания, резец.

Keywords: ceramic inserts superhard materials, rigidity, process system, hardening of the tool, wear, cubic boron nitride, stability, hardened steel, optimum speed of cutting, cutter.

УДК 621.941:621.9.025.7

Поступила в редакцию 17.04.2010 г.

Пронин А.И., Мокрицкий Б.Я., Виноградов С.В.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СВЕРХТВЁРДЫХ МАТЕРИАЛОВ И РЕЖУЩЕЙ КЕРАМИКИ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Одной из тенденций развития машиностроительного производства является повышение его эффективности. В этой связи к режущему инструменту предъявляются высокие требования по безотказности его работы.

Режущая керамика и сверхтвердые материалы (СТМ) – это относительно новые инструментальные материалы. Таким инструментом можно обрабатывать детали из материалов с повышенными прочностными характеристиками и специальными свойствами, в том числе из закаленных сталей, жаропрочных сплавов, труднообрабатываемых чугунов, цветных металлов и абразивных неметаллических материалов.

Применение режущей керамики и СТМ позволит повысить скорость резания и качество обработанных поверхностей. Производители инструмента предлагают марки СТМ и режущей керамики с более высокой теплостойкостью и прочностными показателями, что существенно повышает износостойкость этих материалов, особенно в условиях переменных нагрузок и высоких скоростей резания. Однако ограничения по применению такого инструмента существуют и связаны они прежде всего с низкой сопротивляемостью знакопеременному циклическому нагружению. Ниже приведены отдельные результаты повышения работоспособности таких инструментов за счёт применения их упрочнения, в частности за счёт применения релаксационной термообработки при отжиге и при нанесении покрытий.

Испытания работоспособности инструмента проводили на токарном станке модели 16К20Ф3С32. Заготовкой являлся цилиндр диаметром 90 мм, длиной 420 мм с продольным пазом шириной 8 мм (на глубину 20 мм). Материал заготовки – сталь марки ХВГ (HRC 62-65). Режим резания: глубина 0,5 мм, подача 0,11 мм/об, скорость резания варьировали, наружное прерывистое точение. Режущие пластины (режущая керамика марки ВОК 60 и сверхтвёрдые материалы на основе кубического нитрида бора марок томал и киборит) механически закрепляли в державке сечением 25х25 мм, обеспечивая геометрию режущей части: $\alpha = 7°$; $\gamma = -11°$. Пластина киборита использовалась круглой формы диаметром 7 мм и толщиной 5 мм; пластина томала – квадратной формы с радиусом и размерами 7 х 7 х 4 мм; пластина ВОК-60 – треугольной формы с радиусом и размером стороны 16 мм и высотой 5 мм. Регистрировали путь, пройденный до скола, или величину износа по задней поверхности, предельным считали износ 0,4 мм. Результаты исследования на определения величины оптимальной скорости резания для таких условий обработки типовым инструментом приведены на рис. 1.

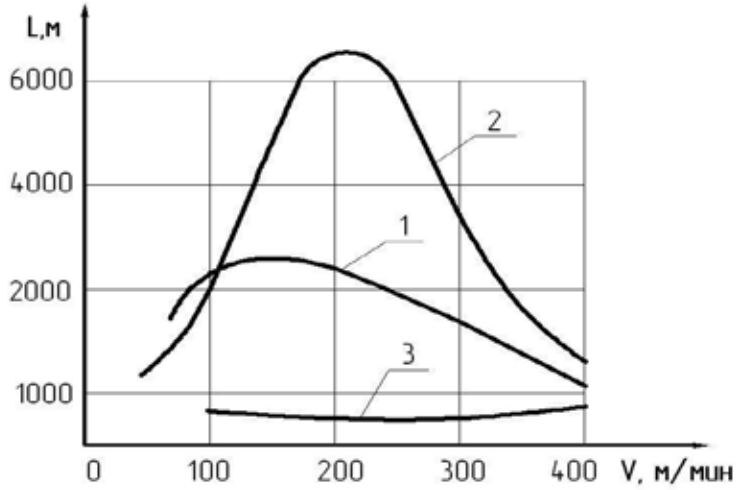


Рис. 1. Зависимость пути L, проходимого режущим лезвием до скола, от скорости V резания:
1 – томал, 2 – киборит, 3 – ВОК-60

Из рис. 1 следует, что работоспособность томала в 2 (и более) раза выше, чем у керамики, но существенно ниже, чем у киборита. Оптимальные скорости резания этих материалов различны и экстремум стойкости у томала смещен по отношению к кибориту в область меньших скоростей резания.

Рядом дополнительных исследований установлено [1; 2; 3]:

1. На величину рекомендуемых режимов резания влияет жесткость технологической системы.

2. Отклонение скорости резания от оптимальной приводит к росту шероховатости обработанной поверхности. Такой характер зависимости шероховатости от изменения скорости резания объясняется появлением вибраций. Увеличение подачи и глубины резания приводит к росту шероховатости обработанной поверхности из-за недостаточной жесткости технологической системы.

3. Применение смазывающе-охлаждающих технологических сред позволяет повысить скорость резания на 50-70 % без ущерба стойкости инструмента и качеству обработанной поверхности.

Для повышения хрупкой прочности и снижения окислительного характера износа применяли упрочнение инструмента. Это оказалось существенным для режущей керамики. Фактор температурного воздействия при отжиге благоприятно сказывался на процесс релаксации внутренних напряжений, сформировавшихся в керамике при размерной обработке пластин у производителя в ходе алмазного шлифования. Это способствует повышению объемной прочности пластины. Установлено [1, 3], что термообработка на воздухе не дает существенного повышения работоспособности в силу того, что связка и зерна упрочняющей фазы, активно взаимодействуя с воздухом при нагреве, образуют на поверхности соединения с низкой энергоемкостью, кислород проникает в поры поверхностного слоя и образует окислы, выполняющие функцию расклинивания в порах, вызывая коробление и вспучивание поверхности. В силу этого термообработку целесообразно проводить в защитной среде либо в вакууме. Химико-термическую обработку осуществляли азотированием как заключительный этап термообработки. Роль ионного азотирования состоит в легировании связки и инициировании выкрашивания наиболее разрушенных при заточке зерен. Механизм микролегирования понятен. Механизм выкрашивания состоит в том, что внедрение азота наиболее интенсивно происходит в предварительно разрушенные при заточке микрообъемы (расколотые зерна, границы зерен). Это ведет к разрушению границ зерен и снижению сил их сцепления. Трансформация напряженного состояния таких зерен ведет к их короблению, размельчению, выкрашиванию с поверхности, т.е. часть разрушенных зерен заранее удаляется с поверхности пластины. В результате такого "залечивания" дефектов повышается сдвиговая устойчивость и соответственно трещиностойкость керамики.

В частности, низкопрочную режущую керамику ВО-13 после термообработки подвергали "залечиванию" дефектов путем нанесения покрытия. Покрытие выполняли из тугоплавких металлов (цирконий, ниобий). При его нанесении реализуется микролегирование связки и "заделка" трещин и пор в поверхностном слое. Толщины слоев чистых металлов незначительны, а именно: ниобий 0,2-0,5 мкм, цирконий 0,5-0,8 мкм. Результаты сравнительных испытаний при обработке точением закаленной стали 45 при скорости резания 250 м/мин, подаче 0,21 мм/об, глубине 0,5 мм приведены в табл. 1.

Таблица 1

Период стойкости, мин, режущей керамики до износа 0,4 мм или скола пластины

Состояние инструмента	ВО-13	ВО-13 + термообработка	ВО-13+термообработка+Zr	ВО-13+термообработка+ Nb+Zr
Период стойкости, мин	7	11	15	18

Для развития указанных решений после осаждения металлического или нитридного покрытия предложено проводить дополнительную термообработку. До нанесения покрытия термообработанную основу можно подвергать науглероживанию и ионной очистке, т.е. эффективная технологическая последовательность упрочнения керамики представляет собой следующее: керамика + науглероживание + термообработка + ионная очистка + слой металла + нитридное покрытие + термообработка. Дополнительная термообработка после нанесения покрытия позволяет снять напряжения на границе раздела основа-покрытие и инициировать диффузионные процессы между основой и покрытием. Результаты испытания такого инструмента из режущей керамики при точении стали ШХ15 (HRC 52-56) со скоростью резания 120 м/мин, подачей 0,1 мм/об, глубиной 1 мм приведены в табл. 2.

Таблица 2

Период стойкости инструмента из режущей керамики до износа 0,4 мм или скола кромки

Состояние инструмента	ВОК-60	ВОК-60+ науглераживание + термообработка	ВОК-60+науглераживание + термообработка+ ионная очистка	ВОК-60+ науглераживание + термообработка+ ионная очистка +Zr+ ZrN	ВОК-60+науглераживание + термообработка+ ионная очистка+ Zr+ZrN+ термообработка
Период стойкости, мин	11	17	21	26	31

Таблица 3

Период стойкости, мин, инструмента из СТМ

Состояние инструмен-та	Киборит в состоя-нии поставки	Киборит с вакуумной термообработкой	Киборит с вакуумной термообработкой и осаждением слоя никеля толщиной 0,5 мкм	Киборит с вакуумной термообработкой и осаждением слоев никеля и циркония толщиной по 0,5 мкм
Период стойкости, мин	12	21	27	32

Инструменту из сверхтвердых материалов свойственна дефектность поверхностного слоя, связанная с алмазно-абразивной размерной обработкой. В силу этого предлагаемые решения по повышению работоспособности инструмента из сверхтвердых материалов носят технологический характер и связанны с термообработкой (для перераспределения напряжений и дислокационной структуры) и с "залечиванием" поверхностного дефектного слоя (путем осаждения металлических слоев). Так, после термообработки инструмент из кубического нитрида бора подвергали "залечиванию" путем металлирования, которое реализуется за счет осаждения металла (хрома) либо за счет никелирования и осаждения слоя циркония. Оценка работоспособности упрочненных термообработкой и "залечиванием" сверхтвердых материалов проводилась в основном на инструментальном материале с торговой маркой "киборит".

Испытания проводились при различных условиях резания. Так, в табл. 3 приведены результаты испытания киборита при токарной обработке по литейной корке чугуна СЧ-21 (НВ-230) при скорости резания 300 м/мин, подаче 0,1 мм/об, глубине 0,7 мм. Обработка велась до скола или затупления по задней грани до 0,4 мм. Лунка износа по передней грани отмечалась, но имела незначительные размеры.

Результаты сравнительных стойкостных испытаний упрочненных инструментов из киборита при циклическом нагружении и жестко заданных условиях резания (сталь 45 закаленная, скорость резания 240 м/мин, подача 0,1 мм/об, глубина 0,5…0,8 мм, наружное тече-

ние "на удар" цилиндрической заготовки с двумя продольными пазами) приведены на рис. 2. Из данных рисунка видно не только повышение работоспособности упроченного инструмента, но также изменение интенсивности износа на различных этапах работы инструмента.

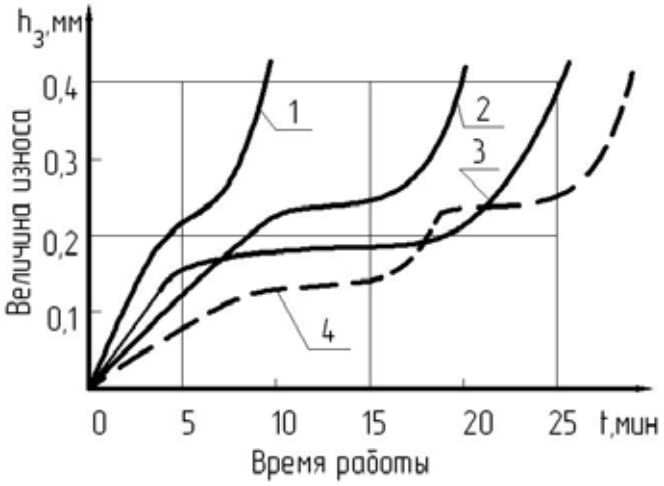


Рис. 2. Период стойкости инструмента из СТМ:
1 – киборит в состоянии поставки; 2 – киборит с вакуумной термообработкой; 3 – киборит с вакуумной термообработкой и металлическим слоем циркония; 4 – киборит с ионным азотированием + (Ti, Zr)+ZrN

ВЫВОД: Работоспособность инструмента из СТМ и режущей керамики можно существенно повысить за счет упрочнения релаксационной термообработкой и путем «залечивания» дефектов за счёт нанесения покрытий. Это позволяет существенно расширить область применения инструмента и режимов резания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кабалдин, Ю.Г. Принципы конструирования композиционных инструментальных материалов с повышенной работоспособностью. Препринт / Ю.Г. Кабалдин. – Владивосток: Институт машиностроения и металлургии ДВО АН СССР, 1990. – С. 58.
2. Кабалдин, Ю.Г. Стойкость режущего инструмента, оснащенного керамикой и сверхтвердыми материалами / Ю.Г. Кабалдин, Б.Я. Мокрицкий, А.И. Пронин // Станки и инструмент. – 1991. – № 12. – С. 19-21.
3. Кабалдин, Ю.Г. Работоспособность резцов из различных инструментальных материалов при обработке высокопрочного чугуна / Ю.Г. Кабалдин, А.И. Шепелев, А.А. Киле, А.И. Пронин // Сверхтвердые материалы. – 1991. – № 6. – С. 29-33.

Мокрицкий Б.Я.
B.J. Mokritskiy

К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ ЭФФЕКТИВНОГО МЕТОДА УПРОЧНЕНИЯ ЛЕЗВИЙНОГО МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

ON THE ISSUE OF THE CHOICE OF AN EFFICIENT METHOD FOR HARDENING OF METAL-CUTTING EDGE TOOLS

Мокрицкий Борис Яковлевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: boris@initkms.ru.
Mr. Boris Y. Mokritsky – PhD in Engineering, Senior Researcher, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), Email: boris@initkms.ru

Аннотация: Приведены сведения о новых методах упрочнения инструмента для трудно-обрабатываемых материалов.

Summary: The paper presents data on new methods for hardening of cutting tools for tough material machining.

Ключевые слова: упрочнение, покрытия инструмента.

Keywords: hardening, tool coating.

УДК 621.9.02

Введение

Для машиностроительной отрасли на рынке имеется широкий выбор лезвийного инструмента для высокопроизводительной обработки. Активно ведут себя зарубежные фирмы, в том числе японские, корейские, китайские. В оборот вводятся новые технические термины и торговые марки инструментальных материалов. Каждая фирма аргументирует преимущества конструкции и способа изготовления её инструмента. В этом многообразии продукции и информации отечественному потребителю сложно ориентироваться. Правильный выбор инструмента затруднён также эпизодическими публикациями о якобы достигнутых сверхэффектах за счёт применения наноструктурированных материалов или применения новых покрытий.

Ниже предпринята попытка систематизировать сведения хотя бы на примере твёрдосплавного инструмента.

Состояние вопроса

Следует понимать, что основные марки твёрдосплавного инструмента разработаны и подробно исследованы ещё до половины прошлого века. Материаловедческие возможности триады «состав – структура – свойства» во многом исчерпаны. Отдельные тенденции управления структурой и составом развиваются, но это даёт локальные результаты. Парадигма «состав – структура – технология изготовления – свойства» наиболее заметный успех обеспечила при применении покрытий на металлорежущем инструменте. И конструкция, и состав покрытия, и метод осаждения покрытия играют значимую роль. Их многообразие кажущееся. Принципиальных отличий мало. Их и не может быть много в связи с тем, что приёмов торможения основных механизмов разрушения инструментов разработано не мно-

Поступила в редакцию 14.04.2010 г.

го. В том числе немногочисленны функции покрытий. В общем виде функции покрытия профессор С.Н. Григорьев [1] описывает следующим образом:

- высокотвёрдый слой (30 ГПа и более), препятствующий абразивному износу поверхности;
- барьерная среда для обеспечения низкого сродства с обрабатываемым материалом с целью сопротивляемости адгезионному изнашиванию;
- антифрикционная твёрдая смазка;
- температурный барьерный слой;
- барьер для торможения роста усталостных и термических трещин.

Проанализируем подробнее хотя бы одну из перечисленных функций, например последнюю. Действительно, принцип «сэндвича» часто используется в ряде изделий для торможения распространения трещин. На примере хрупких и вязкохрупких материалов доказано, что энергия продвижения устья трещины при достижении границы раздела слоев активирует рост трещины вдоль границы, а не перпендикулярно ей. Это явление полезно на инструменте тем, что число таких барьеров на пути продвижения трещины вглубь пластины можно сделать большим. В этом случае трещине потребуется значительно большее время до образования магистральной трещины скола (см. рис. 1).

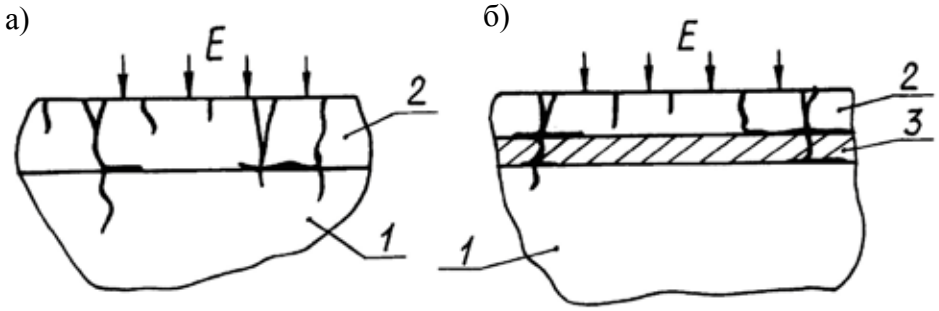


Рис. 1. Схема к анализу развития трещин: а – в однослойном покрытии; б – в покрытии с чередующимися слоями; 1 – основа; 2 – твердый слой; 3 – промежуточный мягкий слой

В эффекте «сэндвича» материал слоёв покрытия не играет решающей роли, более важно число слоёв. На данном этапе существуют технологии, позволяющие получить нанотолщинные слои. 100 – 200 слоёв на общей толщине покрытия в несколько микрон существенно увеличивают ресурс инструмента. Технологии сложны, длительны, установки дорогостоящие.

Однако следует понимать, что такие решения эффективны в основном для стабильных условий резания при обработке типовых конструкционных материалов. Чем более сложны условия нагружения инструмента, чем специфичнее обрабатываемый материал, тем больше нивелируется эффект. Причин несколько. Например, двойственная роль самого покрытия. Выше показаны его позитивные функции. Но существует и негативная. Например, сколовшийся объём твёрдого слоя покрытия при движении вместе со стружкой может наносить невосполнимые разрушения остальным слоям покрытия и самой основе инструментального материала.

Обсуждение предлагаемых решений

Существует другой путь. Число слоёв покрытия может быть небольшим. Но основа инструментального материала должна быть подготовлена под нанесение покрытия, покрытие должно содержать «твёрдые» и «мягкие» слои, а дефекты покрытия должны быть «залечены» [2, 3].

Подготовка основы подразумевает технологические действия по стабилизации состояния и активизации поверхностного слоя пластины с тем, чтобы в результате нанесения покрытия образовался некоторый переходный слой, способный активно сопротивляться превалирующему механизму разрушения. Круг таких технологических действий широк: от стабилизационной термообработки до ионного азотирования [2]. Наличие «мягких» слоёв в покрытии (см. рис. 2) обеспечивает не только сродство «твёрдых» слоёв, но и заполнение (см. рис. 3) металлом Me_1 пор в «твердом» слое Me_1C, демпфирование, улучшение теплоотвода вглубь пластины и безразрушительное перемещение скалывающихся объёмов «твёрдого» покрытия Me_3N. «Залечивать» дефекты верхнего «твёрдого» слоя можно путём заполнения пор при нанесении металлического слоя, лазерно-термическим упрочнением [2] или термомеханическим воздействием.

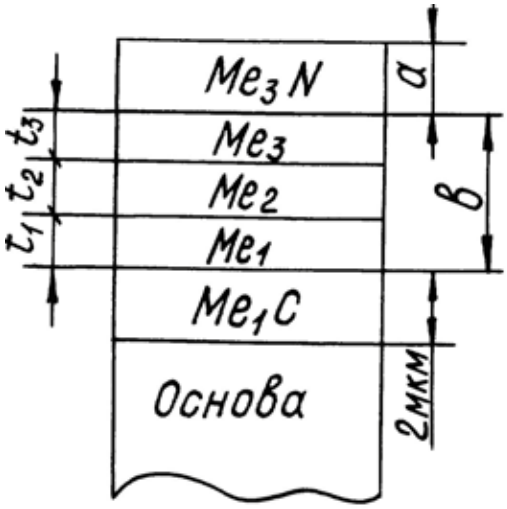


Рис. 2. Схема многослойного покрытия

При таком подходе технологические методы упрочнения инструмента могут быть реализованы на любом металлообрабатывающем предприятии под конкретные задачи. Технологическое оборудование для этого не сложно. Возможно применение межзаводской кооперации. Такой подход требует вдумчивого подхода к выбору технологии упрочнения и составу покрытия. В технологии упрочнения (см. рис. 4) наиболее важную роль играет выбор метода осаждения покрытия.

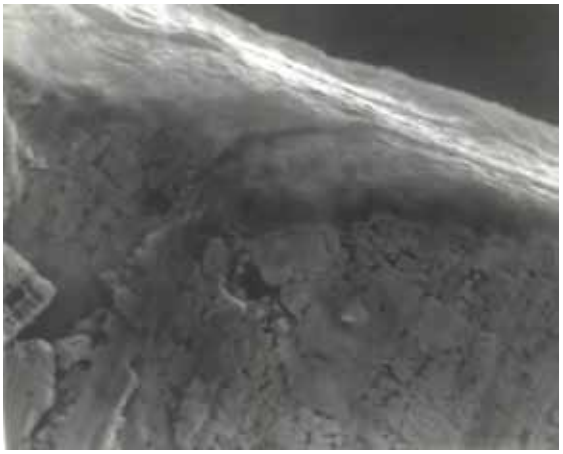


Рис. 3. Микрофрактограмма покрытия на инструменте:
а – покрытие Mo + TiC + Mo в начальной стадии разрушения;
б – «залечивание» дефекта основы мягким слоем покрытия
(шлиф, покрытие Mo)

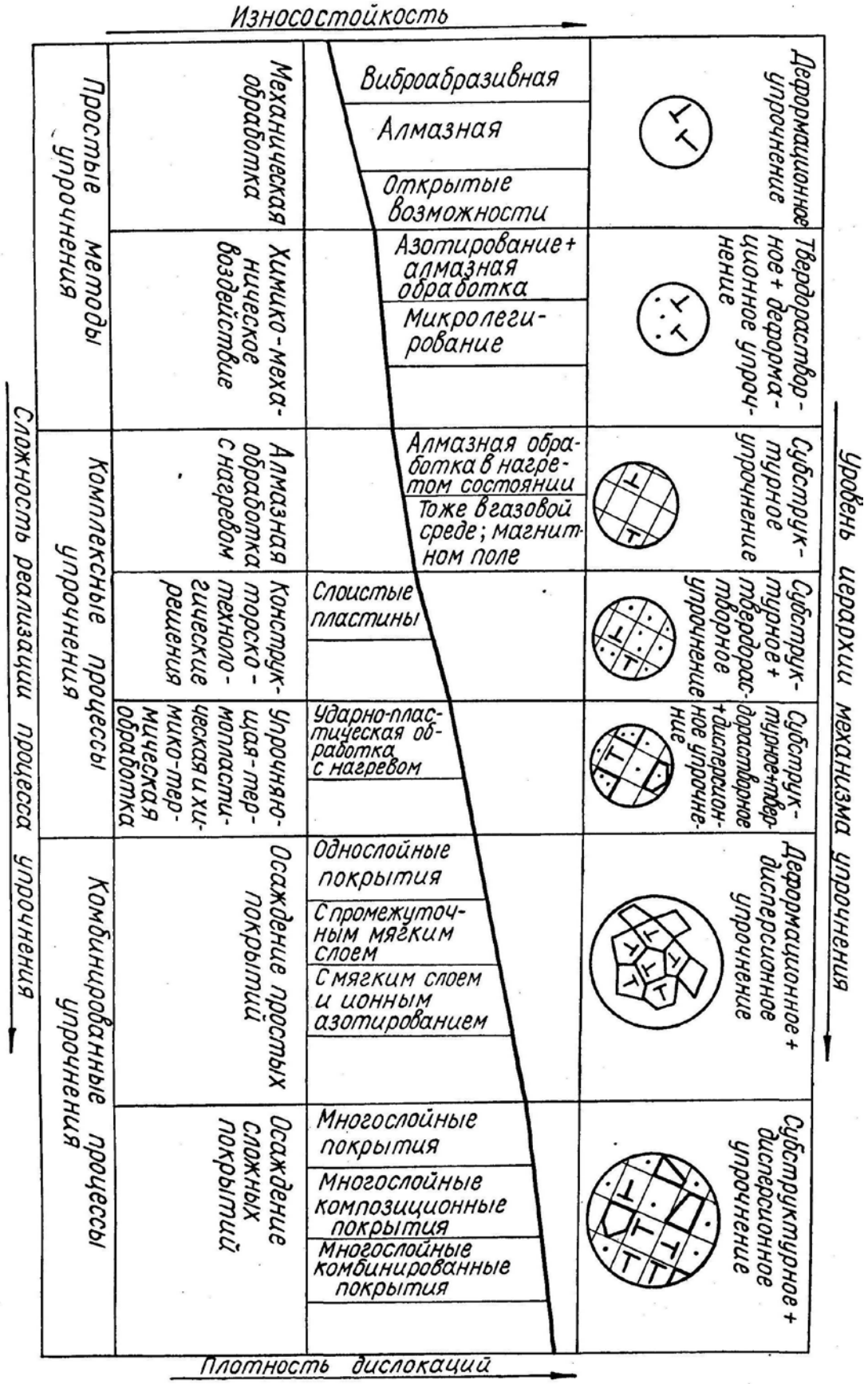


Рис. 4. Схема возможностей вовлечения механизмов упрочнения в процессы повышения работоспособности твердосплавного инструмента

Результаты показывают, что наиболее эффективно для труднообрабатываемых материалов применение комбинаций методов осаждения [2]. Например, газотермическим методом (ГТ) осаждается нижний «твёрдый» карбидный слой, затем методом конденсации с ионной бомбардировкой (КИБ) осаждаются «мягкий» металлический слой и «твёрдый» нитридный слой. Выбор состава покрытия сложен из-за дефицитности применяемых материалов. Как правило, это элементы 4 – 6 групп периодической системы элементов. Но эффективны не только их нитриды или карбиды. Ниже (см. табл. 1) показана эффективность применения боридов титана в составе покрытия при фрезеровании титанового сплава ВТ-20 со скоростью резания 1,3 м/с, подачей 0,15 мм/зуб и глубиной 2 мм.

Таблица 1

Влияние состава покрытия на стойкость инструмента (до износа 0,4 мм)

Инструмент	ВК8 + TiC (3 мкм) + + TiB_2 (3 мкм)	ВК8 + TiC (2 мкм) + TiB_2 (2 мкм) + + TiN (2 мкм)	ВК8 + TiC (2 мкм) + TiB_2 (2 мкм) + + (TiMo)N при толщине последнего слоя, мкм				
			1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Период стойкости, мин	22	32	42	44	45	42	38

Хорошо показывают себя сложнокомпозиционные составы покрытий (см. рис. 5).

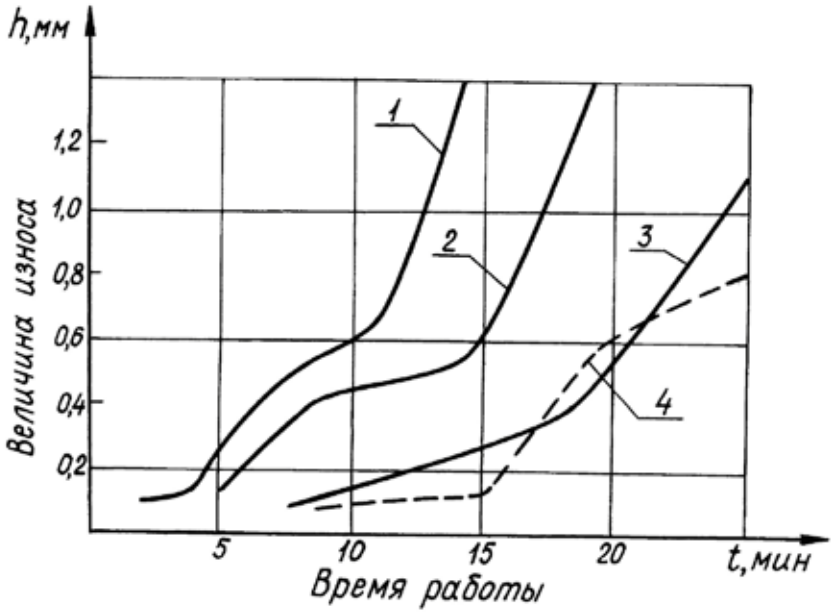


Рис. 5. Зависимость величины износа по задней грани от времени работы твердосплавного инструмента ВК8: 1 – с покрытием TiN (КИБ); 2 – с покрытием TiC (ГТ); 3 – с композиционным покрытием, полученным при испарении спеченного катода, содержащего молибден, цирконий, титан, бор, кремний; 4 – с композиционным покрытием, полученным при испарении спеченного катода, содержащего титан, молибден, диборид ниобия, диборид тантала, диборид циркония

Выводы

1. Наиболее распространённая номенклатура инструмента ориентирована на обработку типовых конструкционных материалов в постоянных условиях резания. Превалирует номенклатура зарубежных производителей. Существенной разницы в работоспособности инструмента разных производителей нет, но колебания соотношения «цена – качество» существенны.

2. Возможности металловедческого подхода в повышении работоспособности инструмента во многом исчерпаны. Отдельные успехи применения нанотехнологий носят несистемный характер.

3. Для сложных условий нагружения инструмента и для обработки труднообрабатываемых материалов могут быть применены простые технологические приёмы упрочнения инструмента, основанные на подготовке основы инструментального материала к нанесению покрытия, на выборе конструкции, состава и методов нанесения покрытия, на «залечивании» дефектов в основе и покрытии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев, С.Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента: учебник для студентов втузов / С.Н. Григорьев. – М.: Машиностроение, 2009. – 368 с.
2. Кабалдин, Ю.Г. Современные методы конструирования, контроля качества и прогнозирования работоспособности режущего инструмента / Ю.Г. Кабалдин, Б.Я. Мокрицкий, Н.А. Семашко, С.П. Тараев. – Владивосток: ДВГУ, 1990. – 122 с.
3. Мокрицкий, Б.Я. Физико-химические основы формирования высокопрочных покрытий на режущем инструменте / Б.Я. Мокрицкий, Ю.Г. Кабалдин, К.В. Кравчук // Судостроительная промышленность. /

Еренков О.Ю., Никишечкин В.Л.
O.Yu. Erenkov, V.L. Nikishechkin

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЛИЯНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СВЯЗУЮЩЕГО НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПКМ

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF ELECTRO-PHYSICAL PRE-TREATMENT OF POLYMER BINDER ON STREHGTH PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITES

Еренков Олег Юрьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Химическая технология и биотехнология» Тихоокеанского государственного университета, (г. Хабаровск, Россия). E-mail: erenkov@list.ru, тел. 89141912409, адрес для корреспонденции: 680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136.
Mr.Oleg Yu.Erenkov – PhD in Engineering, Professor, Head of the Chemical Technology Department of the Pacific State University (city of Khabarovsk, Russia). E-mail: erenkov@list.ru, tel. 89141912409, mailing address: 680035, Khabarovsk, Tikhookeanskaya street, 136.

Никишечкин Вячеслав Леонидович – главный технолог ОАО Дальневосточный завод энергетического машиностроения (г. Хабаровск). E-mail: tehnikenerg@mail.ru, тел. (4212) 38-15-15, адрес для корреспонденции: 680013, Хабаровск, ул. Ленинградская, 28.
Mr.Vaycheslav N.Leonidovich – Chief Technology Specialist of OAS «Dalenergomash» (city of Khabarovsk, Russia). E-mail: tehnikenerg@mail.ru, (4212) 38-15-15, mailing address: 680013, Khabarovsk, Leningradskaya street, 28.

Аннотация: В статье представлены результаты экспериментальных исследований влияния предварительной электрофизической обработки полимерного связующего на механические свойства полимерного композитного материала. Приведено описание экспериментальной установки.

Summary: The article presents the results of experimental investigation of the influence electro physical pre-treatment of plastic binder exerts on mechanical properties of polymer composite material. The design of experimental apparatus is also given.

Ключевые слова: полимерные материалы, связующее, электрофизическая обработка, механические свойства.

Keywords: polymer material, plastic binder, electro physical treatment, mechanical properties.

УДК 621.002.3

Интенсивное развитие техники сопровождается все более широким использованием полимерных композитных материалов (ПКМ) в различных отраслях (авиакосмические конструкции, ракетостроение, автомобилестроение, электротехника и электроника, строительство, медицина и др.), в связи с чем возрастают требования к данным материалам. В настоящее время имеется насущная необходимость обеспечения предельно возможных значений показателей свойств материалов (упругопрочностных, диэлектрических, трещиностойкости и др.) [5], так как эффективность применения конструкционных полимерных материалов определяется их механическими свойствами [1].

В литературе наибольшее внимание уделяется изучению адгезии между матрицей и наполнителем и взаимодействию на межфазной границе. Физико-химические процессы, протекающие при формировании структуры материала и ее изменении при эксплуатации, изуче-

Поступила в редакцию 15.04.2010 г.

ны в значительно меньшей степени, хотя их влияние на свойства пластиков очень велико. В частности, со структурными изменениями связано влияние на свойства пластиков технологии их изготовления [9].

Наиболее эффективным, с точки зрения получения качественного конструкционного ПКМ, является метод вакуумно-компрессионной пропитки (RTM). При изготовлении деталей наиболее нагруженных узлов энергетических машин, таких как рабочие лопатки, диски и т.д., требуется соблюдение условия обеспечения равнопрочности по всей структуре, которое не всегда выполняется при использовании данного метода ввиду различных причин: несоблюдения технологических требований и нестабильности свойств полимерных связующих.

Общеизвестно, что некоторые виды электрофизического воздействия влияют на улучшение технологических и механических свойств полимерных материалов на стадии подготовки и в процессе изготовления. Однако ввиду нестабильности свойств самих полимерных материалов режимы данной обработки и соответствующие рекомендации отсутствуют.

Установлено, что взаимодействие излучений высокой энергии с ПКМ приводит к химическим изменениям – сшиванию или деструкции [2, 6]. Сшивание характеризуется образованием химических связей между макромолекулами, дополимеризацией, газовыделением, окислительной деструкцией, образованием двойных связей. При этом наблюдается изменение как физических свойств – вязкости, снижение степени растворимости, светопроницаемости, электропроводности и т.п., так и механических – прочности, жесткости, деформируемости и др. Результатом сшивания являются увеличение твердости, прочности, модуля упругости; повышение температуры плавлении; уменьшение растворимости; удлинение при разрыве. При преобладании в материале деструктивных процессов наблюдается уменьшение модуля упругости, твердости и прочности на разрыв, снижение температуры текучести, повышение растворимости, а иногда и появление хрупкости.

Изменение свойств полимеров зависит также от вида и количества наполнителя, наличия пластификаторов, ингибиторов, антиоксидантов, различных примесей, а также от действия внешних электромагнитных полей.

В то же время известна лишь одна работа, посвященная взаимодействию электромагнитного поля с веществом, - это работа Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшица в классическом труде «Электродинамика сплошных сред» [3]. Лишь сравнительно недавно стало известно, что на поверхностях и границах раздела сред существуют поля поверхностных электромагнитных волн – поверхностных поляритонов (ПП), имеющих вполне определенные структурные и амплитудные характеристики. Структуры пограничного слоя запасают электромагнитную реактивную энергию в виде колебаний с соответствующими частотами. Естественно, что структуры обладают резонансными свойствами. Электромагнитная энергия поступает в пограничную среду и за счет внешних электромагнитных полей, внешних излучений. ПП образуют внутренние поверхностные электромагнитные поля (ПЭМП) [4].

В работах Гертца, Фарадея, Максвелла, И.А. Ярковского., Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшица, а также П.Н. Лебедева установлено влияние пондеромоторных сил (обусловленных электродинамическими взаимодействиями переменных электрических токов в молекулах или переменных зарядов в них) на движение расплавов металлов и сплавов, определяющее кинетику их кристаллизации. Исследование влияния магнитогидродинамических сил (МГД) на изменение структуры металлов и принципиальная схема аппарата управления электромагнитным перемешиванием (ЭМП) приведены в работе В.П. Черныша [8]. Регулируемое перемешивание расплава сварочной ванны электромагнитными силами от внешнего магнитного поля создают принципиально новые возможности для управления формированием и кристаллизацией сварного шва и определяемыми ими показателями качества сварных соединений.

Влияние продолжительности облучения жидкой фазы расплавов наносекундными электромагнитными импульсами (НЭМИ) на их строение, процессы кристаллизации и структурообразования, физико-механические и эксплуатационные свойства сплавов на основе ме-

ди, алюминия, магния и железа представлены в работе [7]. Рассматриваются поля с импульсной мощностью около 1 МВт и длительностью импульса – 1 нс, при этом напряженность электрического поля достигает 10^5-10^7 В/м. Приведены гипотезы влияния НЭМИ на строение расплавов, фазовые и структурные превращения и свойства металлических сплавов.

Характерной особенностью наносекундных электромагнитных импульсов является их однополярность, что приводит к отсутствию осциллирующих колебаний в излучаемом поле. Следствием этого выступает наличие пространственно-временного направленного действия силы за время одного импульса, создающего условия для воздействия на структуру и физико-химические свойства вещества.

На основании вышеизложенного и предположения о том, что воздействие НЭМИ и ЭМП (запасая реактивную электромагнитную энергию как потенциальную, непосредственно преобразующуюся в механическую) влияет на структуру расплавов, изменяя их механические свойства, задача исследования прочностных свойств ПКМ, в зависимости от параметров предварительного электрофизического воздействия на полимерное связующее, является актуальной.

Цель работы – экспериментальное исследование изменения механических свойств полимерного материала в зависимости от продолжительности совместного воздействия НЭМИ и ЭМП на связующее.

Так как исследования по совместной электрофизической обработке проводятся впервые, то при проведении эксперимента учитываются такие факторы, которые на основании анализа априорной информации имеют значимое влияние на формирование механических свойств: свойства исходных материалов, характеристики электромагнитного поля, характеристики электромагнитных импульсов, время обработки. При проведении экспериментов использовались следующие режимы электромагнитного воздействия: НЭМИ – длительность импульса 1 нс, амплитуда более 8 кВ, мощность в одном импульсе более 1 МВт, частота повторения импульсов 1000 Гц; электромагнитное поле – частота колебаний $\nu = 0{,}5$Гц (дл ительность прямого импульса – 0,02 с, реверса – 1,8 с, обратного импульса – 0,02 с). Продолжительность обработки 30 мин.

Определение параметров, характеризующих механические свойства исследуемого материала, проводили на испытательных машинах моделей УММ-20, МК-30А, ТБ 5004. Изготовление образцов проводилось с помощью установки вакуумно-компрессионной пропитки и печи сопротивления для термообработки материала, установленной на ОАО «Дальэнергомаш».

В качестве исследуемых материалов использовались полимерное связующее Этал Т 210 и ПКМ Этал Т 210-Т11-ГВС9 на его основе. В качестве источника НЭМИ применялся специальный генератор ГНИ-01-16, изготовленный Южно-Уральским государственным университетом, и установка ЭМП для возбуждения пондеромоторных сил, изготовленная на ОАО «Дальэнергомаш».

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1, а полученные экспериментальные данные представлены на рис. 2, 3, 4 и 5.

Анализ полученных данных позволяет заключить, что совместная обработка НЭМИ и ЭМП полимерного связующего позволяет повысить качество готового ПКМ, о чем свидетельствуют значения механических характеристик материала. При этом вполне очевидно, что оптимальная продолжительность обработки составляет 30 мин.

Этал Т 210-Т11-ГВС9 – это отвержденный реактопласт, обладающий жесткой пространственной структурой. Воздействие мощных электронных импульсов в сочетании с механическим перемешиванием под воздействием поднеромоторных сил электромагнитного поля приводит к перестройке между макромолекулами, сегментами и звеньями полимерной цепи, образованию дополнительных химических связей, что, предположительно, и приводит к повышению физико-механических свойств материала.

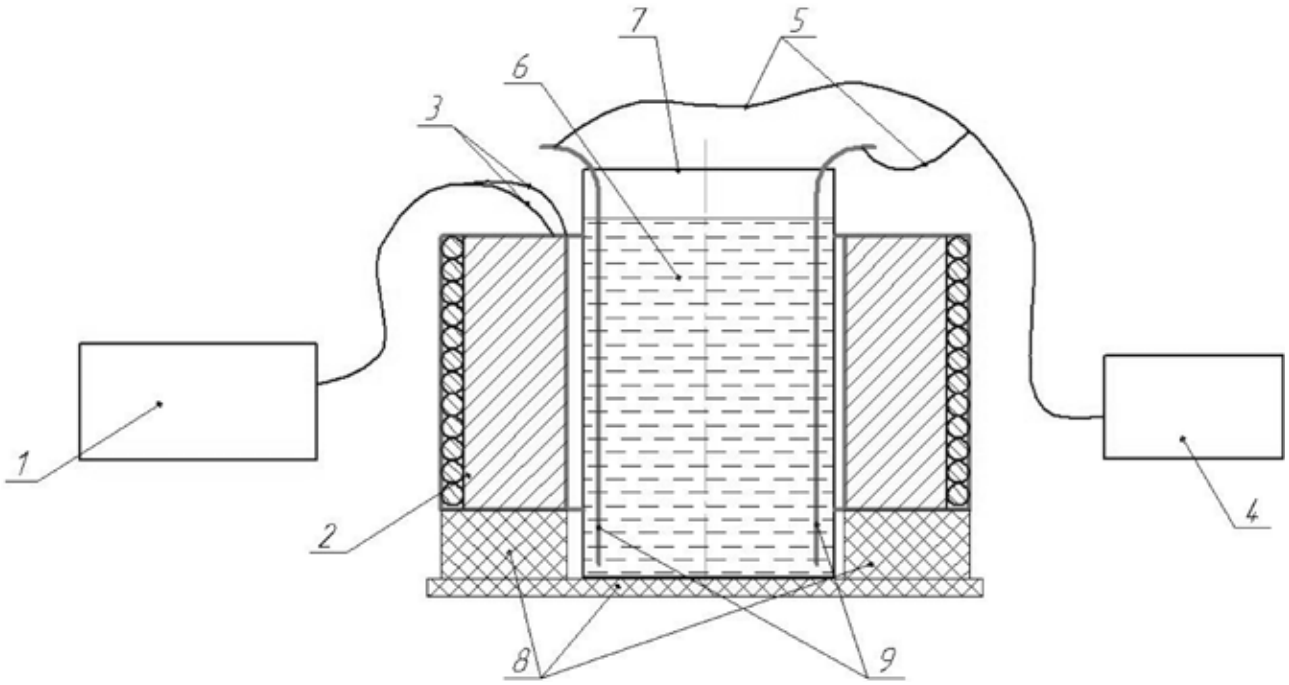


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для совместного воздействия НЭМИ и ЭМП на полимерное связующее: 1 – аппарат управления установки ЭМП; 2 – катушка индуктивности; 3 – электропитание катушки индуктивности; 4 - генератор ГНИ-01-16; 5 – электропитание электродов излучения НЭМИ; 6 – полимерное связующее; 7 – диэлектрическая емкость; 8 – диэлектрические подставки; 9 – электроды излучения НЭМИ

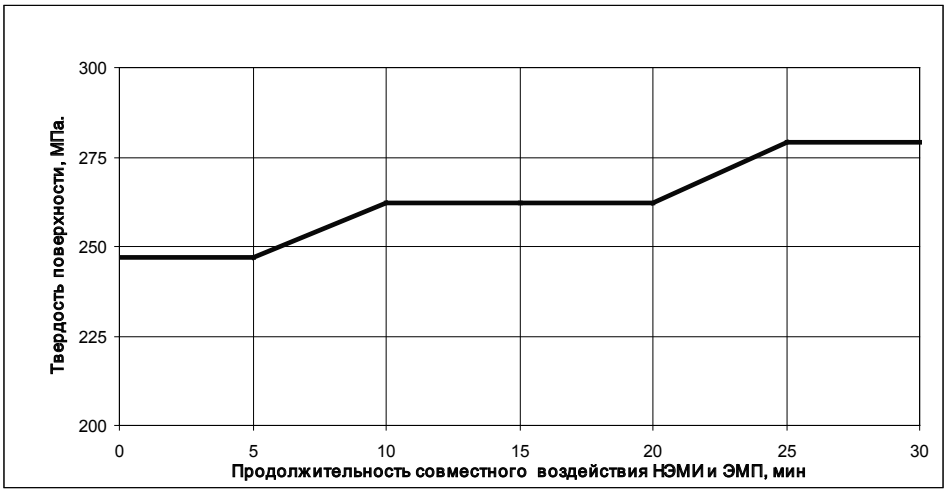


Рис. 2. Твёрдость образцов из полимерного связующего Этал Т 210 в зависимости от продолжительности совместного воздействия НЭМИ и ЭМП

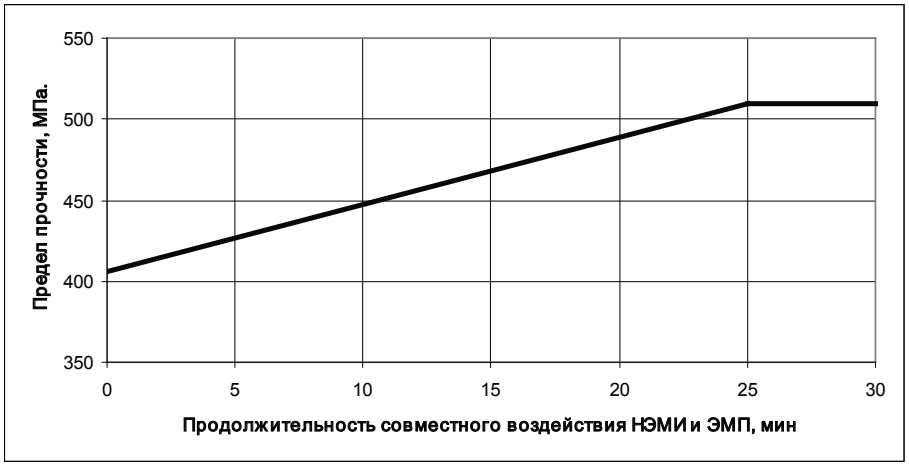


Рис. 3. Предел прочности при растяжении образцов из ПКМ Этал Т 210-Т11-ГВС9 в зависимости от продолжительности совместного воздействия НЭМИ и ЭМП на полимерное связующее

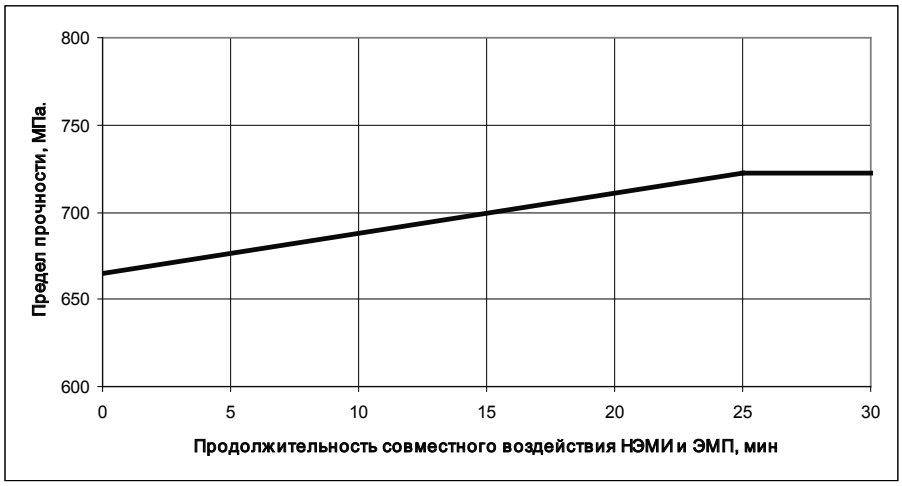


Рис. 4. Предел прочности при статическом изгибе образцов из ПКМ Этал Т 210-Т11-ГВС9 в зависимости от продолжительности совместного воздействия НЭМИ и ЭМП на полимерное связующее

Рис. 5. Ударная вязкость образцов из ПКМ Этал Т 210-Т11-ГВС9 в зависимости от продолжительности совместного воздействия НЭМИ и ЭМП на полимерное связующее

На ОАО «Дальэнергомаш» был спроектирован ряд машин типа центробежного нагнетателя воздуха (ЦНВ): 60/1.2,100/1.2 и 200/1.6 с применением в качестве основного материала рабочих колес ПКМ – стеклопластика. Теоретически удельные прочностные характеристики удовлетворяли требованию конструкции для машин со степенью повышения давления 1.2 и 1.6. Машины со степенью повышения давления 1.2 прошли стендовые испытания и были отгружены заказчику. Когда данный материал применили в конструкции колес машин со степенью повышения давления 1.6, то они не прошли испытания на разгонной установке – произошло разрушение на рабочей частоте вращения и штатной нагрузке. Принимая во внимание результаты вышеприведенных на рис. 2, 3, 4, 5 экспериментов, было принято решение применить в конструкции рабочих колес машины ЦНВ 200/1.6 (со степенью повышения давления 1.6) ПКМ с использованием термостойкого связующего Этал50Т -210, предварительно обработанного комбинированным воздействием НЭМИ и ЭМП продолжительностью 25 мин. Изготовленные опытные образцы успешно прошли испытания на разгонной установке с превышением центробежной нагрузки на 25 %.

Из вышеизложенного следует, что воздействие наносекундными электромагнитными импульсами в комбинации с магнитогидродинамическими – пондеромоторными силами электромагнитного поля на полимерные материалы представляет научный и практический интерес.

Основной задачей дальнейших исследований является установление взаимосвязи между параметрами совместного электрофизического воздействия на полимерное связующее и механическими свойствами ПКМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов, С.К. Динамические механические свойства полимерных конструкционных материалов / С.К. Абрамов, А.И. Асотов, Ю.В. Ефремушкин // Пластмассы. – 1985. - № 2.
2. Карташов, Э.М. Структурно-статистическая кинетика разрушения полимеров / Э.М. Карташов, Б. Цой, В.В. Шевелев. – М.: Химия, 2002. – 736 с.
3. Ландау, Л.Д. Электродинамика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Физматгиз, 1959. – 532 с.
4. Михайлин, Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы на их основе / Ю.А. Михайлин // Полимерные материалы. – 2005. – № 4. – С. 27.
5. Мирлин, Д.Н. Поверхностные поляритоны: Электромагнитные волны на поверхностях и границах раздела сред / Д.Н. Мирлин, Дж. Лагуа, Б. Фишер Б. [и др.]. – М.: Наука, 1985. – 525 с.
6. Огибалов, П.М. Конструкционные полимеры: учеб. пособие для вузов / П.М. Огибалов, Н.И. Малинин, В.П. Нетребко, Б.П. Кишкин. - М.: Изд-во Московского ун-та, 1972. – 428 с. – Т. 1.
7. Ри, Э.Х. Влияние облучения жидкой фазы наносекундными электромагнитными импульсами на ее строение, процессы кристаллизации, структурообразования и свойства литейных сплавов / Э.Х. Ри, Ри Хосен, С.В. Дорофеев, В.И. Якимов. – Владивосток: Дальнаука, 2008. – 177 с.
8. Черныш, В.П. Сварка с электромагнитным перемешиванием / В.П. Черныш, В.Д. Кузнецов, А.Н. Брискман, Г.М. Шеленков. – Киев: Техника, 1983. – 127 с.
9. Чернин, И. З. Эпоксидные полимеры и композиции / И.З. Чернин, Ф.М. Смехов, Ю.В. Жердев. – М.: Химия, 1982. – 208 с.

Марьин С.Б., Олейников А.И., Куриный В.В., Куриная Н.П.
S.B. Maryin, A.I. Oleynikov, V.V. Kuriny, N.P. Kurinaya

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛАСТОСЫПУЧИХ СРЕД В ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКЕ

USE OF ELASTIC MEDIUM IN SHEET-METAL PRESSWORK

Марьин Сергей Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и технология литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета, E-mail: kmtlp@knastu.ru.
Mr. Sergey B. Maryin – PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Foundry Industrial Machinery/Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), kmtlp@knastu.ru.

Олейников Александр Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой механики и анализа конструкций и процессов Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. E-mail: a.i.oleinikov@mail.ru, cvmi@knastu.ru.
Mr. Alexander I. Oleinikov – Professor, Head of the Dep. of Mechanics/Analysis of Structures and Processes, Doctor of Physics and Mathematics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), E-mail: a.i.oleinikov@mail.ru, cvmi@knastu.ru.

Куриный Владислав Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и технология литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. E-mail: kmtlp@knastu.ru.
Mr.Vladislav V. Kuriny – PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Foundry Industrial Machinery/Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), kmtlp@knastu.ru.

Куриная Наталья Петровна – старший преподаватель кафедры «Машины и технология литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. E-mail: kmtlp@knastu.ru.
Ms. Natalya P. Kurinaya – senior lecturer at the of Foundry Industrial Machinery/Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), kmtlp@knastu.ru.

Аннотация: представлен способ деформирования листовых заготовок с применением универсальной эластичной штамповой оснастки.

Summary: The paper describes a method for deformation of sheet billets using a universal elastic medium press forming equipment.

Ключевые слова: универсальная штамповая оснастка, эластичная среда, гибка листовых заготовок, снижение пружинения заготовки, увеличение глубины внедрения заготовки.

Keywords: universal press forming equipping, elastic medium, bending of sheet billets, decreasing billet elasticity, increasing billet penetration.

УДК 621.983.073

В последние годы на первый план выходят задачи формообразования деталей самых разнообразных конструктивно-геометрических форм, в которых используются универсальные формообразующие элементы штамповой оснастки. В этом отношении большой интерес представляют процессы гибки-формовки листовых заготовок давлением эластичных сред. Этот способ предпочтительнее других при частой сменяемости или модернизации объекта производства, требует меньше затрат на штамповую оснастку и позволяет значительно сократить сроки подготовки производства.

Поступила в редакцию 31.05.2010 г.

В отношении конструкций штамповой оснастки для гибки-формовки листовых заготовок точки зрения различны, некоторые авторы рекомендуют придавать матричному блоку форму, обеспечивающую равномерную деформацию эластичного инструмента в процессе гибки [1]. Эта равномерность может быть достигнута за счет выемки в блоке различных отверстий, пазов, выемок, подкладок (см. рис. 1), что лишает его универсальности и ведет к увеличению затрат на его изготовление.

Поведение эластичного элемента в процессе формообразования свидетельствует о том, что при штамповке деталей удельное давление по площади заготовки неравномерно, что негативно сказывается на её напряженно-деформированном состоянии. Поэтому возникает необходимость в разработке новых решений в проектировании технологической оснастки, а также в использовании новых материалов. При этом в качестве рабочего тела, деформирующего заготовку, могут быть использованы эластосыпучие среды, которые состоят из эластичных гранул (см. рис. 2).

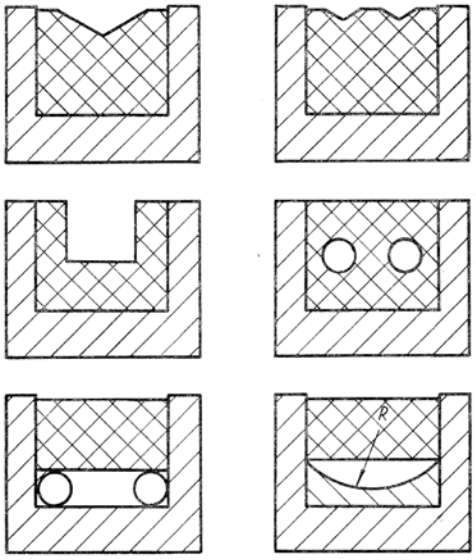


Рис. 1. Различные формы матричных

Применение эластосыпучих сред позволяет:

- получить равномерное распределение усилия по всему объему сжимаемой среды;
- уменьшить усилие деформирования рабочего тела, благодаря возможности гранул перемещаться друг относительно друга;
- увеличить глубину внедрения заготовки в эластичную среду при формообразовании заготовки жестким пуансоном в эластичное тело;
- уменьшить количество эластичных инструментов (матриц-пуансонов), так как сыпучий материал может принимать любую форму, при этом исключить затраты на их изготовление.

Использование в матричном блоке гранулированного полиуретана позволяет получить равномерное распределение усилия по всему объему сжимаемой среды благодаря тому, что он является сыпучим материалом, и гранулы в процессе штамповки имеют возможность перемещаться друг относительно друга. В последнее время на производстве все чаще применяется гранулированный полиуретан ВИТУР-Т, основными преимуществами которого являются сочетание пластичности с твердостью, высокое сопротивление истиранию и сопротивление на разрыв, способность выдерживать высокую нагрузку сжатия (до 250...300 МПа) и ударные нагрузки.

Рис. 2. Гранулированный полиуретан марки ВИТУР Т-0433-85

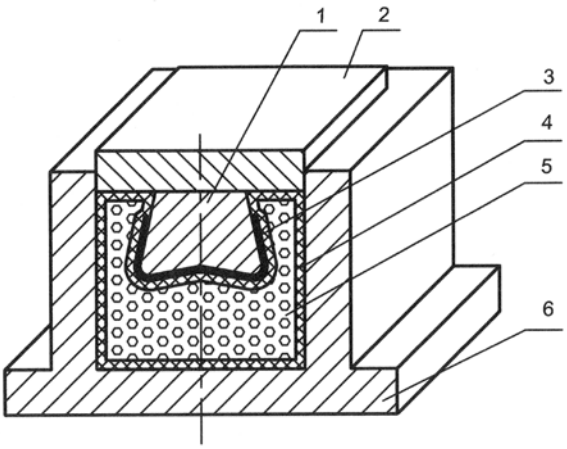


Рис. 3. Штамп для гибки-формовки деталей

Для проведения экспериментов с реальными условиями деформирования было разработано эластосыпучее рабочее тело, а также спроектирован и изготовлен комплект штамповой оснастки.

На рис. 3 показан штамп с эластосыпучим рабочим телом для гибки-формовки деталей в закрытом объеме.

Штамп работает следующим образом. Внутрь контейнера *6*, закрепленного на столе пресса, устанавливается рабочее тело, состоящее из эластичной оболочки *4* и наполнителя в виде эластичных гранул и смазки *5*. Сверху рабочего тела располагают листовую заготовку и устанавливают нажимной пуансон *1*, закрепленный на пуансонодержателе *2*, который давит с усилием на листовую заготовку, и она под действием давления рабочего тела принимает форму жесткого пуансона.

Наличие эластичной оболочки в предлагаемом рабочем теле позволяет использовать жидкие смазки, при которых трение между гранулами значительно снижается. Использование смазки между эластичными гранулами способствует снижению трения между гранулами и, как следствие, более свободному перемещению их относительно друга, что обеспечивает равномерное распределение давления по всей площади заготовки.

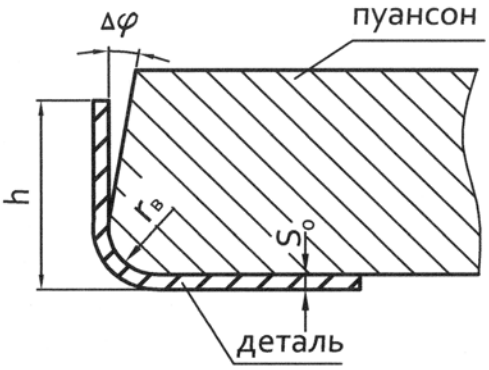


Рис. 4. Поднутрение пуансона на величину угла пружинения

Разработанный штамп позволяет снизить себестоимость изготавливаемых деталей из товых заготовок за счет простоты и ности используемой оснастки при обеспечении значительных степеней формоизменения, минимальных пружинений, необходимых ных механических свойств изделия при высоком качестве поверхностей.

Была экспериментально опробована штамповка деталей в штампе с эластосыпучей средой, с целью определения углов пружинения, согласно схеме, показанной на рис. 4.

Результаты экспериментов, величины углов пружинения образцов из материала АМГ6 приведены в табл. 1.

Таблица 1

Средние углы пружинения при гибке-формовке прямолинейных бортов с различной высотой полки

Марка материала	Толщина заготовки S_0, мм	Отношение внутреннего радиуса детали к толщине $r_в/S_0$	Высота борта *h*, мм					
			6	9	12	15	18	21
			Средний угол пружинения Δφ, градусы					
АМг6	1,0	3,0	$5^0 10'$	$3^0 10'$	$3^0 00'$	$2^0 55'$	–	–
		6,0	–	$7^0 00'$	$5^0 40'$	$5^0 10'$	$5^0 00'$	–
		9,0	–	–	$7^0 00'$	$6^0 10'$	$5^0 50'$	$5^0 40'$
	2,0	1,5	$3^0 00'$	$2^0 10'$	$2^0 00'$	$1^0 40'$	–	–
		3,0	–	$5^0 10'$	$4^0 10'$	$3^0 50'$	$3^0 20'$	–
		4,5	–	–	$5^0 10'$	$5^0 00'$	$5^0 00'$	$4^0 50'$
	3,0	1,0	–	–	–	$1^0 10'$	$1^0 10'$	$0^0 55'$
		2,0	–	–	–	$3^0 20'$	$3^0 10'$	$2^0 40'$
		3,0	–	–	–	$4^0 30'$	$3^0 40'$	$3^0 40'$

Результаты экспериментов обрабатывались с помощью пакета прикладных программ «STATISTICA 4.3», предназначенного для статистической обработки экспериментальных данных на персональном компьютере. Графические зависимости обработанных данных приведены на рис. 5 – 7.

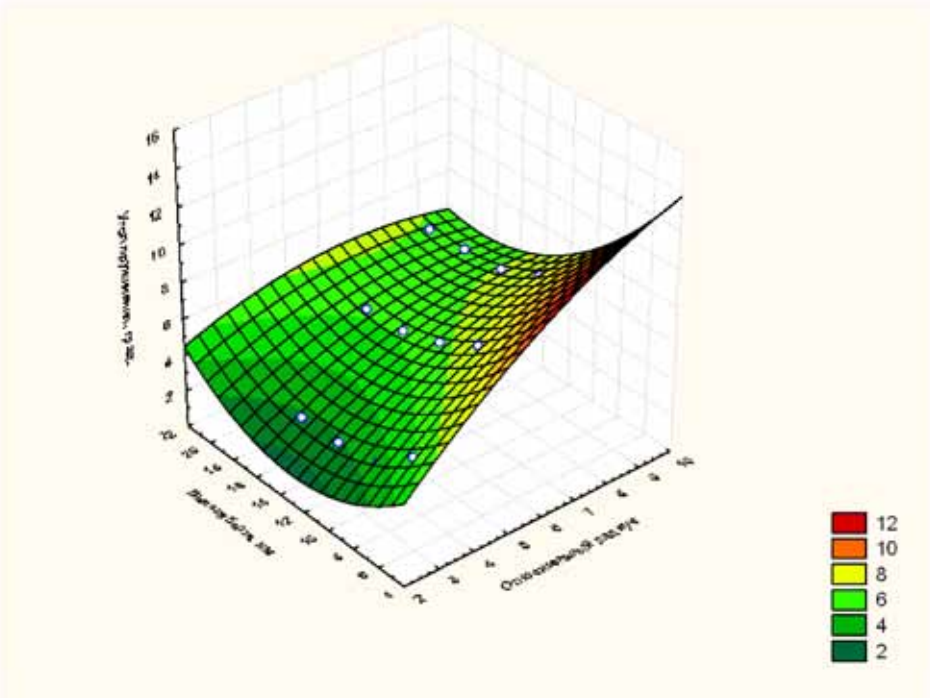


Рис. 5. Зависимость угла пружинения от относительного радиуса гиба и высоты прямолинейного борта: материал АМГ6, лист 1,0 мм

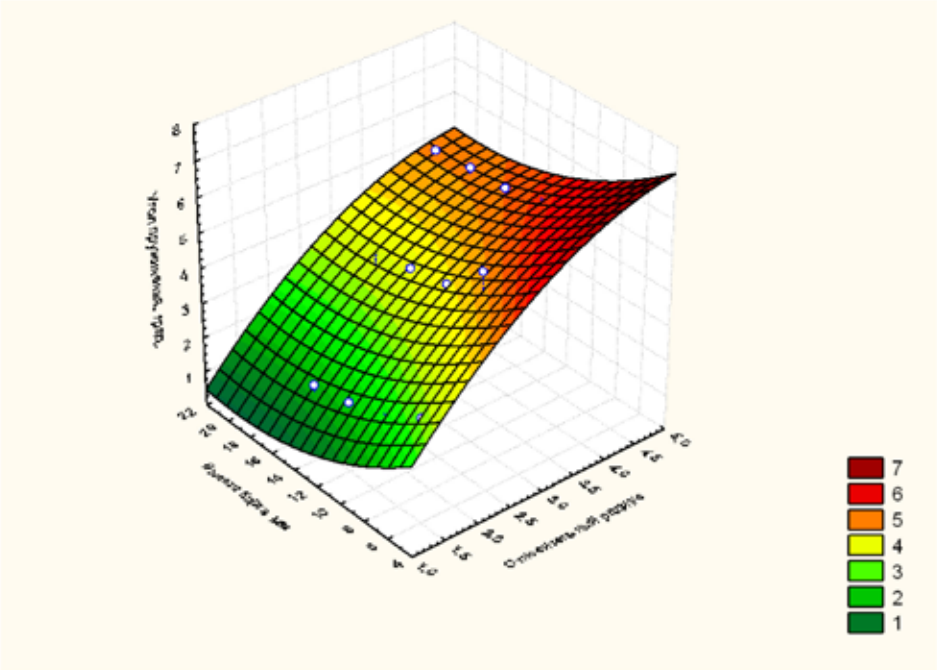


Рис. 6. Зависимость угла пружинения от относительного радиуса гиба и высоты прямолинейного борта: материал АМГ6, лист 2,0 мм.

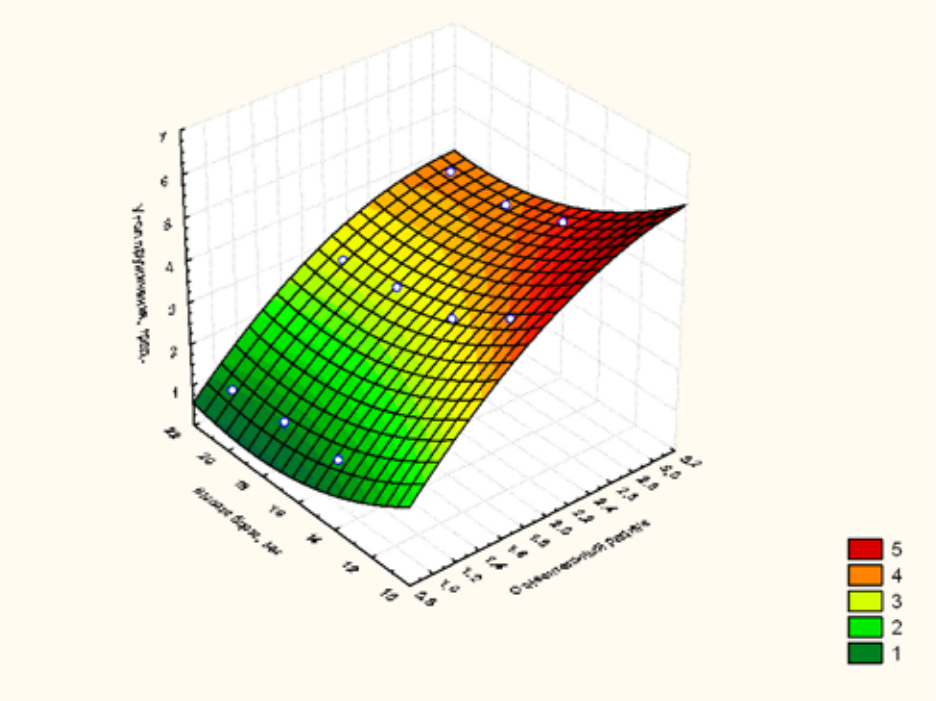


Рис. 7. Зависимость угла пружинения от относительного радиуса гиба
и высоты прямолинейного борта: материал АМГ6, лист 3,0 мм

Вывод. Рассмотренный штамп можно использовать как базовый при проектировании и изготовлении штамповой оснастки. Предназначенной для гибки-формовки листового материала эластичной средой на производстве. Угол пружинения φ борта при штамповке в штампе с эластосыпучей матрицей снижается на 5 – 12 % по сравнению со штамповкой в штампе с эластичной подушкой, вследствие более равномерного распределения давления по всей площади заготовки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ходырев, В.А. Применение полиуретана в листоштамповочном производстве. Пермь: Перм. кн. изд-во, 1973. – 218 с.
2. Пат. №82432 РФ, МКИ U1 B21D 9/15. Универсальная эластичная матрица для штамповки листовых заготовок с нагревом / Марьин С.Б.; опубл. 27.04.2009, Бюл. № 12.

Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета № II-1(2) 2010

Муравьёв В.И., Бахматов П.В., Мелкоступов К.А.
V.I. Muravyev, P.V. Bakhmatov, K.A. Melkostupov

К ВОПРОСУ АКТУАЛЬНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ СВАРКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

ON THE ISSUE OF USING FRICTION STIR WELDING (FSW) TECHNOLOGY FOR WELDING OF HIGH DUTY ALUMINUM ALLOYS

Муравьёв Василий Илларионович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ГОУВПО «КнАГТУ» (г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ktsp@knastu.ru.
Mr. Vassily I.Muravyev – Doctor in Engineering, Professor, Chief Researcher at Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktsp@knastu.ru

Бахматов Павел Вячеславович – кандидат технических наук, доцент ГОУВПО «КнАГТУ» (г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ktsp@knastu.ru.
Mr. Pavel V. Bakhmatov – PhD in Engineering, Associate Professor, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktsp@knastu.ru

Мелкоступов Константин Александрович – аспирант ГОУВПО «КнАГТУ» (г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ktsp@knastu.ru.
Mr. Konstantine A. Melkostupov, PhD candidate, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktsp@knastu.ru.

Аннотация: Проведен анализ литературных источников промышленного применения сварки трением с перемешиванием (СТП), технологических схем, материала и конфигурации рабочих инструментов, оборудования и оснастки. Показано, что СТП находит применение во всех отраслях машиностроения (судо-, авиа-, ракетостроение и др.). Установлено, что при всем многообразии публикаций отсутствуют фундаментальные работы, позволяющие в полной мере охарактеризовать физическую сущность процесса, и носят преимущественно прикладной характер решения задачи изготовления конкретной конструкции. Определены заслуживающие внимания направления исследований.

Summary: Relevant literature is reviewed on such issues as FSW in industrial use, process design, operating tools' material and configuration, equipment and tooling. It was shown that the FSW technology is used in all engineering fields (shipbuilding, aviation and aerospace engineering, etc.) It is revealed that fundamental works fully characterizing the physical nature of the FSW processes are lacking despite the abundance of publications on the matter, and they mainly present some of the applied aspects of the technology like solutions for welding of particular structures. Most promising research trends in this area are identified.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, алюминиевые сплавы, сварные соединения и конструкции, рабочий инструмент, режимы сварки, сварочное оборудование.

Keywords: friction Stir Welding, aluminum alloy, welded joints and structures, operating tools, welding regimes, welding equipment.

УДК 621.791.1

Конструкция цельносварного фюзеляжа пассажирского самолета из алюминиевых сплавов имеет значительные преимущества по сравнению с традиционной клепанной: более низкие трудоемкость и цикл изготовления, массу, статическую и циклическую прочность, ресурс, а также более высокие показатели герметичности и коррозионной стойкости [1, 2].

Поступила в редакцию 25.03.2010 г.

Фрезерование – единственный технологический процесс создания оребренных панелей летательных аппаратов, выполненных из высокопрочных алюминиевых сплавов. В процессе фрезерования основная масса металла заготовки преобразуется в стружку (процент использования металла – 2-3).

Оребренные панели после фрезерования подвергаются формообразованию путем натяжки на специальные эталоны. На эту операцию также даются значительные технологические припуски. С целью уменьшения материалоемкости используют приваренные контактной сваркой технологические пластины, которые зачастую не выдерживают прилагаемых нагрузок.

Переход к сварке панелей позволил бы не только значительно уменьшить материалоемкость производства, но и снизить энерго- и трудозатраты при их изготовлении.

Известно [3], что свариваемость высокопрочных алюминиевых сплавов при сварке плавлением неудовлетворительная из-за склонности образования горячих трещин. Кроме того, сварное соединение обладает повышенной хрупкостью и пониженной коррозионной стойкостью.

Наиболее перспективным методом для решения указанной проблемы является способ СТП [4]. В базовом процессе (см. рис. 1) СТП, известном в России с 1967 г. и реализованном за рубежом в 90-х гг., вращающийся инструмент, содержащий корпус 1, рабочий стержень 2 с различным рельефом поверхности и опорный бурт 3, медленно погружают в стык деталей 4 и 5 на глубину, примерно равную толщине соединяемых кромок; при этом опорный бурт (заплечник) опирается на поверхность кромок. Материал кромок за счет теплоты, выделяющейся при трении, нагревается до пластичного состояния, вследствие чего уменьшается усилие, действующее на инструмент. При поступательном перемещении вращающегося инструмента по стыку пластическое течение выносит материал в зону, освобождающуюся позади движущегося инструмента. При этом образуется шов.

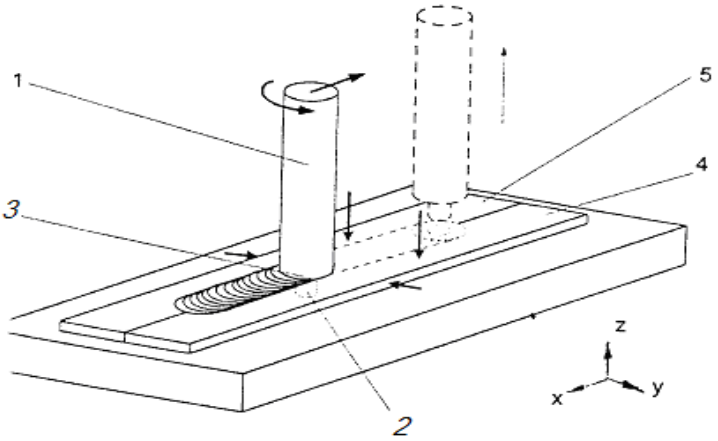


Рис. 1. Схема процесса СТП: 1 – корпус инструмента;
2 – рабочий стержень; 3 – опорный бурт (заплечник); 4, 5 – детали

По данным литературных источников основными преимуществами СТП по сравнению со способами сварки плавлением являются следующие:

- возможность получения бездефектных швов на сплавах, склонных в процессе сварки к образованию горячих трещин и пористости в металле шва;
- сохранение в значительной мере свойств основного металла в зоне сварки;
- отсутствие необходимости в присадочном металле, применении защитного газа; удалении поверхностных оксидов на свариваемых кромках перед сваркой, шлака и брызг после сварки;
- малый расход энергии;
- отсутствие потерь легирующих элементов в металле шва;

- отсутствие особых требований к процессу сварки;
- практически полное отсутствие коробления и термической деформации;
- отсутствие вредных испарений и ультрафиолетового излучения в процессе сварки;
- возможность сварки практически всех типов сварных соединений во всех пространственных положениях (см. рис. 2).

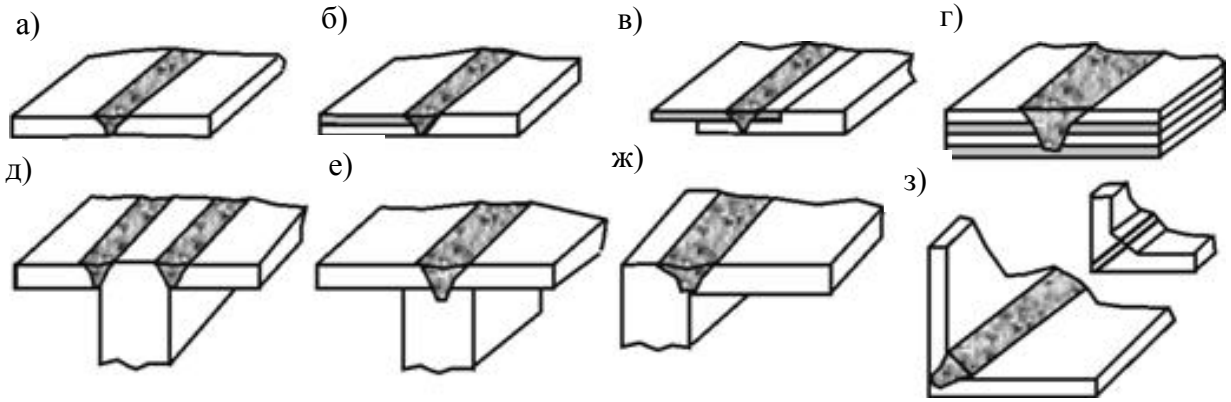


Рис. 2. Типы сварных соединений, выполняемых СТП: а – стыковое; б – нахлесточно-стыковое; в – нахлесточное; г – многослойное нахлесточное; д – двухпроходное тавровое; е – тавровое прорезное; ж, з – угловое

Работы по перемешивающей и другим технологиям сварки трением выполняются и курируются The Welding Institute in UK (TWI) (Великобритания), NASA, Lockheed-Martin Corp., Boeing, Wisconsin Center for Space Automation & Robotics, Oak Ridge National Laboratory MTS Systems Corporation, Thompson Friction Welding (США), Imhof Hartchrom GmbH и Klaus Raiser GmbH (Германия), Hidetoshi Fujii и исследовательским центром JWRI при Osaka University (Япония), Shanghai puda friction welder co., ltd. (Китай) и другими корпорациями и компаниями.

В РФ и Украине разработками по СТП занимаются Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины; ГКНПЦ им. М.В. Хруничева; ОАО «НИАТ»; Тульский государственный университет; КБ «Салют» ГКНПЦ им. М.В. Хруничева; РКЗ ГК НПЦ им. М.В. Хруничева; НТУУ «Киевский политехнический институт»; ФГУП «РСК МиГ»; ОАО «ОКБ Сухого».

Инструмент

Одним из важнейших факторов, наиболее заметно влияющих на структуру шва и формирование соединения при СТП, является конструкция инструмента, особенно геометрия таких его элементов, как рабочий стержень и опорный бурт. Они контактируют с материалом, нагретым за счет работы сил трения до пластичного состояния, и формируют потоки пластического течения. При этом сам инструмент и особенно его рабочий стержень подвергаются высоким термомеханическим нагрузкам. На разогретый рабочий стержень одновременно действуют крутящий момент и знакопеременные циклические изгибающие силы.

На сегодняшний день по способу СТП получено более 500 патентов, из них практически 80 % составляют патенты, выданные применительно к конфигурации самого инструмента. Поэтому перечислять разновидности рабочего инструмента можно бесконечно.

Из заявленных вариантов можно выделить основные признаки: конусную форму стержня; разную форму его поперечного сечения; наличие на конусной поверхности стержня, по меньшей мере, одного среза, выступа, витка спиральной нарезки или каких-либо других фрагментов, интенсифицирующих процессы перемешивания и пластического течения материа-

ла (см. рис. 3). Длина стержня зависит от толщины соединяемых деталей, а отношение его диаметра в зоне опорного бурта к длине составляет примерно от 4:1 при толщине кромок 3 – 6 мм и до 1:1 – при толщине кромок 15 – 25 мм. Наиболее полное описание применяемых рабочих инструментов (РИ) приведено в работе [5].

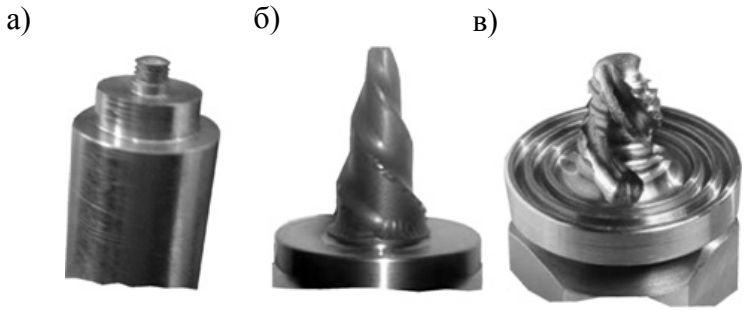


Рис. 3. Рабочие части инструментов, используемых при СТП:
а – традиционная конструкция инструмента; б – инструмент для получения глубоких швов; в – инструмент со специальной формой торца

Инструменты для СТП изготавливают из инструментальных сталей (сварка пластиков и легкоплавких металлов), быстрорежущих сталей (сварка алюминиевых и магниевых сплавов), металлокерамических твердых сплавов и минералокерамик, специальных композиционных материалов (сварка алюминиевых сплавов, сталей, сплавов на никелевой и титановой основах). При выборе инструментального материала стремятся избежать намазывания оттесняемого металла на поверхности инструмента. Для этих целей могут быть использованы специальные покрытия.

При СТП достигается высокое качество сварки. Деформация и перемешивание металла в твердой фазе иногда создают микроструктуры более прочные, чем основной материал. Обычно прочность на растяжение и усталостная прочность сварного шва составляет 90 % от этих характеристик для основного материала. Сварка может выполняться в различных позициях (вертикальной, горизонтальной, под наклоном, снизу вверх и т.д.), поскольку силы гравитации в данном случае не играют никакой роли. Перемещение инструмента или детали может производиться в различных направлениях и по программе.

Режимы

Основными параметрами режима СТП являются:

- скорость вращения инструмента;
- характер вращения инструмента (вращательный, возвратно-вращательный, направление и скорости вращения наружных и внутренних частей инструмента);
- скорость сварки;
- конструкция, форма и геометрические характеристики рабочей части инструмента;
- угол наклона инструмента к поверхности детали.

Поскольку основные исследования СТП носят коммерческий характер и финансируются так называемыми Group Sponsored Project, то технологическая информация в публикациях ограничена и главным образом касается скоростей сварки и вращения инструмента.

Как видно из рис. 4, сплавы серии 6000 можно сваривать в более широком диапазоне режимов, чем сплавы серии 5000.

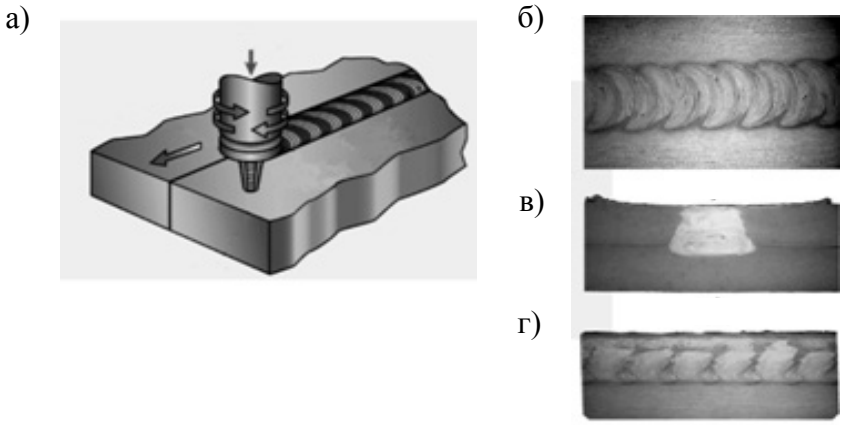


Рис. 4. СТП с возвратно-вращательным движением инструмента: а – схема сварки; б – вид сварного шва; в – сечение, перпендикулярное направлению шва; г – сечение вдоль шва

Оборудование

СТП может быть осуществлено на модернизированном вертикальном фрезерном станке (см. рис. 5, г), но конфигурация его рабочей зоны ограничена для создания сварных конструкций протяженных габаритов, поэтому в настоящее время большое число фирм в разных странах производят оборудование для СТП, которое может быть классифицировано по конфигурации на три типа: консольный (см. рис. 5, а), портальный (см. рис. 5, б), орбитальный (см. рис. 5, в).

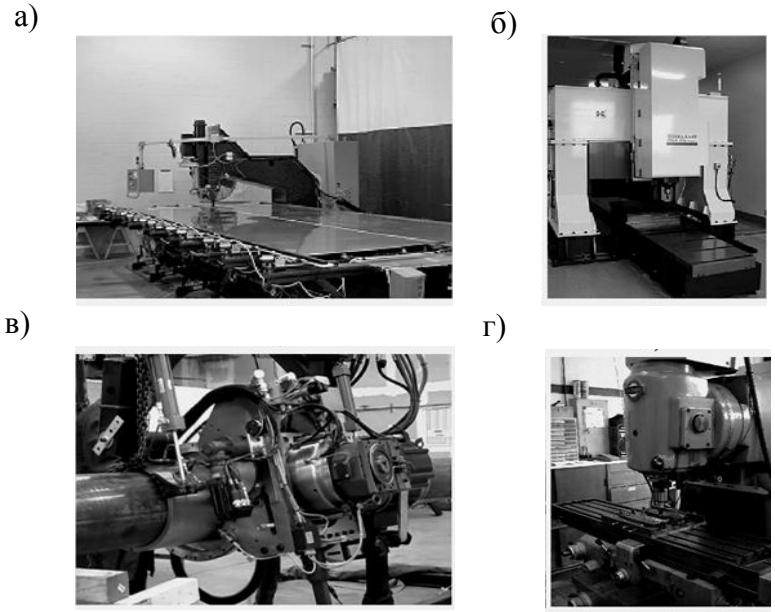


Рис. 5. Оборудование для сварки трением с перемешиванием: а – консольного типа; б – портального типа; в – устройство для сварки труб; г – установка на базе модернизированного фрезерного станка

Британский институт сварки (TWI) разработал серию машин типа FW для СТП деталей размером до 3,4 × 4 м, толщиной до 15 мм (односторонняя сварка) и до 50 мм (двусторонняя). В Галифаксе (Великобритания) компания Crawford Swif изготовила для компании BAE System в Филтоне трехкоординатную установку Power Stir™-360, рассчитанную на усилие 100 кН. Эта установка предназначалась для СТП экспериментальных конструкций крыльев и обшивки фюзеляжа больших самолетов, в частности AIRBUS A3xxx и других самолетов.

Американская фирма NOVA-TECH Engineering производит промышленные и экспериментальные установки типа H10K, C10K, G10K, V10K, V30K, P30K, H30K для СТП кольцевых и продольных соединений емкостей. Установки рассчитаны на усилие до 45 кН по оси шпинделя и до 22 кН по нормали к оси шпинделя. Имеется система компьютерного цифрового контроля по CNC-программе усилий для регулирования положения инструмента относительно поверхности деталей с регистрацией данных.

MTS System Co (США) в сотрудничестве с другими компаниями получила несколько патентов по конструкции сварочной головки и инструментов, а также разработала систему управления положением инструмента относительно поверхности стыка, применение которой обеспечило возможность соединения элементов двойной кривизны.

В последние годы в КНР так же расширяется разработка и применение СТП. Создан специализированный Центр СТП, в котором изготовляются установки разных типов.

Промышленное применение

Основные области применения СТП [5, 8] – это судостроение (палубные надстройки, переборки, элементы корпуса); аэрокосмическая промышленность (элементы фюзеляжа, крыльев, топливные и баки криогенных жидкостей, корпуса ракет); железнодорожный транспорт и метро (корпуса вагонов, рамы и основания поездов метро); автомобильная промышленность (узлы крепления двигателя, диски колес, рамы автомобилей); электротехническая промышленность (корпуса электромоторов, токоподводы, параболические антенны, шины); строительная индустрия (алюминиевые мосты, алюминиевые трубопроводы, теплообменники и кондиционеры); пищевая промышленность (ёмкости для пива, упаковка) и пр. Этот перечень можно продолжать бесконечно. Особенно эффективна СТП при массовом производстве деталей.

Примером успешного применения СТП могут быть следующие:

В 1999 г., используя достижения фундаментальной науки и новых технологий обработки алюминия, была предложена концепция «A-train» для изготовления пассажирского электроподвижного состава, которая основывалась на идее использования двусторонних крупноразмерных несущих панелей, изготовленных из алюминия, и модульной конструкции самого корпуса вагона. За счет технологических нововведений повысилось качество изготовления при уменьшении затрат, снизился уровень шума внутри вагона, повысилась стойкость к ударным нагрузкам и увеличилась жесткость конструкции.

Концепция A-train была бы трудноосуществима без развития эффективной технологии сварки крупногабаритных алюминиевых конструкций.

До недавнего времени для сборки корпусов вагонов применялась технология дуговой сварки (MIG, MAG и др.). Но все эти технологии основываются на нагреве материала выше точки плавления, что приводит к деформации готовой конструкции после остывания шва. В 1993 г. Институтом сварки Великобритании (TWI) была предложена и запатентована технология сварки трением FSW (friction stir welding) (см. рис. 6).

Ее доведение до промышленных образцов было выполнено международным консорциумом, в состав которого входила и компания «Hitachi», а часть работ выполнялась в корпоративной исследовательской лаборатории. В 1998 г. на заводе Kasado компании Hitachi вступила в строй установка для сварки деталей длиной до 3 м, а в 1999 г. – для 25-метровых.

НАСА проявила большую заинтересованность в развитии процесса СТП в США применительно к производству аэрокосмических изделий. Компания «Боинг» первой в США приобрела опытную, а затем (в 1998 – 1999 гг.) три промышленные установки фирмы ESAB со встроенной компьютерной системой контроля и видеонаблюдения за процессом, предназначенные для изготовления баков ракет серии «Дельта» (см. рис. 7). Однако прежде чем приступить к промышленному использованию процесса СТП, в США проводят интенсивные исследования и разработки с целью «собственного понимания процесса». На исследования и приобретение оборудования компания «Боинг» израсходовала 15 млн долл.

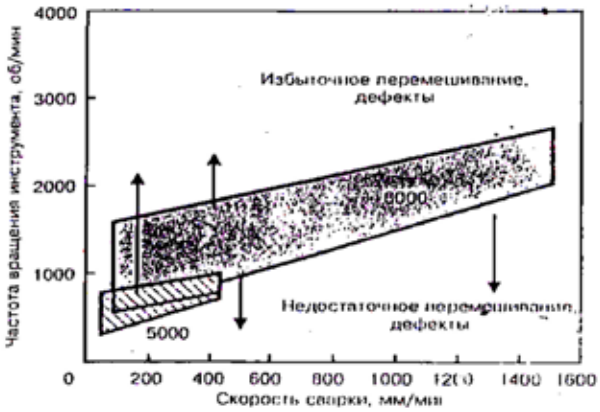


Рис. 6. Сравнение скорости сварки и частоты вращения инструмента, позволяющие получать качественные соединения алюминиевых сплавов серии 5000 и 6000 толщиной 5 мм

Рис. 7. Закрепление панелей в установке для СТП продольных швов цилиндра бака ракеты «Дельта II – IV»

ЭСАБ Инжиниринг применила промышленную установку ESAB SuperStir для изготовления алюминиевых панелей размером 6 × 16 м (см. рис. 8) корпусов скоростных катеров и крупнокорпусных паромов.

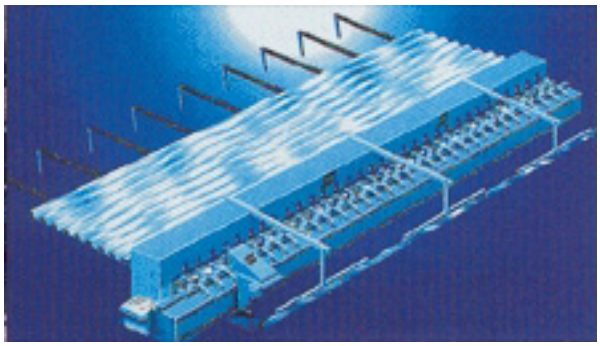


Рис. 8. Сварка панелей морских судов на установке ESAB

Одной из разновидностей СТП является точечная сварка трением. В частности, она получила применение для сварки алюминия взамен дуговой и контактной точечной сварки, при применении которых существуют технологические трудности, обусловленные высокой электро- и теплопроводностью алюминия. На заводе Mazda Motor Corp. задние двери из алюминия автомобиля Mazda-RX8 сваривают точечной сваркой трением (см. рис. 9, 10).

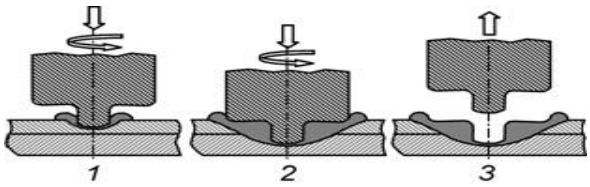


Рис. 9. Стадии формирования сварного соединения при точечной сварке трением: 1 – стадия ввода рабочего стержня; 2 – стадия формирования сварной точки; 3 – стадия вывода рабочего стержня из зоны сварки

Рис. 10. Схема точечной сварки трением, используемая фирмой MAZDA, и устройство для ее выполнения

Дефекты

Самый распространенный дефект сварных соединений, выполненных СТП, – это возникновение отверстий в месте выхода рабочего инструмента из стыка в конце шва. Для решения этой проблемы, в частности в кольцевых швах, отверстие может быть выведено за пределы шва использованием специальной клиновой вставки (см. рис. 11). В дальнейшем эта вставка удаляется механической обработкой.

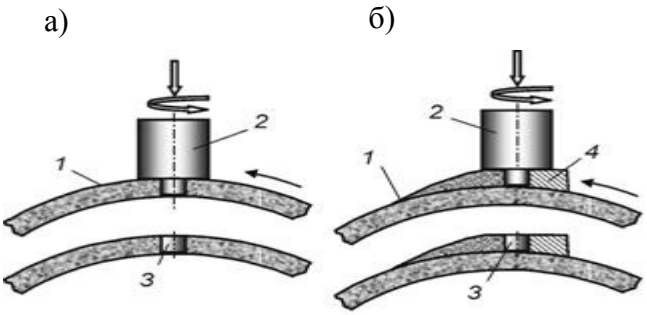
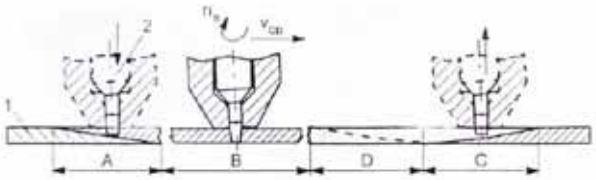


Рис. 11. Получение кольцевого шва без использования клиновой вставки (а) и с вставкой (б): 1 – кольцевой шов; 2 – инструмент; 3 – отверстие, остающееся после отвода инструмента; 4 – клиновая вставка

В работе [6] для решения этой проблемы авторы применили разработанный ими сварочный инструмент с подвижным рабочим стержнем. На рис. 12, а приведена схема внедрения стержня РИ и вывода из шва.

В начале процесса вращающийся РИ с убранным в корпус инструмента рабочим стержнем опускают до требуемого контакта опорного бурта с поверхностью соединяемых кромок; с этого момента начинают внедрять рабочий стержень в стык, а движение по вертикали корпуса с опорным буртом прекращают. При этом одновременно производят перемещение вращающегося инструмента вдоль линии стыка. После полного оборота и перекрытия начального участка шва на 40 – 50 мм рабочий стержень инструмента постепенно выводят из стыка, затем отводят РИ от поверхности детали, прекращают его перемещение по линии стыка и отключают вращение. На продольном микрошлифе (см. рис. 12, б) видно, что при этом конечный участок сварного шва формируется без дефектов.

а)



б)

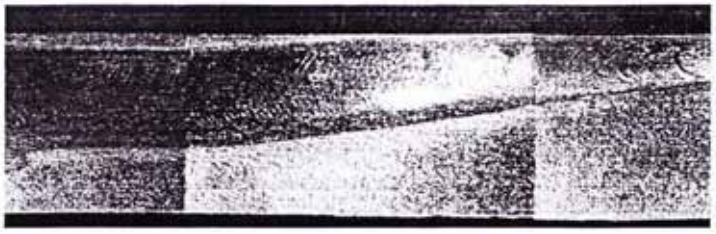


Рис. 12. Схема введения в стык и выведения из него рабочего стержня сварочного инструмента (а) (А, С – зоны ввода и вывода инструмента, В – зона шва без перекрытия, D – зона перекрытия начала шва): 1 – листовая заготовка (δ = 4 мм); 2 – инструмент
, продольный макрошлиф конечного

Авторами работы [7] описан РИ (см. рис. 13), позволяющий выполнять сварку, не меняя инструмент для каждой толщины шва, а устанавливая вылет рабочего стержня относительно опорного бурта, соответствующего толщине детали. Благодаря этому появилась возможность сваривать детали переменного сечения соединяемых кромок. Кроме того, этот РИ позволяет вводить присадочный металл в шов вблизи рабочего стержня.

По мнению большинства исследователей, основным специфическим дефектом соединений, выполненных СТП, является несплавление в корне шва. Основными причинами возникновения этого дефекта является либо локальное увеличение толщины свариваемого металла, либо нарушение переноса металла в корневую часть соединения. Устранению этого дефекта способствует применение подкладок с канавкой, в которую вдавливается металл, формируя небольшой валик. Затем он удаляется механической обработкой, обеспечивая высокое качество корневой части соединения.

Одним из небольших недостатков соединений, выполненных СТП, является образование незначительного уменьшения толщины металла в области соединения за счет контакта заплечника инструмента и поверхности заготовок. Обычно эта величина составляет 0,1 – 0,2 мм, однако в некоторых случаях это может оказать влияние на прочность соединений. Для устранения этого недостатка рекомендуется создавать в месте стыка утолщение, равное по ширине диаметру заплечника. Особенно эффективен этот способ при наличии зазора в стыке.

При СТП формируется шов, в структуре которого можно выделить несколько основных зон: «ядро» сварки, состоящее из термопластически деформированного материала, перенесенного выступом инструмента, зону термопластической деформации и зону термического влияния (ЗТВ).

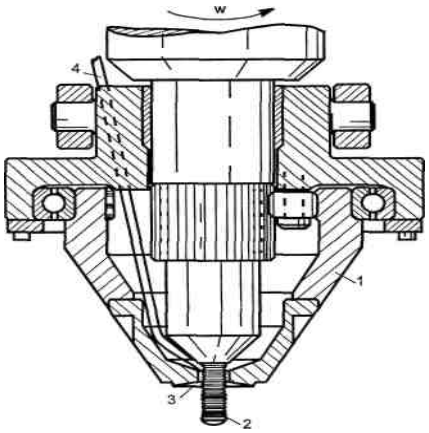


Рис. 13. Инструмент для СТП
с регулируемым вылетом рабочего стержня
ня относительно опорного бурта, враще-
нием их в разных направлениях (от одного
привода) и подачей в зону сварки присадки

При традиционной схеме СТП наблюдается асимметричная структура «ядра», связанная с однонаправленным перемещением материала. Для того чтобы избежать такой асимметрии, сварку выполняют с возвратно-вращательным движением инструмента (см. рис. 14). В этом случае реверс производится через один или несколько оборотов инструмента.

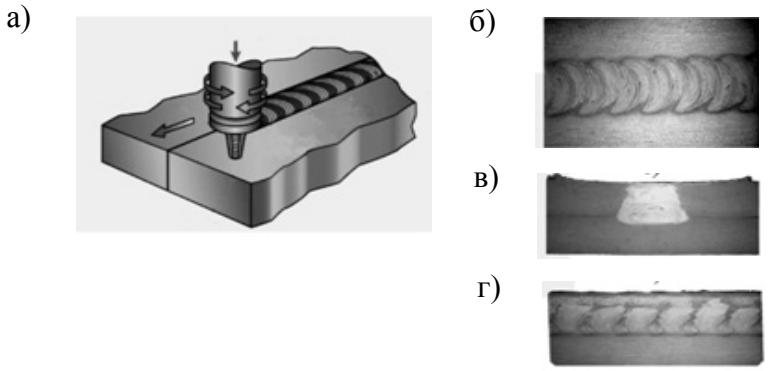


Рис. 14. СТП с возвратно-вращательным движением
инструмента: а – схема сварки; б – вид сварного шва;
в – сечение перпендикулярное направлению шва;
г – сечение вдоль шва

Для управления структурой шва могут использоваться специальные инструменты, имеющие наружную и внутреннюю части (см. рис. 15). Вращение этих частей может выполняться с различными скоростями в одном или противоположных направлениях. Наружная часть может выполняться, например, из материала свариваемых деталей. В этом случае в процессе сварки она играет роль присадочного материала, переносимого на поверхность свариваемого изделия.

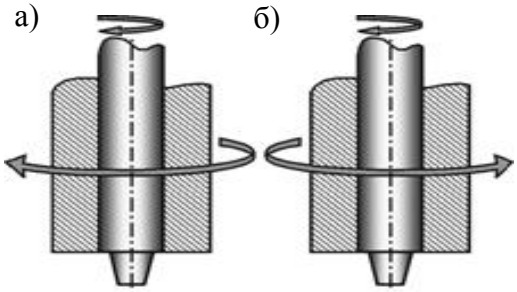


Рис. 15. Инструменты с наружной и внутренней частями, вращающимися в одном (а) и противоположных (б) направлениях

Прочность сварных соединений

Сравнительные исследования свойств соединений СТП высокопрочных алюминиевых термически не упрочняемых и термически упрочняемых сплавов, например сплавов 5083 (группы Al-Mg) и 6082 (группы Al-Si-Mg), показали, что по пределу прочности соединение сплава 5083 близко к основному металлу (коэффициент прочности $\sigma_{\text{в соед}}/\sigma_{0,2\ \text{осн}} \geq 0,9$). Для соединения сплава 6082 коэффициент прочности снижается до 0,65 вследствие разупрочнения ЗТВ, по которой при испытании идет разрушение. У сварных образцов сплава 5083 разрушение происходит в зоне ядра шва.

Исследования пластического течения металла при СТП

В табл. 1 приведена классификация методик проведенных исследований пластического течения материала в процессе СТП.

Приведенные методики исследования пластического течения материала при СТП позволяют наблюдать перемещение материала лишь после окончания процесса сварки либо прослеживать расположение потоков дискретно, фиксируя текущее положение процесса остановками на «месте». По-видимому, правильнее вести речь о результатах экспериментального исследования не пластического течения, а массопереноса.

Анализ публикаций позволяет представить следующую феноменологическую связь в процессе СТП: режим сварки (частота вращения инструмента, скорость сварки) – термомеханические процессы (температура нагрева, усилия на инструменте) – пластическое течение (тепломассоперенос) – формирование структуры соединения (ядро, ЗТВ) – свойства соединения (прочность, плотность и др.). Однако не всегда указывается, инструментом какой конструкции выполнялась сварка экспериментальных образцов. Детали конструкции инструмента не учитываются также при моделировании процесса, тогда как конструкция инструмента является параметром, не менее значимым по влиянию на термомеханические процессы, чем параметры режима сварки. Поэтому результаты таких сообщений справедливы лишь для конструкции конкретного инструмента.

Основными факторами, ограничивающими применение СТП, в настоящее время являются:

- необходимость жесткого закрепления свариваемых деталей;
- необходимость проектирования и изготовления специальных инструментов;
- невозможность формирования швов, требующих нанесения дополнительного металла;
- невозможность сварки материалов, имеющих низкую пластичность даже при высоких температурах или теряющих требуемые механические свойства в результате термопластической деформации.

Таблица 1

Методики, использованные для определения характера пластического течения металла в процессе СТП

№ п.п.	Характер	Специфика	Содержание	Результат	Примечание
1	2	3	4	5	6
1	Методы исследования для выявления течения материала в зоне перемешивания		Техника остановки потока «на месте»	Примерное представление о перемещении материала	Методики дают качественную картину массопереноса, а не детализируют процесс пластического течения
2		Методики, основанные на размещении в процессе сборки под СТП различных маркеров, по перемещению которых стыка судят о перемещении материала в зоне сварки; наблюдаются после сварки на рентгенограммах	Роль маркеров выполняют стальные шарики диаметром 0,38 мм, помещенные в канавках торцов соединяемых кромок		
3			Маркеры – медные шпильки, размещенные в кромках соединяемых алюминиевых пластин		
4			Для маркирования применяют медную фольгу, размещенную в стыке между соединяемыми кромками пластин		
5	Методы исследования для выявления течения материала в зоне, прилегающей к вращающемуся инструменту		В качестве маркера использован композитный материал Al-SiC, который в виде прокладок толщиной 0,6 мм размещали между вертикально установленными пластинами из алюминиевого сплава 7050-T7 толщиной 6,35 мм (см. рис. 16)	Частицы композита SiC микронного размера хорошо видны на непротравленной поверхности шлифов, изготовленных с сохранением в них остановленного «на месте» рабочего стержня инструмента	Показано, что материал перед инструментом перемещается в направлении его вращения, а также из корневых зон в верхние

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6
6		Для анализа течения материала в процессе СТП построены томографические модели. Для этого с помощью двумерных изображений, получаемых рентгеновским просвечиванием под разными углами (360 ракурсов через 1° относительно оси вращения), строили трехмерную модель, которой можно манипулировать в реальном времени на мониторе компьютера	В качестве материала маркера использована медная отожженная фольга толщиной 0,1 мм, размещенная в стыке	На приведенных зависимостях (см. рис. 19) видно, что при использовании в качестве маркера медной фольги толщиной 0,1 мм при СТП сплавов 2024-Т3 + 2024-Т3 (кривая 1) маркер практически не влияет на термомеханику процесса, в то время как при СТП сплавов 6082-Т6 + 2024-Т3 (кривая 2) с таким же маркером влияет заметно, снижая достоверность результатов	Метод не всегда позволяет выявлять детали пластического течения из-за недостаточной разрешающей способности оборудования, а также вследствие разрушения медного маркера вблизи инструмента на мелкие частицы, которые не выявляются при рентгенографии. Поэтому в качестве дополнительного эффективного средства авторы привлекают металлографию; частицы маркера четко наблюдаются на нетравленых шлифах
7	Исследования пластического течения при СТП разнородных алюминиевых сплавов		Исследовано формирование соединения разнородных алюминиевых сплавов в результате пластического течения материала с четким изображением участков каждого из сплавов, что обусловлено разной их травимостью (см. рис. 17)	Участки имеют форму, вытянутую в направлении вращения инструмента и соответственно в направлении пластического течения материала	В работах отмечено существенное влияние параметров сварки на течение металла и его перемешивание. Приведенная методика позволяет наблюдать за массопереносом, однако, при менее детальном исследовании кинетики процесса пластического течения
8		Исследования поведения оксидных частиц при пластическом течении материала в процессе СТП	Мелкие оксиды, полученные измельчением и перемешиванием поверхностной оксидной пленки, осаждаются на алюминиевых частицах микронного размера, обволакивают их, увеличивая их объем и травимость	Расположение частиц хорошо видно на шлифах, как и при использовании медных маркеров (см. рис. 18)	

Кроме того, до настоящего момента отсутствуют:

1. Фундаментальный подход к оценке механизма образования сварного соединения при СТП:

- нет однозначного понимания физики образования сварного соединения;
- отсутствует трактовка условий образования сварных соединений;
- нет увязки формообразования сварного соединения с теплофизическими свойствами свариваемых изделий и распределением теплового потока, образующегося в процессе трения;
- не произведены исследования, оценивающие влияние формы РИ, его свойств и состояния на формообразование сварного соединения;
- практически отсутствуют работы, в которых учитывалось влияние первоначального состояния основного металла и последующей термообработки сварного соединения на его структуру и свойства;
- отсутствует информация по исследованию угловых швов в тавровых, угловых и нахлёсточных соединениях;
- нет учета влияния подготовки свариваемых кромок на качество сварных соединений, их структуру и свойства.

2. Методология выбора РИ, параметров режима сварки, дополнительных мероприятий (ультразвуковые (УЗ) колебания, подогрев и т.п.) различных металлов с сечениями сварных швов разной конфигурации.

3. Информация о СТП сложных оребренных панелей ответственного назначения.

4. Рекомендации по разработке оснастки для СТП (используемые материалы, расчет прижимов и т.п.).

5. Данные по оценке деформаций и остаточных напряжений сварных соединений.

6. Работы, связанные с испытаниями на циклическую прочность сварных соединений, что недопустимо при разработке технологических процессов СТП и создании ответственных конструкций.

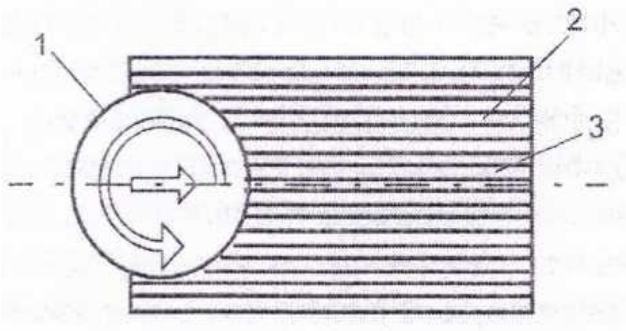


Рис. 16. Схема СТП с поступательным перемещением вращающегося инструмента 1, погруженного в пакет пластин 2 из сплава 7075 с прокладками 3 из композитного материала Al – SiC (ось инструмента параллельна плоскости пластин)

а)

б)

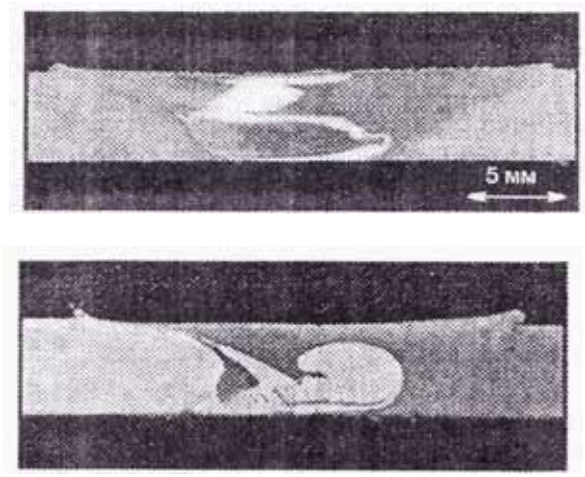


Рис. 17. Макроструктура швов, выполненных СТП алюминиевых сплавов 6082 + 5083 (а) и 6082 + 6082 (б) со вставкой из сплава 5063

а) б)

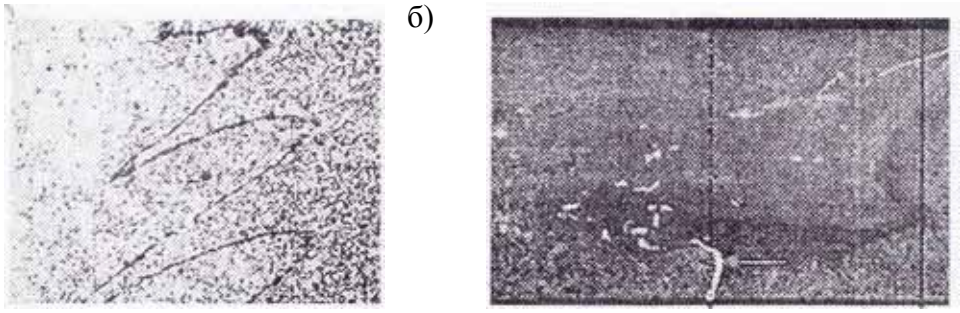


Рис. 18. Расположение на протравленном шлифе (х250) в горизонтальном сечении шва частиц оксида (СТП алюминия Al 99,95) (а) и меди (СТП сплава 2024-Т3) (б)

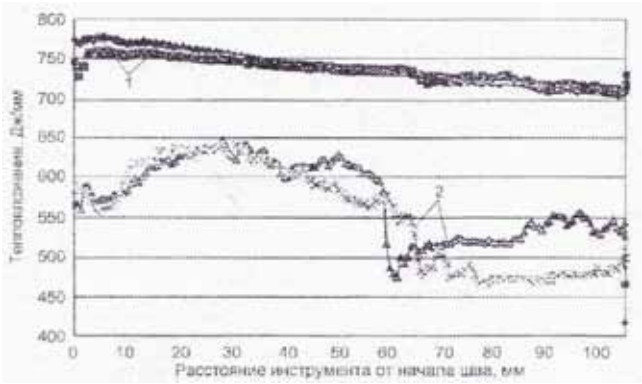


Рис. 19. Зависимость тепловложения в шов от расстояния инструмента от начала шва при СТП (по два образца толщиной 3 мм на каждое сочетание сплавов, маркер расположен в стыке, начиная с 65 мм от начала шва и до 105 мм (конец шва))

Выводы

1. Большое количество публикаций, как зарубежных, так и отечественных, характеризует огромный интерес к процессу СТП как наиболее актуальный при разработке технологических процессов создания изделий из конструкционных материалов, ограниченно свариваемых или не свариваемых сваркой плавлением.

2. Публикации не дают исчерпывающей информации по объяснению феномена образования структуры ядра в центре сварного соединения. Для этой цели необходимо проводить всесторонние фундаментальные исследования механизма формирования сварного соединения при СТП.

3. Большинством авторов описаны технологические схемы СТП с использованием определенной конфигурации РИ и режимов сварки, выбранных либо инстинктивно, либо по опыту предыдущих исследователей. Тем самым можно умозаключить факт отсутствия методологии выбора взаимосвязанных формы РИ и параметров режима СТП применительно к конкретной конфигурации поперечного сечения шва и физико-механических свойств свариваемого металла. Решением этой проблемы могут стать лишь исследования этих взаимосвязей как экспериментальные, так и анализ результатов уже опубликованных данных.

4. Очень ограничена информация по промышленному применению СТП в РФ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рязанцев, В.И. Технологические аспекты сборки-сварки цельносварного пассажирского самолета из алюминиевых сплавов / В.И. Рязанцев, В.А. Федосеев, В.Н. Мацнев // Технология машиностроения. – 2001. – № 6. – С. 23-26.
2. Приоритеты авиационных технологий: В 2 кн. / науч. ред. А.Г. Братухин. – М.: МАИ, 2004. – Кн. 1. Гл. 1-12. – 696 с.
3. Металловедение в сварке плавлением / В.Ф. Грабин. – Киев: Наук. Думка, 1982. – 416 с.
4. International Patent Application no. PCT/GB92/02203 and GB Patent Application no. 9125978.9 / Thomas W.M., Nicholas E.D., Needham J.C., Church M.G., Templesmith P., Dawes C.J. (1991).
5. Третяк, Н.Г. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов (обзор) / Н.Г. Третяк // Автоматическая сварка. – 2002. – № 7. – С. 12-21.
6. Половцев, В.А. Фрикционная сварка алюминиевых лайнеров металлокомпозитных баллонов высокого давления / В.А. Половцев, Н.В. Макаров, Г.В. Шило [и др.] // Сварочное производство. – 2007. – № 12. – С. 24-27.
7. Штрикман, М.М. Состояние и развитие процесса сварки трением линейных соединений: в 3 ч. Ч. 2. Совершенствование инструмента и технологических схем сварки / М.М. Штрикман // Сварочное производство. – 2007. – № 10. – С. 25-32.
8. Штрикман, М.М. Состояние и развитие процесса сварки трением линейных соединений: в 3 ч. Ч. 3. Промышленное применение процесса СТП / М.М. Штрикман // Технология машиностроения. – 2007. – № 11. – С. 36-45.
9. Штрикман, М.М. Состояние и развитие процесса сварки трением линейных соединений (аналитический обзор) Ч. 1 / М.М. Штрикман // Сварочное производство. – 2007. – № 9. – С. 35-40.

Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета № II-1(2) 2010

Бабкин В.Г., Черепанов А.И., Малявко А.Н.
V.G. Babkin, A.I. Cherepanov, A.N. Malyavko

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЛИТОГО СПЛАВА ДЛЯ МАЛОРАСХОДУЕМЫХ АНОДОВ АЛЮМИНИЕВЫХ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF CAST ALLOYS FOR SLOWLY OXIDIZED SACRIFICIAL ANODES IN ALLUMINIUM ELECTROLYTHIC BATHS

Бабкин Владимир Григорьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Литейное производство и обработка металлов давлением» Сибирского федерального университета, г. Красноярск. lpiomd@mail.ru
Mr. Vladimir G. Babkin – Doctor of Engineering, Head of the Department of Foundry Engineering and Metal Forming, Siberian State Federal University, city of Krasnoyarsk. lpiomd@mail.ru

Черепанов Александр Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Литейное производство и обработка металлов давлением» Сибирского федерального университета, г. Красноярск. lpiomd@mail.ru.
Mr. Alexander I. Cherepanov – Doctor of Engineering, lecturer at the Department of Foundry Engineering and Metal Forming, Siberian State Federal University, city of Krasnoyarsk. lpiomd@mail.ru

Малявко Анатолий Николаевич – магистрант Сибирского федерального университета, г. Красноярск. lpiomd@mail.ru.
Mr. Anatoly N. Malyavko – MA student of the Siberian State Federal University, city of Krasnoyarsk. l-piomd@mail.ru.

Аннотация: Объектом исследования являются литые малорасходуемые аноды из жаропрочных сплавов системы Ni-Fe-Cu. В результате исследования были выявлены факторы, влияющие на получение спецсплавов заданного химического состава и литых анодов высокого качества по плотности, жаропрочности и коррозионной стойкости. В частности, установлено, что повышенное содержание углерода в медь-железо-никелевом расплаве (более 0,2…0,4 % (мас.)) резко снижает жаропрочность сплава и способствует катастрофическому разрушению материала анода при электролизе алюминия. Тестирование 100 А образцов анодов из сплава состава 53 % Cu, 24 % Fe, 23 % Ni, микролегированного церием, в процессе электролиза алюминия показало их стабильность и коррозионную стойкость, что делает перспективным данный материал в качестве основы для дальнейшей разработки инертных анодов экологически чистого процесса электролиза алюминия.

Summary: The objects of the study are cast slowly oxidizing anodes made of heat-resisting Ni-Fe-Cu alloys. As a result of the study, factors were revealed that impact the production of specific alloys of ordered composition, and of cast anodes having good density/ heat resistance and corrosion resistance properties. In particular, it was found that increased levels of Carbon in a cupric-iron-nickel melt (more than 0,2÷0,4 % (wt.)) reduce heat resistance properties of an alloy and lead to "pest" degradation of the anodic material at electrolytic reduction of aluminum. Testing of 100 A anodic specimens made of an alloy of 53 % Cu, 24 % Fe, 23 % N microalloyed by Ce, proved their stability and corrosion resistance, which ensures a good perspective for this material if used for the development of inert anodes for environmentally friendly aluminum electrolysis.

Ключевые слова: электролиз алюминия, инертные аноды, жаропрочные сплавы, микролегирование, технология литья, микроструктура анодов, коррозионная стойкость

Key words: Aluminum electrolysis, inert anodes, heat resistance alloys, microalloying, metal casting technology, anode microstructure, corrosion resistance.

УДК 621.3.032:669.715

Поступила в редакцию 03.03.2010 г.

Бабкин В.Г., Черепанов А.И., Малявко А.Н.

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЛИТОГО СПЛАВА ДЛЯ МАЛОРАСХОДУЕМЫХ АНОДОВ АЛЮМИНИЕВЫХ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ

Объем производства алюминия намного опережает выпуск всех остальных цветных металлов. Востребованность алюминия на рынке обусловлена его уникальными физико-химическими свойствами, благодаря которым он нашел применение в электротехнике, авиа- и автостроении, транспорте, строительстве, пищевой промышленности, обороне и т.д. Жесткая конкуренция заставляет компании Запада, Китая и России совершенствовать технологию получения металла и его переработки, особое внимание при этом уделяется экологии производства алюминия.

В существующем процессе Холла-Эру применяют углеродные аноды, и в этом случае основная реакция электролиза выражается уравнением

$$\frac{1}{2}Al_2O_3 + \frac{3}{4}C = Al + \frac{3}{4}CO_2.$$

Алюминий выделяется на катоде, а кислород разряжается на аноде, реагирует с материалом анода и удаляется в виде CO_2 и CO [1]. Отходящие газы содержат также канцерогенные полициклические углеводороды (наиболее известный бензопирен), фториды углерода. Кроме того, производство исходных материалов для анодной массы (кокс, пек) и самих анодов также сопровождается значительным количеством вредных выбросов. Поэтому одной из стратегических задач в производстве алюминия электролизом является создание принципиально новых материалов, новых технологий и конструкций.

Самым значимым и сложным представляется вопрос разработки инертных (малорасходуемых) анодов.

Основная реакция электролиза с инертным анодом имеет вид [2]

$$\frac{1}{2}Al_2O_3 \rightarrow Al + \frac{3}{4}O_2.$$

Выделяющийся на аноде кислород удаляется в атмосферу или может быть утилизирован. Такой процесс не только лишен экологической опасности в своей основной части, но и, как показывают анализы, способен повысить экономическую эффективность производства.

По оценке Министерства энергетики США переход на инертные аноды может быть реализован, если качество инертных материалов будет отвечать следующим основным требованиям:

- скорость износа (при плотности тока 0,8 $^{А}/_{см^2}$) менее 1 см/г;
- увеличение напряжения поляризации не более 0,5 В;
- падение напряжения в анодном узле не более чем при использовании угольного анода;
- сортность получаемого алюминия не ниже марки А7.

Хотя до настоящего времени нет твердых доказательств о реализации разработки достаточно стойких и полностью удовлетворяющих этим требованиям материалов, патенты и публикации показывают, что компании Alcoa, Novalco, РУСАЛ и другие продолжают проявлять интерес к разработке инертных анодов для алюминиевых электролизеров. В частности, сообщается, что металлический анод (Вероника), где главными компонентами являются железо и никель, а добавками в сплав - Cu, Al, Ti, Y, Mn, Si, прошел промышленные испытания на электролизёре с силой тока 20 кА. Анод может служить 6 мес. При этом расход анода на тонну алюминия составляет около 8 кг. Внедрение такого анода обеспечивает снижение себестоимости на 20 % (экономия на материале – 8 %, на снижении расхода энергии – 2,5 %, на повышении выхода по току – 1,5 %, на увеличении срока службы – 2,5 %, на неуплате налога на выбросы – 4 %).

Такого рода эксперименты на протяжении ряда лет проводятся в России (Институты металлургии и материаловедения РАН, МГУ, Институт электрохимии УНЦ РАН и др.) при финансовой поддержке компании РУСАЛ.

Патенты и публикации показывают, что исследования по малорасходуемым анодам были сосредоточены первоначально на металлах, затем на оксидах и их соединениях, позднее – на металло-оксидных композитах и, наконец, – на жаропрочных сплавах, используемых для литья анодов.

В настоящей работе исследуются технологические особенности литья металлических анодов системы Cu-Ni-Fe, а также факторы, влияющие на их качество.

Плавки проводили в печи Таммана в алундовом или в графитовом тиглях. Графитовый тигель применяли для насыщения расплава углеродом. В тигель загружали основные компоненты Cu, Ni, Fe и после расплавления вводили легирующие, модифицирующие добавки (Al, Ce) в соответствии с программой эксперимента. Ce вводили в виде мишметалла с содержанием Ce 50 % в количестве 0,03-0,05 % лигатуры от веса плавки. Алюминий вводили в виде лигатуры Ni-Al50.

При достижении перегрева около 100 °С над линией ликвидус сплав разливали в кокиля, специально изготовленные для анодов, размером ø 10x60 (10 А) и 100x100x4 (100 А). Плотность отливок контролировали выборочной фрезеровкой по сечению анодов (см. рис. 1).

Исследование структуры материала образцов проводилось на поперечных травленых микрошлифах. Реактив для травления: азотная кислота - 50 см^3; уксусная кислота - 50 см^3. Травитель наносили на поверхность шлифа и после некоторой выдержки промывали в проточной воде.

Интервал кристаллизации сплавов определяли на дифференциальном сканирующем калориметре STA 449 C (фирмы NETZSCH). Для определения формообразующих размеров кокиля расчет линейной усадки и коэффициента термического линейного расширения проводили аналитическим методом [3]. Стойкость полученных анодов определяли в лаборатории НТЦ РУСАЛ выдержкой в среде электролита под воздействием тока 10 А и 100 А.

а) б) в)

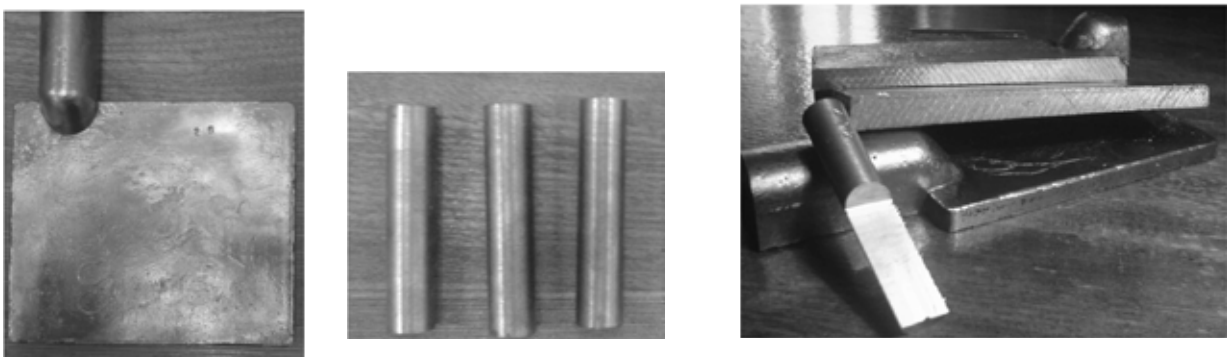


Рис. 1. Аноды для испытаний в электролизерах:

Составы сплавов для исследований и результаты испытаний образцов анодов на опытном электролизере при силе тока 200-400 А приведены в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав и результаты испытаний образцов анодов

Номер образца	C	Fe	Cu	Ni	Al	Sn	Твердость HB	Состояние после электролиза
2.4;2.12	0,45	23,15	54,3	22,1			110,0	+
3.1	0,04	26,08	9,69	64,36			95,5	-
3.2	1,48	26,21	9,32	63,0			143	-
3.3	0,07	11,60	8,93	73,84	5,41		229	-
3.4	0,42	23,30	51,83	24,25			109	+
3.5	1,18	30,16	38,68	29,99			149	-
3.6	2,13	58	17,91	20,16		1,8	131	-
Примечание - (+) – образец выдержал испытание более 100 ч; (-) – образец разрушился до окончания испытаний								

Вначале изучали влияние химического состава сплава на электрохимическую стойкость анодов в среде электролита. Как видно из табл. 1, содержание углерода выше 0,45 % негативно влияет на коррозионную стойкость. Образцы 3.5, 3.2, 3.6 имели содержание углерода 1,18 %; 1,48 %; 2,13 % соответственно. На рис. 2 показаны результаты электрохимических испытаний образцов анодов 10 А. Как отмечено выше, в сплаве образцов на основе железа, легированного Cu и Ni (образец 3.6), содержание углерода составляет 2,13 %. Перлитная составляющая данной стали (эвтектоид) (см. рис. 3, е) имеет температуру плавления 1147 ^{0}С, а температура солидус системы Fe-Ni-Cu-C заданного состава значительно ниже и приближается к температуре электролита в электрохимической ячейке.

Образец 3.6 имеет структуру, близкую к структуре жаропрочной стали с интерметаллидным упрочнением. Однако содержание углерода в таких сталях не должно превышать 0,1 %. В нашем случае в результате приготовления высокожелезистого сплава (58 % Fe) в графитовом тигле содержание углерода в сплаве достигло 2,13 %. В структуре такого сплава обнаружен перлит, а избыточная часть углерода представлена в структуре графитом. Естественно, такой сплав не является жаропрочным из-за высокой растворимости углерода в железе, что резко снижает температуру солидуса и повышает диффузионную подвижность атомов при высоких температурах. В результате испытания образцов 10 А анодов произошло их подплавление и увеличение объема, что привело к образованию трещин, налипанию электролита на электрод и его катастрофическому разрушению.

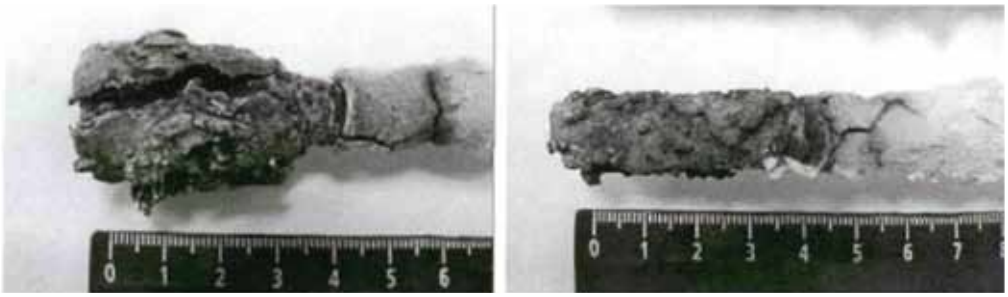


Рис. 2. Деградация цилиндрических 10 А анодов в процессе испытания (образец 3.6)

Известно, что основное упрочнение жаропрочного сплава системы 73Ni-11Fe-10Cu-6Al обеспечивает интерметаллидная γ'-фаза типа Ni_3Al. Введение алюминия в количестве 5,4 % в нашем случае не дало ожидаемого результата. Микроструктура сплава приведена на рис. 3, в.

Особенностью всех образцов является дендритное строение сплавов, при этом наблюдается дендритная ликвация, характерная для литого состояния. Сплавы на никелевой основе (3.1, 3.2, 3.3, см. табл. 1) представляют собой (матричный) γ –твердый раствор, а также γ'-фазу, обеспечивающую основное упрочнение сплавов с высоким содержанием никеля. В частности, γ'-фаза (образец 3.3) представляет собой когерентное с γ–матрицей интерметаллическое соединение Ni_3Al, имеющее температуру плавления 1385 ^{0}С. В структуре образцов из сплавов с повышенным содержанием меди (образец 3.4, 3.5) имеется *a*–твердый раствор сложного состава.

Наилучшие результаты электрохимической стойкости показали сплавы системы Fe24 – Cu53 – Ni23, модифицированные церием рис. 4. Известно, что церий не только измельчает зерно, но и распределяется в сплаве преимущественно в приграничных участках. Поэтому введение в расплав малых количеств церия оказывает положительное влияние на жаропрочность сплава. Церий незначительно растворяется в сплавах на основе Ni и Fe и концентрируется в приграничных объемах, замедляя приграничную диффузию. Церий имеет большое сродство к кислороду и образует тугоплавкие оксиды: температура плавления CeO_2 - 3000 К, а Ce_2O_3 - 1963 К, а это очень важно в условиях выделения кислорода при электролизе алюминия с малорасходуемыми анодами.

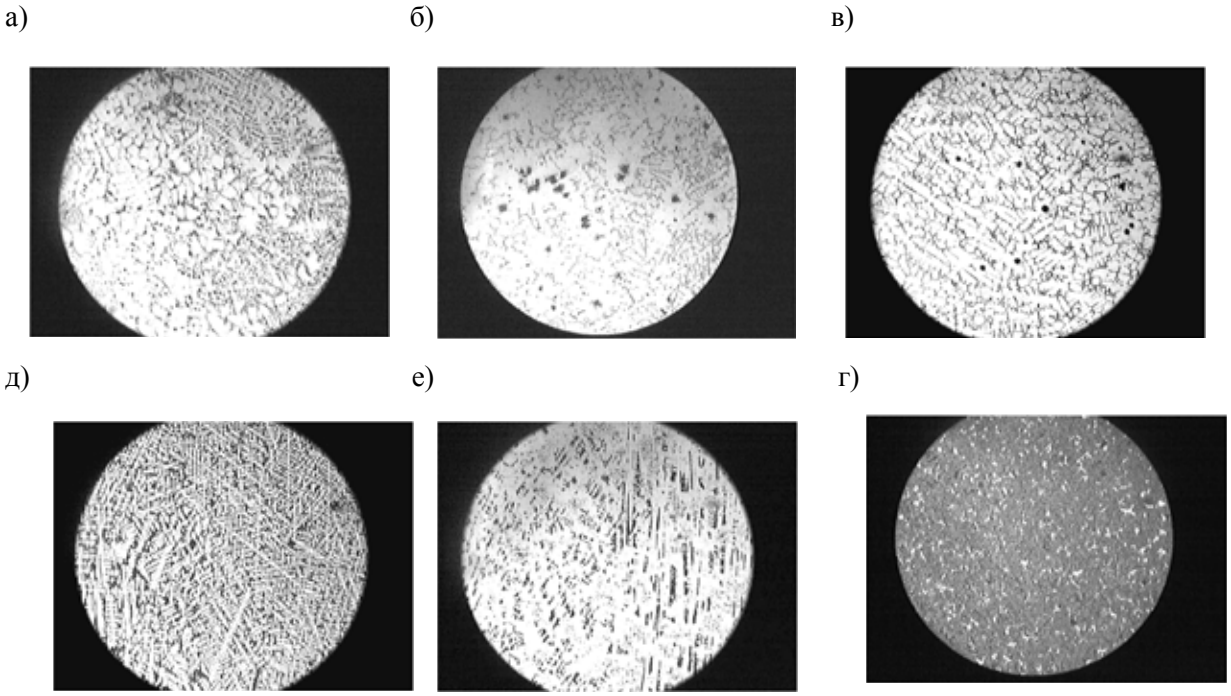


Рис. 3. Микроструктура образцов анодов различного химического и фазового состава:
а – образец 3.1 γ-твёрдый раствор + включения γ′-фазы; б – образец 3.2 γ-твёрдый раствор дендритного строения + выделения второй фазы + включения нерастворившегося компонента; в – образец 3.3 γ-твёрдый раствор дендритного строения + эвтектика + округлые инородные включения; г – образец 3.4 дендритные зёрна α-твёрдого раствора сложного состава + эвтектоид; д – образец 3.5 дендритные зёрна α-твёрдого раствора + включения округлой формы; е – образец 3.6 перлит + эвтектика + графит

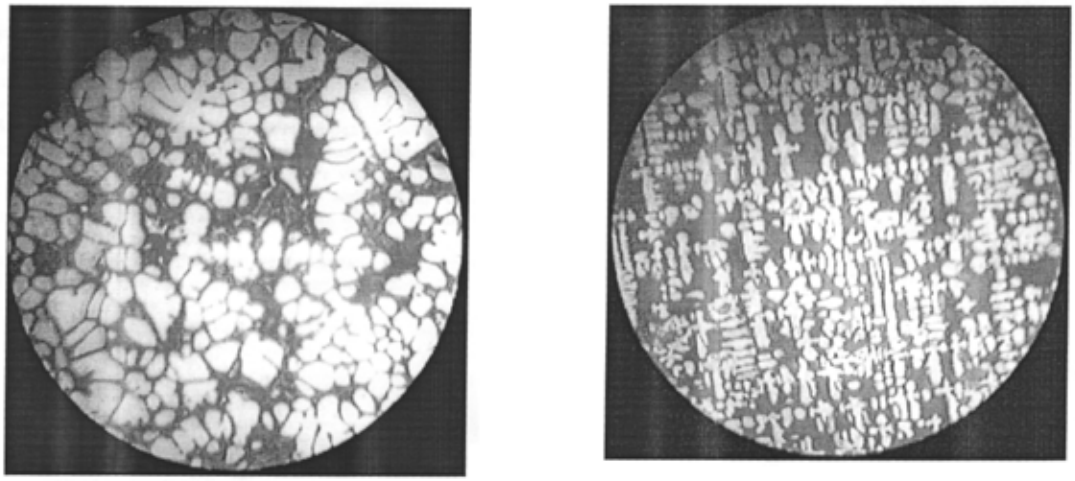
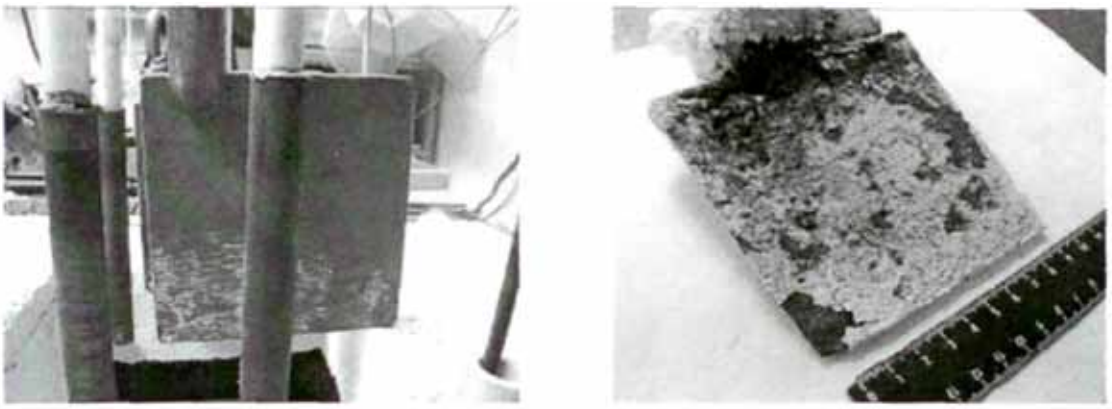


Рис. 4. Микроструктура образцов: а – немодифицированного (плавка 2.12);
б – модифицированного Се (плавка 2.4).

Электрохимические исследования проводились в НТЦ РУСАЛ. Для лабораторных исследований были взяты плоские и цилиндрические образцы для электрохимической ячейки на 100 и 10 А соответственно. На рис. 5 показано электрохимическое поведение образцов анода на 100 А и их состояние до и после эксперимента. Как видно из рисунков, потенциал анода в изученных условиях и интервале времени стабилен и не достигает критического значения, когда начинается катастрофически быстрое разрушение материала.

а) б)



в)

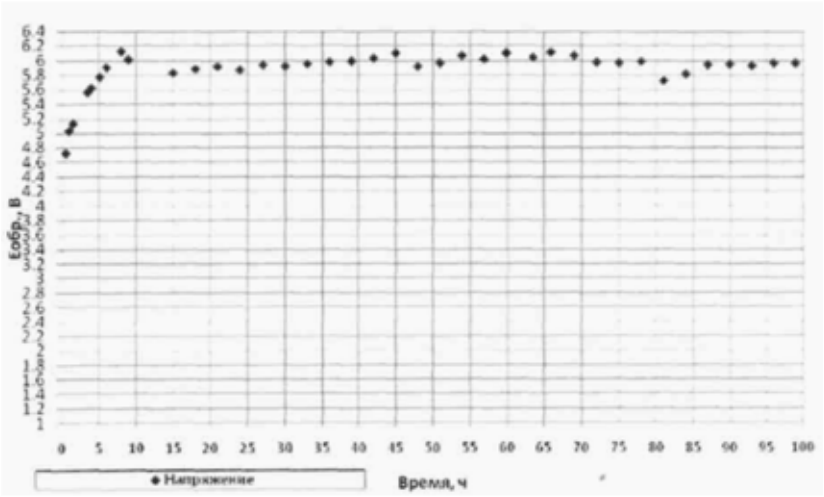


Рис. 5. Динамика изменения состояния и напряжения (в) в процессе электролиза анода до (а) и после (б) эксперимента, образец 3.11, 100 А, состав: 53 Cu; 24 Fe; 23Ni; 0.02 Ce

Микроскопические исследования, проведенные в ИЦМиМ СФУ под руководством В.С. Биронта, показали, что разрушение поверхности при электролизе идет с образованием зоны диффузионно-канальной пористости, как и других образцов из сплавов системы Cu-Fe-Ni (см. рис. 6). Особенностью деградационных процессов, выявляемых на рассматриваемом образце, является плоский фронт распространения зоны деградации вглубь образца, что может быть обусловлено высокой степенью дисперсности дендритных кристаллов и чередующихся с ними междендритных пространств. Другой особенностью является относительно одинаковая толщина зоны деградации вдоль всей исследованной поверхности образца (порядка 200 – 250 мкм). Имеющие место поры внутри металлической части анода, даже вблизи фронта распространения деградационной зоны, не проявляют какого-либо ускоряющего влияния на деградационные изменения в структуре. В пределах исследованной поверхности анода не выявлено грубых трещин внутри зоны деградации. Все эти особенности строения зоны коррозионного разрушения можно рассматривать как положительные факторы технологии получения анодов с ускоренной кристаллизацией (заливка жидкого металла в металлическую форму).

а) б) в) г)

Рис. 6. Микроструктура слоя деградации плоского образца из сплава 3.4:
а, б, в – снимки с последовательным увеличением масштаба;
в, г – снимки одного и того же места:
в – в отраженном свете; г – в режиме DIC

Таким образом, испытания плоских анодов из сплавов 53Cu-24Fe-23Ni с содержанием углерода не более 0,2-0,4 % в процессе электролиза на лабораторной установке показали удовлетворительную коррозионную стойкость и высокую электрохимическую стабильность, в то же время образцы анодов из сплавов с повышенным содержанием железа (60-65 %) и высоким содержанием углерода (до 2 %) имели низкую коррозионную стойкость. В результате исследований установлено, что сплавы с повышенным содержанием меди (53 %) и равным соотношением Fe и Ni могут служить основой дальнейшей разработки малорасходуемых анодов для экологически чистого процесса электролиза алюминия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник металлурга по цветным металлам. Производство алюминия / А.А. Костюков, И.Г. Киль, В.П. Никифоров и др. – М.: Металлургия, 1971. – 560 с.
2. Zhang H., De Nora., Sekhar J.A. Materials used in Hall-Heroult cell for aluminum production. TMS, 1994. 108p. (Материалы, используемые в производстве алюминия методом Холла-Эру / Пер. с англ. П.В. Полякова.
3. Черепанов, А.И. Расчет литейной усадки алюминиевых сплавов и композиционных материалов / А.И.Черепанов, В.Г. Бабкин // Технология машиностроения. - 2008. - № 9. - С. 12-14.

Муравьёв В.И., Физулаков Р.А., Логвинов О.П.
V.I. Muravyev, R.A. Fizulakov, O.P. Logvinov

СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ГАЗОЛАЗЕРНОМ РАСКРОЕ

STRUCTURAL CHANGES IN THE SURFACE LAYER OF TITANIUM ALLOYS AT GAS LASER CUTTING

Физулаков Роман Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, начальник научно-практической лаборатории конструкционных материалов ОАО «КнААПО» (г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kmtnm@knastu.ru.
Mr. Roman A. Fizulakov – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Research and Production Lab for Construction Materials, JSC “KnAAPO”. E-mail: kmtnm@knastu.ru.

Муравьёв Василий Илларионович – доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник ГОУВПО «КнАГТУ» (г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kmtnm@knastu.ru.
Mr.Vassily I.Muravyev – Doctor in Engineering, Professor, Chief Researcher at Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kmtnm@knastu.ru.

Логвинов Олег Петрович – механик отдела главного металлурга ОАО «КнААПО», аспирант ГОУВПО «КнАГТУ» (г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kmtnm@knastu.ru.
Mr.Oleg P. Logvinov – mechanic engineer of the Department of Chief Metallurgist, JSC “KnAAPO”. E-mail: kmtnm@knastu.ru.

Аннотация: В работе приведены результаты всесторонних исследований зоны реза титановых сплавов, получаемого газолазерным раскроем в среде технического азота и аргона высшей очистки. Приведён сравнительный анализ результатов применения этих двух газов с точки зрения качества и свойств получаемого реза, а также физики самого процесса резки металла. Проведён обширный металлографический анализ.

Summary: The paper presents the results of a comprehensive research of the cut zone in titanic alloys, produced by gas-laser cutting in the environment of engineering nitrogen and extra pure argon. A comparative analysis of the results of application of these two gases from the point of view of quality and properties of the cut is provided, and also of the physics of the metal cutting process. An extensive metallographic analysis is presented.

Ключевые слова: газолазерная резка, титановый сплав, нитрид титана, зона термического влияния.

Keywords: gas laser cutting, titanium alloy, titanium nitride, heat affected zone.

УДК 669.295:621.9.048.7

Введение

В настоящее время широко применяются методы резки металла с использованием высококонцентрированных источников энергии [1]. Одним из перспективных методов является способ газолазерной резки (ГЛР), основанный на механизме разрушения металлов плавлением или испарением с выдуванием продуктов расплава из зоны реза различными газами.

Процессы ГЛР титановых сплавов мало изучены и касаются в основном резки с использованием инертных газов [1]. Освещение вопроса применения азота в качестве вспомогательного газа при ГЛР касается большей степени негативных сторон его применения. В

Поступила в редакцию 28.12.2010 г.

целом процесс ГЛР в среде технического азота недостаточно изучен и требует детального освещения.

В настоящей работе приведены результаты исследования процессов формирования поверхности реза при газолазерном раскрое листовых заготовок из титановых сплавов с использованием в качестве вспомогательного газа технического азота и аргона высшей очистки.

Методика проведения исследований

Раскрой образцов (пластин) из листовых заготовок из титанового сплава ВТ20 проводили на лазерной установке BYSTRONIC – BYSTAR 3015 с использованием технологического газа – азота заводского производства класса 4,5, а также высокой чистоты инертного газа аргона. Мощность лазерной установки составляла 1800 Вт, а образцы изготавливали при 80 % от ее максимальной мощности. Давление газа на выходе 13×10^5 Па. При раскрое образцов параметр мощности оставался неизменным. Варьировали такие параметры процесса, как скорость перемещения лазерного луча (скорость раскроя), толщину образцов (1,8 – 3 мм), вид применяемого газа.

После раскроя образцов проводили макро- и микроанализ поверхности реза и зоны материала образцов, прилегающей к границе реза. Кроме того, измеряли микротвердость по глубине зоны реза прибором ПМТ-3М, шероховатость R_z на профилометре, определяли геометрические параметры реза и видимые изменения в зоне реза по методике, приведённой в работе [2]. Исследование химического состава поверхности образцов проводили на мобильном оптико-эмиссионном анализаторе «ARK – met» фирмы «PPM – SYSTEM», кроме того, определение легких элементов – на растровом электронном микроскопе JSM-5600 фирмы «JEOL» (Япония) с волновым микрозондом. Примеси газов в образцах анализировали и определяли следующими методами: кислород, азот – на газоанализаторе ONH-2000 (фирма ELTRA, пр-во Германия); водород – спектральным методом с применением низковольтного и импульсного разряда методом 3-х эталонов на спектрографе ИСП-51 в соответствии с ГОСТ 90034-81.

Результаты исследований

Поверхность металла вдоль реза после ГЛР, как с использованием в качестве вспомогательного газа аргона, так и азота, имеет цвета побежалости, практически не различающиеся между собой (см. рис. 1).

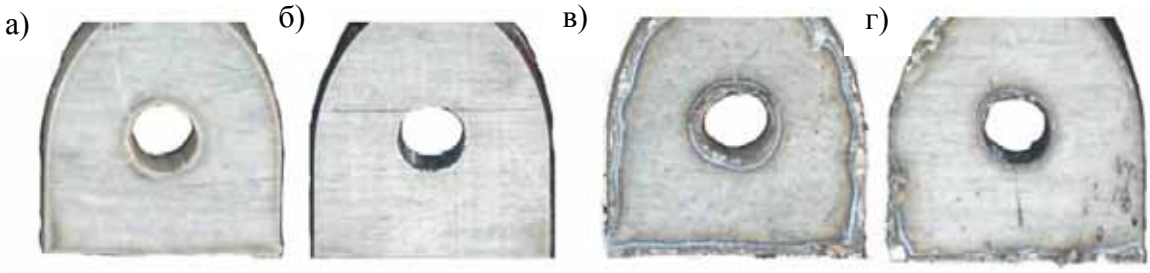


Рис. 1. Образцы сплава ВТ20 после ГЛР с использованием газа: азота (а, в); аргона (б, г). а, б – вход луча; в, г – выход луча; х1,5

На входе лазерного луча изменение цвета поверхности на образцах после ГЛР и в азоте, и в аргоне практически не заметны. На выходе лазерного луча для ГЛР образцов, как в аргоне, так и в азоте, выглядят одинаково следы образования окисной пленки по глубине распространения температурного поля. По цветам окисной пленки можно судить о распространении температуры вглубь образца в процессе реза.

Поверхность реза имеет характерные для ГЛР бороздки, имеющие различную конфигурацию у образцов, раскроенных в среде азота и аргона.

Общим для обоих видов ГЛР образцов является то, что на поверхности реза можно выделить три основные зоны, отличающиеся друг от друга различным наклоном к направлению обработки и шероховатостью:

I – зона, как видно из рис. 2, характеризуется непрерывными бороздками малой ширины при использовании азота *(а*, *в*) и прерывистыми – при использовании аргона (*б*, *г*). Значительный наклон бороздок в направлении резки наблюдается у образцов ГЛР в азоте, а у образцов ГЛР в аргоне наклон еле заметен;

II – зона бороздок формируется для ГЛР образцов в азоте непрерывно, а в аргоне прерывисто; наклон бороздок уменьшается для ГЛР образцов в азоте, а для ГЛР в аргоне практически не меняется;

III – зона характеризуется большой шириной бороздок у образцов после ГЛР как в азоте, так и в аргоне. Наклон бороздок практически не меняется;

IV – зона характеризуется распространением бороздок на удаляемый металл – грат с более насыщенным золотистым оттенком для образцов ГЛР в азоте, а для образцов ГЛР в аргоне в этой зоне закристаллизовавшиеся окисленные частицы расплавленного металла.

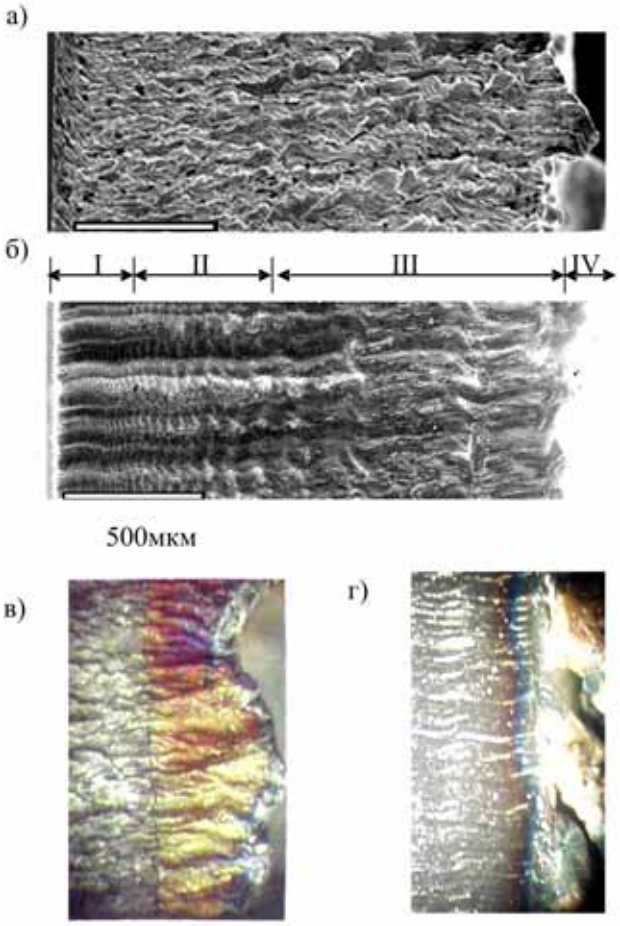


Рис. 2. Вид регулярного расположения бороздок на поверхности реза образцов сплава ВТ20 после ГЛР с использованием вспомогательного газа азота (а, в), аргона (б, г): I – зона мелких бороздок на входе лазерного луча; II – зона бороздок средней величины; III – зона укрупненных бороздок на входе лазерного луча; IV – грат на выходе лазерного луча

Образующийся на нижней кромке поверхности реза грат (вытесненный вспомогательным газом закристаллизовавшийся расплавленный металл) легко удаляется при оптимальных режимах ГЛР. При отклонении от этих режимов требуется механическое воздействие для его удаления, вплоть до фрезерования кромки.

Частицы грата (см. рис. 3, *а*), образовавшиеся в процессе ГЛР образцов, имеют со стороны реза продолжение бороздок и насыщенный светло-жёлтый цвет, характерный для нитрида титана. Обратная сторона частиц покрыта белым налетом, похожим на окись титана TiO_2, округлая, каплеобразная, характерная для закристаллизовавшегося расплава металла при выдувании из канала реза вспомогательным газом. Перемычка, на которой держалась частица, очень тонкая (<< 0,01 мм) с характерным кристаллическим строением и металлическим блеском.

У частиц грата (см. рис. 3, *б*), образовавшихся в процессе ГЛР образцов в аргоне, в отличие от частиц, образованных в азоте, отсутствуют бороздки. Частицы имеют четкую округлую, каплеобразную форму, покрыты белым налетом оксидной пленки. Как и в предыдущем случае, перемычка, на которой держалась частица, очень тонкая с характерным кристаллическим строением и металлическим блеском.

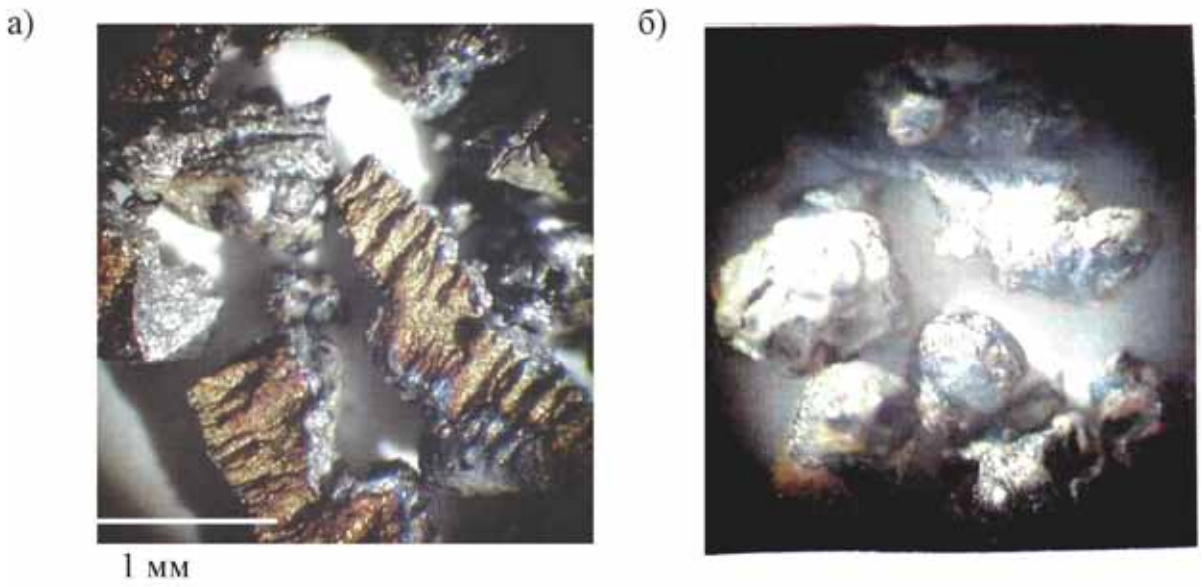


Рис. 3. Удаляемый металл в виде закристаллизовавшихся частиц (грат) на нижней кромке образцов после ГЛР с использованием вспомогательного газа: а – азота; б – аргона

Из оценки геометрических параметров качества поверхности образцов из сплава ВТ20 после ГЛР выявлено, что, как при использовании азота, так и при использовании аргона, наиболее важными параметрами являются ширина изменяемого слоя h_0 (зона термического влияния) и высота грата h_1 (см. табл. 1).

Оба эти параметра уменьшаются с увеличением скорости резания. Следовательно, увеличение скорости резания приводит к улучшению качества реза с точки зрения его геометрии. По-видимому, это связано с тем, что при увеличении скорости резания металл перегревается в меньшем объеме, что приводит к уменьшению толщины измененного слоя. Вероятно, по той же причине предотвращается увеличение грата на выходе реза, но чрезмерное ее завышение может привести к частичному непрорезу из-за неоднородности металла, или по другим причинам, поэтому скорость раскроя нужно выбирать с некоторым запасом от максимальной, чтобы рез был стабильным.

Таблица 1

Геометрические параметры реза пластин титановых сплавов

Вспомогательный газ	Номер пластины	Толщина пластины, мм	Скорость резания, мм/мин	Ширина реза		Высота грата h_1	Ширина зоны окисления на выходе	Высота выступов на поверхности реза		
				на входе луча b_1	на выходе луча b_2			R_z	$R_{z\,min}$	$R_{z\,max}$
				мм				мкм		
Азот	4	2,0	2500	0,50	0,47	1,67	0,92	8,05	6,6	9,5
	5	2,0	3000	0,50	0,33	0,77	0,53	10,15	8,7	11,6
	6	2,0	3500	0,50	0,38	0,67	0,45	10,40	9,0	11,8
	7	2,0	4000	0,55	0,38	0,67	0,42	10,20	8,7	11,7
	3	1,2	2500	0,53	0,35	0,57	0,43	8,85	6,5	11,2
	4	2,0	2500	0,50	0,47	1,67	0,92	8,05	6,6	9,5
	1	2,5	2500	0,55	0,42	0,92	0,67	10,85	8,9	12,8
Аргон	9	2,0	2500	0,48	0,44	0,57	0,36	8,0	6,3	9,8
	10	2,0	2000	0,50	0,45	0,72	0,42	10,2	8,5	12,1

Обсуждение результатов исследования

Известно [3], что использование кислорода при высоких плотностях мощности для резки титана даёт отрицательный результат из-за того, что теплота, выделяющаяся от реакции горения титана в струе кислорода, переводит в автогенный неуправляемый режим резки, ухудшающий качество поверхности реза (шероховатость, ширина реза и т.д.). Перевод в управляемый режим резки титана в кислороде требует либо слишком высокой, либо слишком малой скорости резки, что ограничивает толщину разрезаемого металла. Такие же толщины резки титана достигаются, правда, с обеспечением устойчивого процесса резки, с использованием в качестве вспомогательного инертного газа аргона.

Известно [4], что процесс взаимодействия титана с азотом имеет много общего с процессом взаимодействия его с кислородом:

$$Ti + O_2 \leftrightarrow TiO_2,$$
$$2Ti + N_2 \leftrightarrow 2TiN.$$

Как для кислорода, так и для азота уже при ничтожно малом давлении создаются термодинамические возможности образования оксидов и нитридов на поверхности титана.

И, тем не менее, существуют различия. Соединение TiN – одно из самых устойчивых при высоких температурах, температура плавления составляет (2950±30) °С, намного выше температуры плавления титана (1668 °С) и температуры плавления оксидов (Ti_2O_2 – 1640 °С). Диффузионная подвижность азота в титане меньше, чем кислорода. Эти отличительные признаки способствуют управляемому режиму резки титана в среде азота.

В работе [3] показано, что при ГЛР титана в кислороде нагревание металла излучением в режиме нарастания оксидной плёнки не может привести к воспламенению, так как по мере роста слоя оксида и температуры, не смотря на увеличение скорости окисления, относительный вклад теплоты реакции в общий тепловой баланс уменьшается. При достижении

температуры плавления оксида, особенно с поддувом кислорода, струя вытесняет жидкий оксид из зоны облучения и практически скачком переводит реакцию в новый режим с предельно высокой скоростью окисления и большим тепловым эффектом (непосредственный контакт кислорода с нагретым металлом), в результате чего металл воспламеняется, горит и переходит в автогенный неуправляемый режим резания.

В случае ГЛР титана в среде азота образуется устойчивый с высокой температурой плавления нитрид титана, который во все время плавления металла предохраняет от непосредственного контакта струю азота с расплавом металла и тем самым обеспечивает устойчивый управляемый режим резки, когда титан плавится, и газовая струя азота удаляет расплав из зоны реза. Этим объясняется улучшение качества поверхности реза, увеличение толщины разрезаемого металла, как видно из данных рис. 1, 2 и табл. 1. Наглядным примером служат бороздки на поверхности не только реза, но и грата (см. рис. 2, 3).

Из сказанного следует, что закристаллизовавшийся расплавленный металл в процессе ГЛР образцов титана, как в среде азота, так и в среде аргона, в большей степени сохранился в тонкой перемычке, на которой держатся частицы грата, поскольку в открывшийся канал свободно устремляется вспомогательный газ.

Поскольку длительность локального нагрева участка металла до температуры плавления под воздействием лазерного излучения составляет $\tau_и > 10^{-7}$ с и примерно соизмерима со временем охлаждения канала реза до температуры окружающей среды, есть все основания полагать, что на поверхности реза формируется аморфная структура.

По данным [5] у большинства металлов IV группы периодической системы Д.И. Менделеева при быстром охлаждении расплавов идёт формирование аморфных сплавов, особенно это относится к титану, цирконию и гафнию. Кроме того, там же [5] показано, что изделия с аморфной структурой, полученные непосредственно из расплава, представляется возможным подвергать дополнительной, прежде всего, термической обработке с целью создания в них особых структур: квазикристаллических и нанокристаллических, а также их комбинаций между собой и с аморфной матрицей, тем более, что термическая обработка, позволяющая создавать наноматериалы на основе массивных аморфных сплавов, определяется температурой их кристаллизации. Отжиг при температуре, весьма близкой к температуре кристаллизации, приводит к структурному переходу аморфного сплава в квазикристаллическое и наноструктурное состояние.

С поверхности реза в процессе ГЛР образца титана в зоне разделения идет процесс отрыва, отделения жидкой фазы от твердой.

Как известно, плавление твердого тела и переход его в жидкое состояние представляют собой нарушение дальних связей в решетке, которая теряет устойчивость при увеличении межатомных состояний, вызванном тепловым расширением. Обычно плавление твердого тела происходит при такой температуре $T_{пл}$, когда амплитуда тепловых колебаний атомов относительно положения равновесия достигает величины примерно 0,2 – 0,3 межатомного расстояния.

Это позволяет предположить, что процесс отделения жидкой фазы от твердой будет сопровождаться вытягиванием жидкой фазы в виде пленки до определенной толщины, способной сопротивляться давлению газовой струи, и затем произойдет её разрушение, отделение от жидкой фазы, причём с охлаждением со сверхкритической скоростью. Формирование такой пленки на поверхности реза титанового сплава ВТ20 после ГЛР в среде азота показано на рис. 4, *а*, *в*, из которого видно, что чем медленнее скорость резки, тем большей ширины вытягиваемая пленка.

Сформированная в таких условиях аморфная структура поверхности реза показана на рис. 4, *б*, *г*, *д*, т.е. при сверхвысокой скорости охлаждения не успевают в вытягиваемой расплавленной пленке вырастать центры кристаллизации и металл затвердевает как стеклообразная масса, в которой существует некий ближний порядок.

По-другому выглядит структура поверхности реза после ГЛР образцов в среде аргона, как видно из рис. 4, *е*, *ж*, *з*. Расплавленный металл вытесняется из зоны реза инертным газом низкой теплопроводности аргоном без образования промежуточной твёрдой фазы, и вытягиваемая плёнка выглядит в виде сглаженных незаострённых складок с формированием крупных зёрен закристаллизовавшегося расплава.

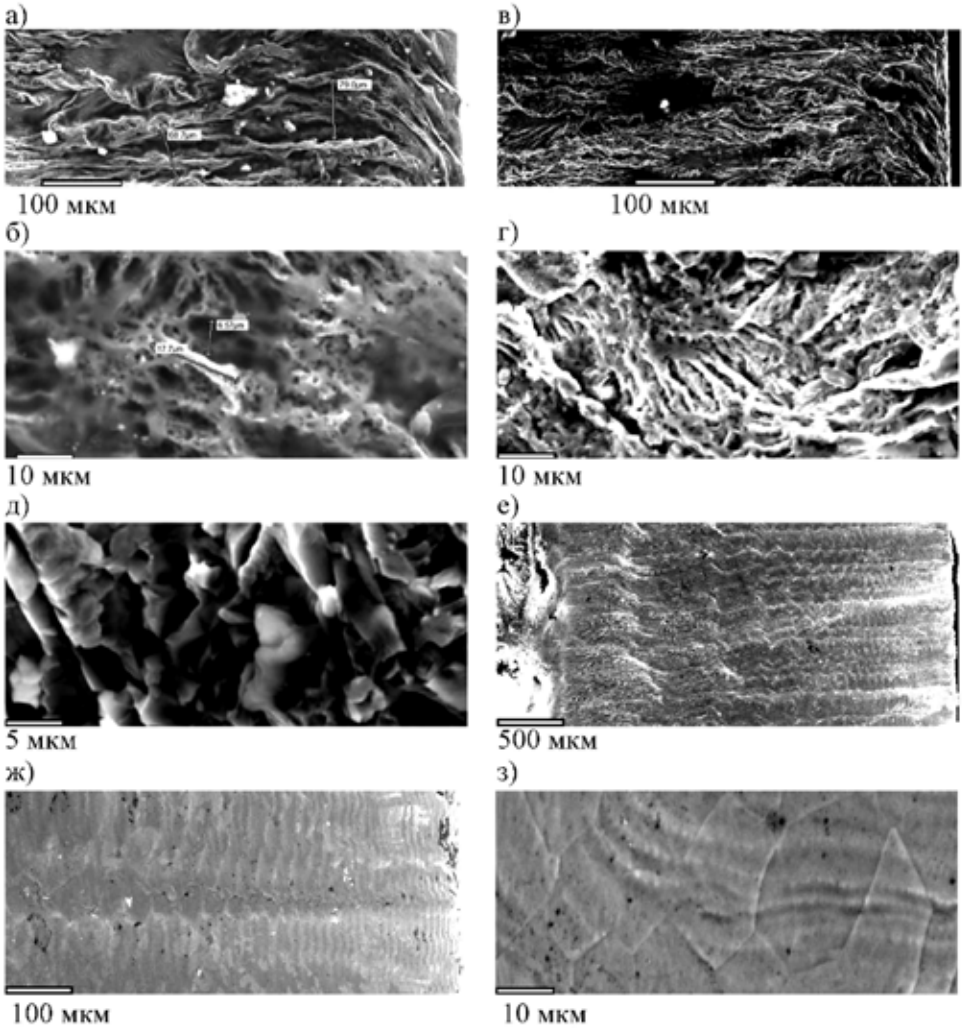


Рис. 4. Формирование макроструктуры поверхности реза после ГЛР образцов из сплава ВТ20 с использованием вспомогательного газа азота (а, б, в, г, д), аргона (е, ж, з) при скорости резки 2500 мм/мин (а, б, д, е, ж, з) и 4000 мм/мин (в, г)

Возможен процесс термической обработки плёнок с аморфной структурой на поверхности реза, поскольку при воздействии лазерного луча происходит последовательное образование нового и нового канала, и при этом в интервале температур кристаллизации осуществляется кратковременное тепловое воздействие на пленку предыдущего канала. Действительно в этих пленках создаются квазикристаллические и нанокристаллические структуры, как показано на рис. 5, 6, из которых видно, что структура пленки смешанная: аморфная, кристаллическая и нанокристаллическая (фрагменты нанокристаллического мартенсита достигают значительных размеров), особенно на выходе лазерного луча.

На поверхности реза образцов сплава ВТ20 после ГЛР в среде азота образуется тонкая (1 – 2 мкм) нитридная пленка, покрывающая зону (3 – 7 мкм) со смешанной структурой (аморфная, кристаллическая, фрагменты нанокристаллического мартенсита) закристаллизовавшегося металла в момент разделения жидкой и твердой фаз при высокой скорости охлаждения и последующего кратковременного нагрева и охлаждения, которая переходит в зону термического влияния (ЗТВ 35 – 40 мкм). ЗТВ имеет сложное многослойное строение из-за существенного различия температурного воздействия от температуры плавления (1668 °С) до окружающей (25 °С) (см. рис. 6).

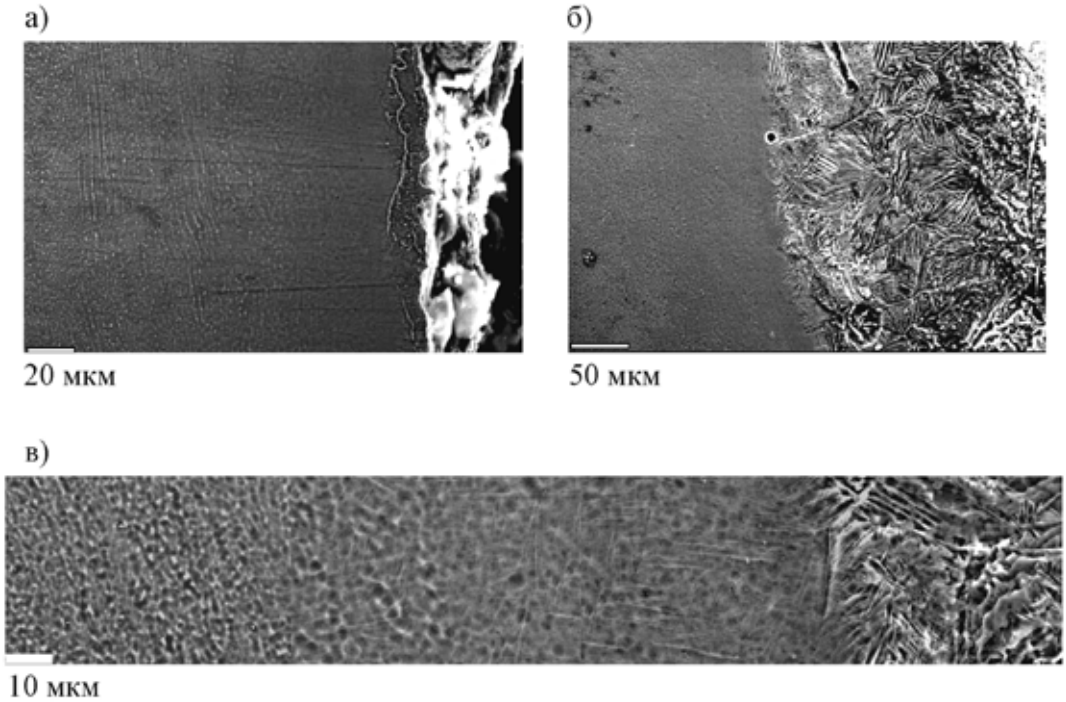


Рис. 5. Микроструктура в зоне выхода лазерного луча сплава ВТ20 после ГЛР в среде азота: а – поперечный срез; б, в – срез под углом 35°

В зоне (см. рис. 6, *в*), прилегающей к зоне со смешанной структурой, образуется игольчатая структура, ориентированная в пределах зерна. Размеры игл в верхней части мелкие (7 – 10 мкм), затем переходят в крупные (20 – 25 мкм) и вновь уменьшаются (5 – 7 мкм) и исчезают при переходе к исходной структуре. Общая глубина ЗТВ составляет 35 – 40 мкм.

Подобная структура образуется на поверхности реза образцов сплава ВТ20 в среде аргона (см. рис. 6) высокой чистоты, только на поверхности вместо нитридной пленки образуется оксидная пленка, в момент охлаждения до комнатной температуры обеспечивающая светлую блестящую поверхность с металлическим блеском.

На выходе лазерного луча в зоне, прилегающей к зоне со смешанной структурой, игольчатая структура не образуется, а в зоне выхода лазерного луча чётко видна образованная игольчатая структура, ориентированная в пределах зерна. Как и в случае ГЛР в среде азота, в аргоне из сплава ВТ20 размеры игл (см. рис. 6, *в*) в верхней части мелкие (7 – 10 мкм), затем переходят в более крупные (20 – 25 мкм) и вновь уменьшаются (5 – 7 мкм) и исчезают при переходе к исходной структуре. Общая глубина ЗТВ составляет 35 – 45 мкм.

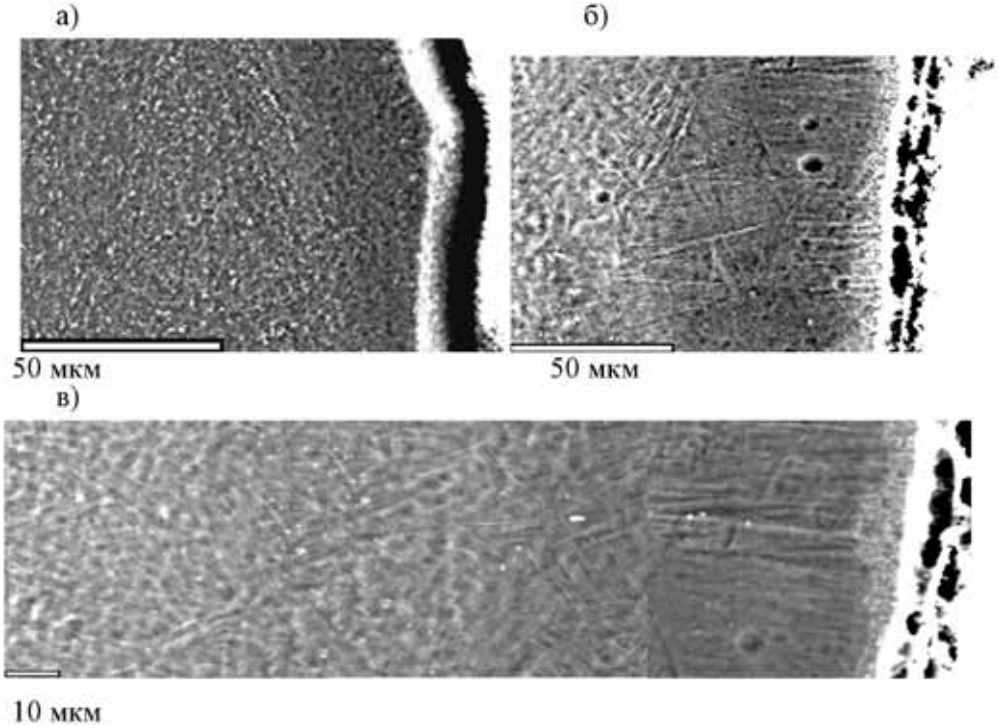


Рис. 6. Микроструктура сплава ВТ20 после ГЛР в среде аргона:
а – в зоне входа луча, поперечный срез; б – в зоне выхода луча,
поперечный срез; в – в зоне выхода луча, срез под углом 30°

Образование смешанной структуры в поверхностном слое (аморфная, кристаллическая, нанокристаллическая) и сложной структуры с многослойным строением ЗТВ в образцах сплава ВТ20 после ГЛР, как в среде азота, так и в среде аргона, приводит к существенному изменению микротвёрдости (см. рис. 7, 8). Различия в значениях распределения микротвёрдости по глубине изменённого слоя в образцах сплава ВТ20 после ГЛР, как в азоте, так и в аргоне, незначительные, что можно объяснить одним и тем же процессом упрочнения при высокой скорости охлаждения расплавленного металла. Об этом свидетельствует и тот факт, что на входе лазерного луча микротвёрдость на поверхности реза образца сплава ВТ20 после ГЛР в среде аргона соизмерима с микротвёрдостью основного металла, а на выходе значительно увеличивается (см. рис. 8).

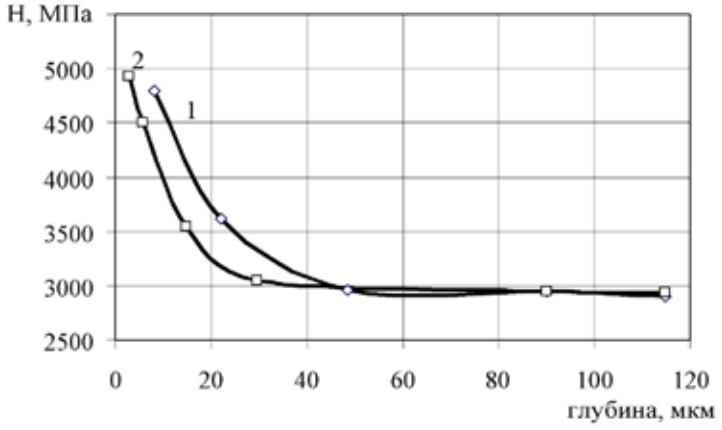


Рис. 7. Изменение микротвёрдости по глубине ЗТВ образцов
сплава ВТ20 после ГЛР в среде азота (1) и аргона (2)

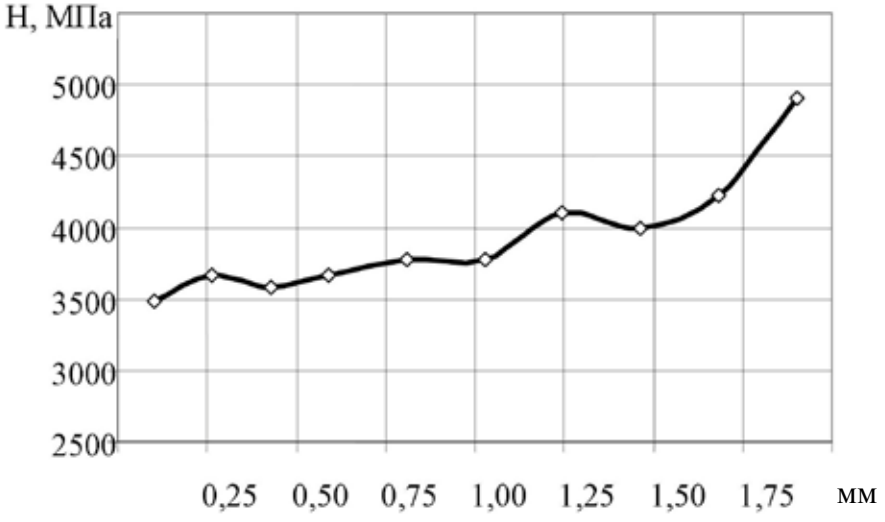


Рис. 8. Изменение микротвёрдости по поверхности реза образца сплава ВТ20 толщиной 2 мм после ГЛР в среде аргона (за нулевой уровень принимали сторону входа лазерного луча)

Время и скорость формирования канала реза в образцах сплава ВТ20 при ГЛР в среде азота вдвое превосходят эти показатели ГЛР в среде аргона (см. табл. 2) и, тем не менее, составляют довольно высокие значения микротвёрдости в том и в другом случае.

Это способствует тому, что стенки реза имеют температуру, приблизительно равную температуре плавления, и очень короткий промежуток времени, об этом свидетельствуют кривые изменения температуры поверхности образцов сплава ВТ20 после ГЛР в среде азота и аргона (см. рис. 9). Снижение температуры до 850 – 1000 °С происходит на глубине всего 0,08 – 0,059 и 0,1 – 0,08 мм соответственно за десятые и сотые доли секунды (температуропроводность титана составляет 0,075 см^2/с).

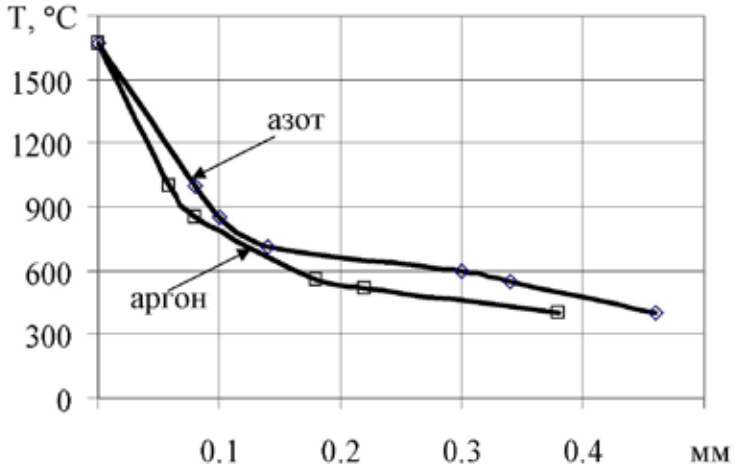


Рис. 9. Распределение температуры по поверхности образца сплава ВТ20 после ГЛР на выходе лазерного луча

Таблица 2

Время и скорость формирования одного канала в образцах сплава ВТ20 при ГЛР в зависимости от вида вспомогательного газа и скорости резки

Скорость резки L		Средняя ширина канала реза Z, мм		Число сформированных каналов за секунду n = L/Z		Время формирования одного канала τ, мс		Скорость формирования канала ν, м/с	
мм/мин	мм/с	Азот	Аргон	Азот	Аргон	Азот	Аргон	Азот	Аргон
2000	33	-	0,037	-	892	-	1,3	-	1,54
2500	42	0,015	0,026	2800	1615	0,357	0,619	56	32
3000	50	0,009	0,022	5556	2273	0,18	0,44	120	45
3500	59	0,007	-	8429	-	0,118	-	1690	-
4000	67	0,003	-	22 333	-	0,0447	-	4470	-

Вышеизложенное позволяет утверждать, что газонасыщение, в частности азотом, при ГЛР образцов сплава ВТ20 в среде азота практически не происходит. Кинетика реакции образования нитрида титана лимитируется не собственно химической реакцией (время нагрева намного меньше времени адсорбции азота), а диффузией и переносом вещества через слой образовавшегося нитрида.

$$Ti_{ж} + \frac{1}{2} N_2 \Leftrightarrow TiN_{тв}$$

Диффузионная подвижность азота в нитриде титана более чем на порядок меньше, чем в α, β-титане.

Исследованиями газонасыщения поверхностного слоя образцов сплава ВТ20 после ГЛР, как в азоте, так и в аргоне (см. табл. 3), существенного различия газовых примесей по сравнению с основным металлом не обнаружено. Значительное газонасыщение наблюдается в частицах грата.

Таблица 3

Содержание газовых примесей в частицах грата и поверхностном слое образцов из сплава ВТ20 после ГЛР в среде азота и аргона

ГЛР в среде	Скорость резки, мм/мин	Основной металл			Поверхность реза			В частицах грата		
		содержание газов примесей, %								
		H_2	O_2	N_2	H_2	O_2	N_2	H_2	O_2	N_2
Азота	3000	0,0073	0,088	0,016	0,0053	0,073	0,013	0,012	0,122	3,65
Аргона	2500	0,0089	0,075	0,010	0,0067	0,075	0,013	0,0097	0,94	0,62

Выводы

При газолазерном раскрое сфокусированным лазерным излучением титановых сплавов с использованием различных вспомогательных газов установлено:

1. Использование в качестве вспомогательного газа азота вместо кислорода позволяет вести ГЛР титановых сплавов в управляемом режиме, в отличие от автогенного неуправляемого, за счёт образования тугоплавкого соединения нитрида титана и расширяет границы толщин получения качественного реза.

2. С поверхности реза в процессе ГЛР титановых сплавов в зоне разделения идёт процесс отрыва, отделения жидкой фазы от твёрдой. При ГЛР в среде азота и аргона эти процессы различаются тем, что расплавленный металл из зоны реза вытесняется инертным газом низкой теплопроводности без образования тугоплавкой промежуточной твердой фазы, и отделение расплава от основного металла, вытягиваемой плёнки выглядит в виде сглаженных незаострённых складок с формированием крупных зёрен закристаллизовавшегося расплава.

3. Природа упрочнения кромки образцов из титановых сплавов в процессе ГЛР, как в азоте, так и в аргоне, одна и та же и связана с образованием смешанной структуры в поверхностном слое (аморфная, кристаллическая и сложной структуры с многослойным строением ЗТВ – игольчатая структура, ориентированная в пределах зерна с разными размерами игл). Размеры игл 7 – 10 мкм у зоны со смешанной структурой, 20 – 25 мкм в средней части и 7 – 5 мкм при переходе к исходной глобулярной структуре.

4. Различия в значениях распределения микротвёрдости по глубине упрочнённого слоя образцов титановых сплавов после ГЛР, как в среде азота, так и в среде аргона, незначительные. Распределение микротвёрдости по поверхности реза следующее: на входе лазерного луча микротвёрдость соизмерима с микротвердостью основного металла, а на выходе лазерного луча – максимальная.

5. Время и скорость формирования канала реза в образцах при ГЛР в среде азота вдвое превышает эти показатели для ГЛР в среде аргона.

6. Газонасыщение, в частности азотом, при ГЛР титановых сплавов в среде азота практически не происходит, что обусловлено образованием плёнки тугоплавкого соединения нитрида титана, диффузионная подвижность азота в котором на порядок меньше в α и β-титане, а также высокой скоростью охлаждения ЗТВ.

7. Содержание газовых примесей в поверхностном слое образцов после ГЛР, как в среде азота, так и в среде аргона, практически соизмеримо с содержанием газовых примесей в основном металле. Значительное газонасыщение наблюдается в частицах грата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьянц, А.Г. Основы лазерной обработки материалов / А.Г. Григорьянц. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
2. Исследование влияния газолазерного раскроя на формирование рельефа, структуры и химического состава поверхности реза титановых заготовок / В.И. Муравьёв, Р.А. Физулаков, Н.А. Семашко [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. – № 2. – 2005. – С. 22-25.
3. Григорьянц, А.Г. Лазерная техника и технология: в 7 кн. Кн. 7. Лазерная резка металлов: учеб. пособие для вузов / А.Г. Григорьянц, А.А. Соколов; под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Высш. шк., 1988. – 127 с.
4. Колачёв, Б.А. Технология термической обработки цветных металлов / Б.А. Колачёв, Р.М. Габидулин, Ю.В. Пигузов. – 2-е изд. – М.: Металлургия, 1981. – 416 с.
5. Ковнеристый, Ю.К. Объёмно-аморфизирующиеся металлические сплавы и наноструктурные материалы на их основе / Ю.К. Ковнеристый // МиТОМ. – № 7. – 2005. – С. 14-16.

Башков О.В., Панин С.В., Башкова Т.И.
O.V.Bashkov, S.V.Panin, T.I.Bashkova

ИССЛЕДОВАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ МЕХАНИЗМОВ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ СТАЛИ 12Х18Н10Т МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

USING THE ACOUSTIC EMISSION METHOD FOR RESEARCH AND IDENTIFICATION OF DEFORMATION AND DESTRUCTION MECHANISMS OF THE SUS 3321 STEEL

Башков Олег Викторович - кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» E-mail: bashkov_ov@mail.ru
Oleg Bashkov - PhD, lecturer of Komsomolsk-on-Amur State Technical University

Панин Сергей Викторович - заведующий лабораторией, доктор технических наук, профессор Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской Академии Наук (ИФПМ СО РАН)
Sergey Panin - head of laboratory Proffessor of The Institute of Strength Physics and Material Science, the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences

Башкова Татьяна Игоревна - кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет». E-mail: telem01@mail.ru
Tatiana Bashkova - PhD, lecturer of Komsomolsk-on-Amur State Technical University

Аннотация: представлены результаты исследований деформации и разрушения при растяжении образцов стали 12Х18Н10Т с использованием метода акустической эмиссии. Исследовались образцы в состоянии поставки и в состоянии, упрочненном азотированием. Установлены критерии оценки механизмов пластической деформации и хрупкого разрушения на основе анализа сигналов АЭ.

Summary: The acoustic emission method for research of deformation and tensile fracture of SUS 3321 steel samples is presented. Samples in as-received condition and nitride hardened samples were investigated. Estimation's criteria of the mechanisms of plastic deformation and brittle fracture mechanisms were established on the basis of acoustic emission's signals analysis.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, источники, стадийность, пластическая деформация, хрупкое разрушение, трещина, упрочнение, азотирование, покрытие.

Keywords: acoustic emission, source, stage, plastic deformation, brittle failure, crack, nitride hardening, coating.

УДК 539.219.2: 539.5: 620.172: 621.793

Введение

Деформация материала является сложным многоуровневым многостадийным процессом, включающим различные механизмы пластического деформирования и разрушения [1 - 3]. Как известно из ряда работ, поверхность оказывает большое влияние на формирование процесса деформации. Дефектная структура, сформированная в материале до начала нагружения, в значительной мере определяет закономерности будущего поведения материала в процессе деформации. Однако расшифровка и предсказание поведения материала является

Поступила в редакцию 11.04.2010 г.

достаточно сложной задачей. Это связано с тем, что каждый элемент структуры в отдельности и все они в совокупности оказывают влияние на поведение деформируемого материала.

Акустическая эмиссия (АЭ) при деформации и разрушении материалов содержит значительный объем важной информации о физических процессах, изменениях структуры материала, а также о механизмах, энергии разрушения, скорости деформации и т.д. Деформация в материале развивается со сменой стадий, каждая из которых характеризуется определенным набором механизмов и их соответствующим вкладом в общий процесс. В литературе встречаются работы, посвященные анализу не только совокупности сигналов АЭ при испытании материалов, но и анализу единичных сигналов АЭ с целью их детальной расшифровки и идентификации. Однако сложность параметрического описания распространения акустических волн в ограниченной, дефектной, анизотропной среде пока не позволяет разработать единую теорию идентификации сигналов и источников АЭ. Ранее в литературе были представлены работы по использованию частотного анализа [4–7] и вейвлет-анализа [8] для оценки характера сигналов АЭ. Получение новых результатов исследований взаимосвязи сигналов АЭ с механизмами структурных изменений в материалах может стать одной из важных исследовательских практических задач современного материаловедения.

В настоящей работе произведен анализ особенностей разрушения некоторых конструкционных материалов с использованием метода АЭ с целью идентификации типов источников АЭ и соответствующих им механизмов разрушения.

Материалы и методика экспериментов

Испытания материалов проводились на разрывной машине INSTRON-5582 по методике испытаний на одноосное растяжение со скоростью нагружения 0,5 мм/мин. Образцы были изготовлены фрезерованием из листового материала толщиной 2 мм. Регистрация сигналов АЭ проводилась на лабораторном программно-аппаратном комплексе, созданном на базе ЭВМ со встроенным четырехканальным быстродействующим АЦП на частоте дискретизации 10 МГц при установленных параметрах регистрирующей аппаратуры: коэффициент усиления 60 дБ в диапазоне частот 50…800 кГц. Фильтры верхних и нижних частот обеспечивали подавление акустических шумов в диапазоне до 30 кГц и шумов аппаратуры свыше 1 МГц. Для регистрации акустических сигналов применялись широкополосные преобразователи GT301 фирмы GlobalTest с полосой пропускания 50…550 кГц. Анализ механизмов разрушения материалов осуществлялся по вновь разработанным параметрам, полученным на основе спектрального анализа и вейвлет-анализа сигналов АЭ [9, 10], а также традиционно используемому параметру – энергии сигналов АЭ. Регистрация сигналов производилась с использованием двух каналов АЭ с целью определения местоположения источников АЭ. Существует две причины применения локации в ходе испытания образцов. Первая – связана с устранением ложных сигналов АЭ не лежащих в рабочей зоне образца, а регистрируемых от захватов образца или имеющих иное происхождение. Вторая причина связана с выявлением мест изменения активности АЭ излучения и идентификации механизмов в данных местах.

На первом этапе обработки данных вейвлет-анализ был применен для более точного определения местоположения источников АЭ. Как известно, сложность в методике локации источников АЭ связана с отсутствием стабильности в форме, времени нарастания фронта сигналов АЭ. Выделение узкой полосы коэффициентов вейвлет-разложения позволило увеличить точность определения местоположения источников АЭ и уменьшить число «отбракованных» сигналов АЭ.

Вторая область применения вейвлет-анализа касалась его использования для разработки нового критерия «расшифровки» сигналов АЭ и их идентификации. Ранее полученные данные позволяют утверждать, что на формирование сигнала АЭ оказывают влияние такие параметры источника деформации, как энергия, выделяющаяся при деформации, и величина деформации. Величина, скорость и механизмы деформации косвенно связаны с частотой и энергией упругой акустической волны, возникающей в процессе деформации. Так, энергия

возбуждаемой волны зависит от скорости движения микродефектов. По данным [4] скольжение в локальных областях происходит со скоростью до 500 м/с, а скорость образования несплошностей (микротрещин) составляет около 1500 м/с. В дальней зоне, на расстоянии много большем длины волны излучения, частота колебаний может быть косвенно определена как $f \approx \frac{V^2}{c_{l,t} \cdot L}$, где V – скорость движущихся участков или дефектов; $c_{l,t}$ – групповая скорость звука в материале [11]; L – их характерный размер.

На этом основании можно сделать вывод о том, что одними из основных критериев, но не единственными, определяющими тип источника деформации, и, как следствие, тип источника АЭ, являются энергия и частота акустического излучения. Спектр излучения акустических волн, представляющих собой сигналы АЭ, достаточно широк. Поэтому прямое использование спектра Фурье является не совсем корректным. С другой стороны, спектр Фурье наиболее полно и достоверно описывает лишь гармонические сигналы. Однако сигналы АЭ априори являются стохастическими. Поэтому применение спектрального Фурье-анализа для оценки частоты сигналов АЭ не всегда оправдано. В связи с этим частотный вейвлет-анализ может дать возможность получения дополнительной информации о сложных процессах, протекающих в процессе деформации материалов и находящих свое отражение в акустических образах сигналов АЭ. Зарегистрированные в процессе деформации сигналы АЭ были проанализированы с применением разложения вейвлетом Добеши 2-го порядка с центральной частотой 0,667, что позволило перекрыть весь полезный спектр исследуемых сигналов. На основе детализирующих вейвлет коэффициентов был рассчитан идентификационный параметр, названный частотным коэффициентом K_f, определяющий величину вклада отдельных частотных компонентов спектра в сигнал АЭ в целом. Частотный коэффициент K_f был рассчитан по формулам (1, 2):

$$stdFQ_j = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(x_{ji} - \bar{x}_j\right)^2}, \quad (1)$$

$$K_f = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}\left(stdFQ_j \cdot \left(m+1-j\right)\right), \quad (2)$$

где $stdFQ_j$ – среднеквадратическое отклонение ***j***-го коэффициента вейвлет-разложения сигнала АЭ, ***n*** – число отсчетов дискретизации сигнала АЭ, m – число коэффициентов вейвлет-разложения, x_{ji} – численное значение ***i***-го отсчета j-го вейвлет-коэффициента, $\bar{x}_j$ - среднее значение ряда из ***n*** отсчетов j-го вейвлет-коэффициента.

Физический смысл частотного коэффициента K_f можно определить как вклад частотных компонент спектра в сигнал АЭ в целом. При этом энергетическая составляющая каждой из частотных компонент определена с учетом момента времени ее возбуждения (учитывался фазовый сдвиг частотной компоненты по технологии вейвлет-анализа). В упрощенном виде: значение частотного коэффициента K_f будет тем больше, чем больше энергетический вклад в акустический сигнал высокочастотных компонент и меньше разность фаз между частотными компонентами.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Для исследования механизмов деформации материалов с упрочненным слоем был поставлен эксперимент по оценке влияния хрупкого поверхностного слоя на кинетику деформации и разрушения материала стали 12Х18Н10Т и особенности проявления АЭ на различных стадиях. Испытанию подвергались образцы в состоянии поставки и образцы с газовым азотированием поверхности, проводимым в течение различного времени. В результате химико-термической обработки на поверхностях образцов был получен азотированный слой повышенной твердости толщиной 10 мкм. Толщина покрытия могла меняться при изменении времени и температуры выдержки материала. Обработанные материалы подвергались испытанию на одноосное растяжение с одновременной регистрацией сигналов АЭ и оптического изображения отдельных участков поверхности.

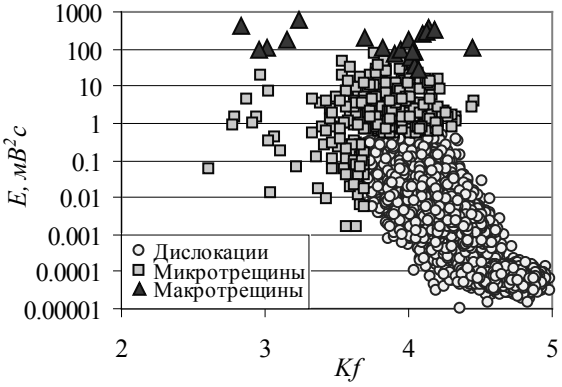


Рис. 1. Двухпараметрическое распределение сигналов АЭ при деформации образца стали 12Х18Н10Т в состоянии поставки

Образец стали 12Х18Н10Т в состоянии поставки

Ниже представлены результаты исследований образца стали 12Х18Н10Т в состоянии поставки при испытании на одноосное растяжение со скоростью 0,5 мм/мин. На рис. 1 приведено двухпараметрическое распределение сигналов АЭ в координатах: энергия АЭ $E_{АЭ}$ – частотный коэффициент K_f. Численное значение энергии $E_{АЭ}$ находится в диапазоне 0,00001…600 мВ^{2}с, параметры частотного коэффициента K_f. – в диапазоне 2,5…5. При этом большинству сигналов со значением параметра $K_f > 3{,}7$ соответствует значение $E_{АЭ} \leq 0{,}5$ мВ^{2}с. Анализ параметров АЭ для пластичных материалов, таких как медь, олово, свинец и сплавы на их основе, показал, что большинство сигналов АЭ, излучаемых в период активной пластической деформации, имеет параметры, находящиеся в следующем диапазоне: энергия сигналов АЭ $E_{АЭ} \leq 0{,}5$ мВ^{2}с, параметр $K_f > 3{,}7$. Данные сигналы АЭ были отнесены к сигналам дислокационного типа, регистрируемых во время генерации и движении дислокаций при активной пластической деформации материалов. Принадлежность сигналов к дислокационным механизмам неоднократно подтверждалась различными косвенными методами, в числе которых проявление эффекта Кайзера – явления невоспроизводимости АЭ при повторных нагружениях материала нагрузкой, не превышающей первоначальную. Метод заключался в том, что образцы после механического нагружения подвергались обработке короткими импульсами электрического тока. Приобретенная в процессе электроимпульсного воздействия подвижность дислокаций приводила к их перераспределению и уменьшению напряжений в локальных областях. При повторном нагружении эффект Кайзера не проявлялся, а источники АЭ, генерируемые в результате скольжения при пластической деформации, носили преимущественно дислокационный характер. Образование трещин и микронесплошностей на данной стадии не регистрировалось, или их число в значительной мере уменьшалось в связи с тем, что электрические импульсы оказывают воздействие только на атомарные и дислокационные структуры, перераспределяя их за счет повышения энергии и подвижности. «Залечивания» образовавшихся при первичном цикле нагружения трещин и несплошностей не происходит.

Хрупкое разрушение, характеризуемое образованием трещин размером более 2…5 мкм в материалах с модулем Юнга E > 200 ГПа, регистрировалось при испытаниях закаленной углеродистой стали с объемной и поверхностной закалкой, прутков вольфрама, модибдена. Этот вид хрупкого разрушения был отнесен к образованию макротрещин ввиду того, что зарождаемые, как правило, на поверхности материала трещины могли быть зафиксированы с помощью оптической микроскопии при увеличении до 500 крат. Излучаемые при этом упругие волны имели следующие параметры АЭ: энергия АЭ $E_{АЭ} > 50$ мВ^{2}с, параметр $K_f = 3{,}0…4{,}6$.

Промежуточную область между дислокационными механизмами деформации и разрушением с образованием макротрещин занимает образование микронесплошностей. Энер-

гия образования единичных микронесплошностей (микротрещин) может быть соизмерима с энергией движения групп дислокаций при скольжении, однако скорость образования дефектов более высокая, чем при дислокационном процессе. Поэтому данный вид разрушения сопровождается излучением сигналов, имеющих следующие параметры: для сигналов с $E_{АЭ} < 0{,}5$ мВ^{2}с параметр $K_f < 3{,}7$, для сигналов с $E_{АЭ} > 0{,}5$ мВ^{2}с значение параметра $K_f = 2{,}5\ldots4{,}5$. Таким образом, результаты анализа двухпараметрического распределения показали возможность разделения сигналов АЭ на три типа: излучаемые в процессе пластической деформации скольжением (при движении дислокаций), при образовании и развитии микротрещин и при разрушении с образованием макротрещин.

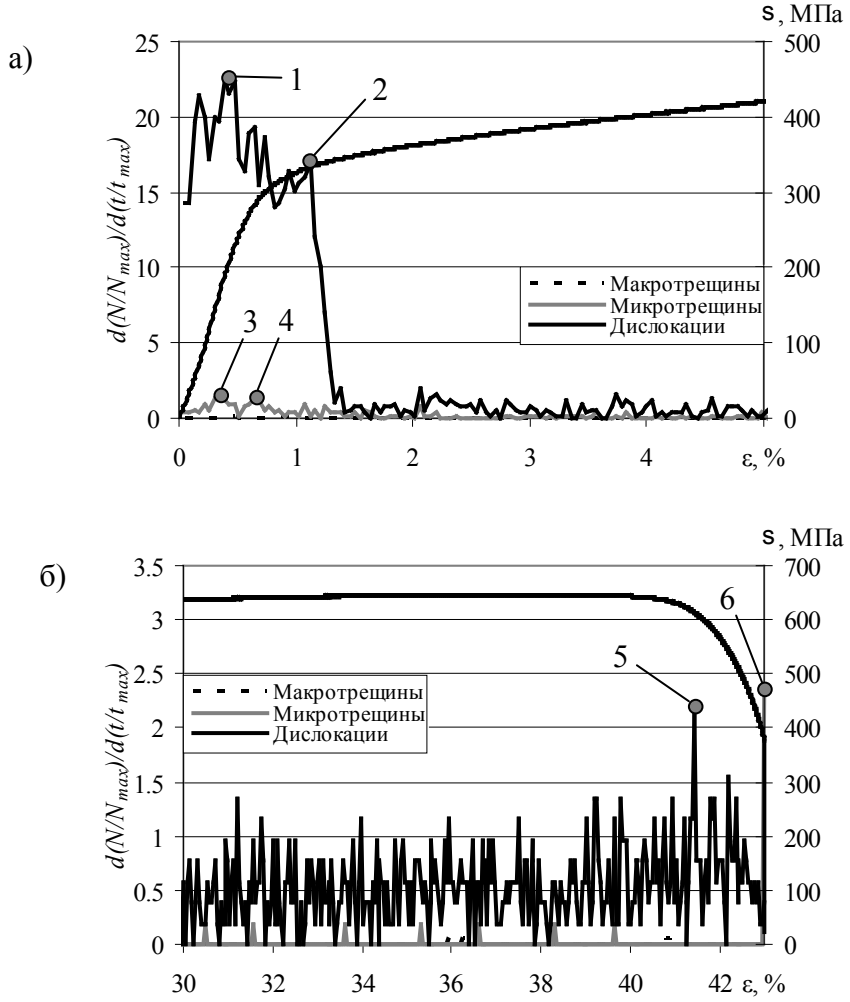


Рис. 2. Диаграмма нагружения и активность сигналов АЭ
при деформации образца стали 12Х18Н10Т в состоянии поставки

Моменты роста активности сигналов при деформации образцов стали 12Х18Н10Т в состоянии поставки можно оценить по графикам на рис. 2, где представлены: начальная (см. рис. 2, а) и конечная (см. рис. 2, б) области диаграммы нагружения образца и активность трех типов сигналов АЭ во времени. На графиках видно (см. рис. 2, а), что активность образования микротрещин мала в сравнении с дислокационным механизмом и заметна лишь на этапе нагружения, соответствующем стадии упругости и начальной пластической деформации (точки 3 и 4, см. рис. 2, а). Дальнейшая деформация на стадии легкого скольжения и начала деформационного упрочнения сопровождается локальными пластическими сдвигами, в основе которых лежат дислокационные механизмы пластической деформации.

Образование микротрещин, или данный механизм еще можно назвать механизмом образования несплошностей на микроуровне, начинает активно проявляться в начальный период нагружения, т. е. в области упругих деформаций. На данной стадии имеют место микроразрушения в локальных объемах, некоторая доля которых связана с образованием микротрещин (микронесплошностей). Появление значительной активности АЭ дислокационного типа на стадии упругой деформации происходит, по всей видимости, за счет зернограничных смещений (точка 1, см. рис. 2, а). В работе [12] данная стадия названа «областью микротекучести». Большая плотность дефектов и химическая неоднородность по границам зерен способствует образованию в них локальных напряжений. При воздействии внешней нагрузки и сложении ее с внутренними напряжениями происходит активное движение дислокаций в отдельных областях, плотность которых по границам зерен выше, чем внутри зерен, что приводит к образованию несплошностей и подтверждается регистрацией сигналов АЭ, отнесенных к типу микротрещин. В работах [12, 13] показано, что пик активности АЭ, соответствующий стадии микротекучести, связан с коллективным движением и размножением дислокаций в области границ зерен преимущественно поверхностного слоя, а также с их выходом на поверхность. Кроме того, как свидетельствуют результаты эксперимента, стадия микротекучести сопровождается активным образованием микронесплошностей в зернограничных областях.

Стадия деформации, обозначенная точкой 2 на рис. 2, а, соответствует максимальной активности источников АЭ в момент достижения физического предела текучести материала. Регистрируемые сигналы АЭ свидетельствуют об активной генерации и движении дислокаций в процессе легкого скольжения при пластической деформации. На этой стадии происходит увеличение плотности дислокаций с их выходом на границы зерен и поверхность материала. Образование микротрещин на данной стадии, как было отмечено в работе И.А. Одинга и Ю.П. Либерова [13], происходит преимущественно на поверхности металла. Однако их число и активность значительно меньше, чем на стадии упругости в области микротекучести, что подтверждается регистрацией раздельных типов сигналов АЭ. Постепенное дальнейшее снижение активности АЭ происходит в результате образования скоплений дислокаций (леса дислокаций), сокращения длины их свободного пробега и уменьшения числа подвижных дислокаций. Материал при этом вступает в стадию деформационного упрочнения. Последняя стадия нагружения протекает с уменьшением деформируемого объема и локализацией зоны деформации: происходит образование шейки. Данная стадия сопровождается небольшим ростом активности АЭ при сокращающемся объеме материала, участвующего в деформации (точка 5, см. рис. 2, б). Это может быть связано с увеличением скорости истинной деформации нагружаемого материала после локализации деформации при сохранении скорости нагружения испытательной машины. Данный эффект приводит к запаздыванию протекания механизма релаксации напряжений, увеличению скорости движения дефектов и, как следствие, увеличению энергии порождаемых ими упругих волн АЭ. Активность образования микротрещин возрастает лишь на завершающей стадии предразрушения (точка 6, см. рис. 2, б).

Образец стали 12Х18Н10Т с азотированным слоем 10 мкм

Ниже приведены результаты исследования образца стали 12Х18Н10Т с упрочненным слоем 10 мкм, полученным в результате поверхностного азотирования в течение 0,5 ч. Механические испытании на одноосное растяжение проводились при скорости 0,5 мм/мин. На рис. 3 приведено двухпараметрическое распределение сигналов АЭ в координатах: энергия АЭ $E_{АЭ}$ – частотный коэффициент K_f. Численное значение энергии сигналов АЭ $E_{АЭ}$ находится в диапазоне 0,0005…800 мВ^{2}с, параметры частотного коэффициента K_f – в диапазоне 2,5…4,8.

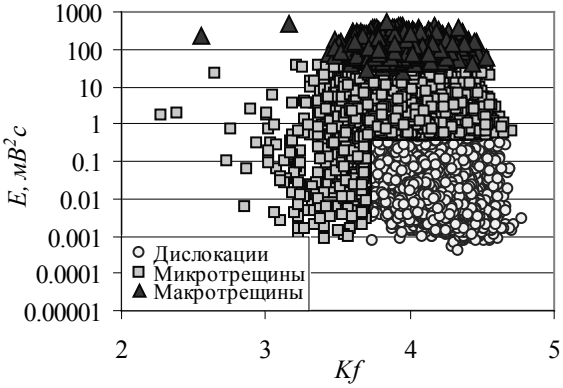


Рис. 3. Двухпараметрическое распределение сигналов АЭ
при деформации образца стали 12Х18Н10Т
с азотированным поверхностным слоем 10 мкм (время азотирования 0,5 ч)

Распределение включает в себя три типа сигналов АЭ: излучаемые при генерации и движении дислокаций, при образовании микротрещин и при образовании макротрещин. Общая активность сигналов АЭ в процессе деформации материала с наличием двухфазной или композиционной структуры, как правило, велика. Это связано с различием механических свойств составляющих материал фаз. В данном случае наличие пластичной фазовой составляющей (подложки) сдерживает процесс разрушения материала в целом и обеспечивает протекание пластической деформации по несколько иному механизму, чем в материале без поверхностного упрочнения. Уже на стадии упругой деформации в поверхностных слоях происходит рост напряжений в местах их наибольшей концентрации.

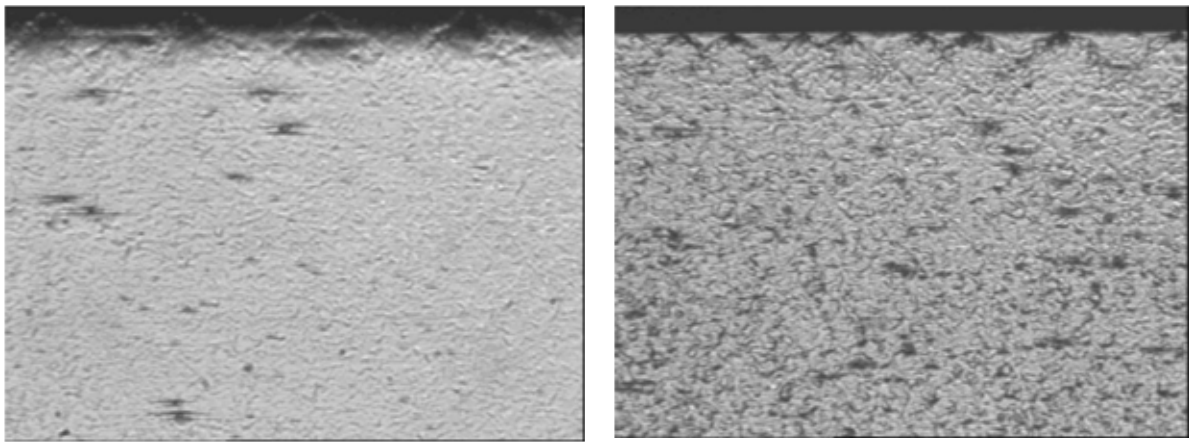


Рис. 4. Фотографии поверхности образца стали 12Х18Н10Т с азотированным поверхностным слоем на различных стадиях деформации: а) 1,5 %; б) 5 %; размер изображения 700x500 мкм

Данный процесс вызывает активное стекание дислокаций и образование сетки микротрещин, распределенных по всей поверхности упрочненного материала (см. рис. 4). Поверхность образцов начинает фрагментироваться с самого начала пластической деформации с образованием на боковых гранях, где азотированный слой был предварительно сошлифован, полос локализованного сдвига. Увеличение степени деформации приводит к образованию в местах пересечения деформационных полос конусообразных вихрей. Описанию практических исследований и физики локализации пластической деформации посвящено много работ по физической мезомеханике [14, 15, 16]. Диаграмма нагружения и графики активности сигналов АЭ при деформации и разрушении образца стали 12Х18Н10Т с азотированным покрытием приведены на рис. 5. Пики активности АЭ, обозначенные точками 1, 2 для сигналов

дислокационного типа и микротрещинообразования соответственно, зарегистрированы на стадии упругой деформации. На данном этапе деформации действует механизм микротекучести, описанный ранее. Значения деформации, соответствующие максимальной активности АЭ на стадии микротекучести, совпадают для образцов с покрытием и без него и составляют 0,3 … 0,5 %. На этой же стадии появляются и первые макротрещины, разрушающие поверхностный слой, что подтверждается регистрацией сигналов АЭ соответствующего типа (точка 3, см. рис. 5).

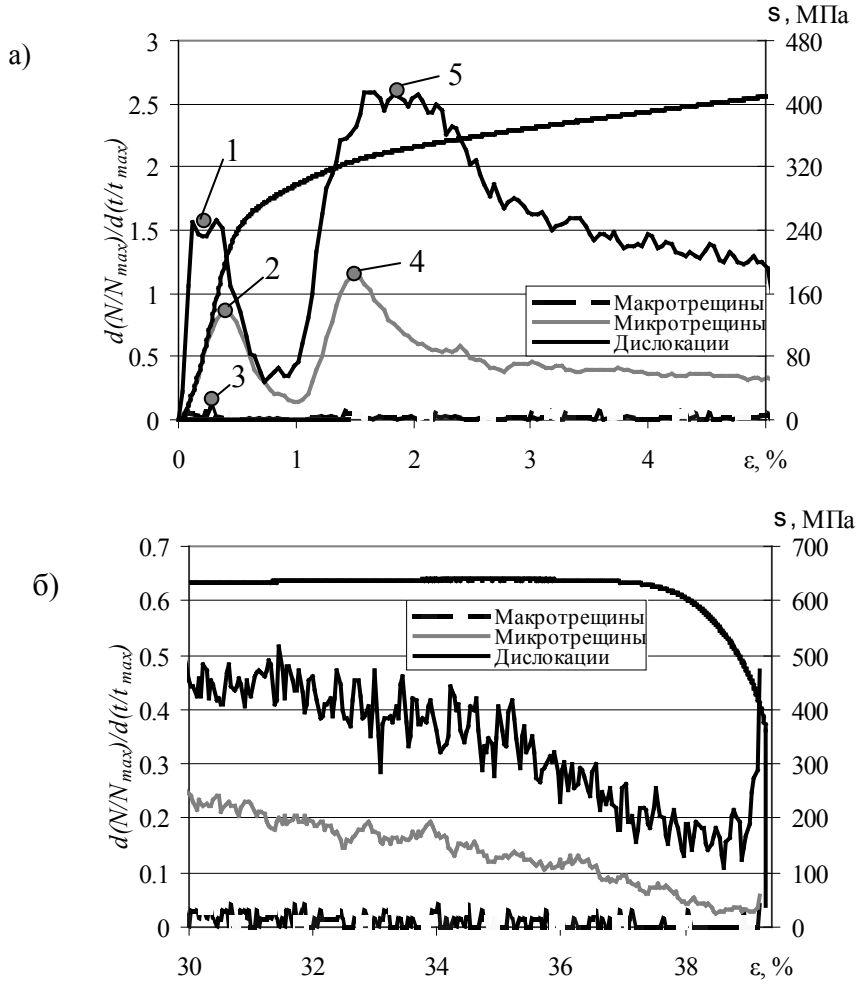


Рис. 5. Диаграмма нагружения и активность АЭ
при деформации образцов сплава 12Х18Н10Т
с азотированным поверхностным слоем 10 мкм
(время азотирования 0,5 ч)

Последующий рост активности АЭ от образующихся микротрещин наблюдается на стадии начала пластической деформации (~ 1 %) в зонах, прилегающих к местам разрушения поверхностного слоя, и достигает максимума при деформации 1,5 % (точка 4, см. рис. 5). Активность пластической деформации в местах возникновения трещин можно наблюдать по образующимся мезополосам локальных пластических сдвигов, расходящимся от вершин трещин под углами 45 ° к поверхности (см. рис. 4). При достижении деформации ~ 1,5 % наблюдается максимум активности сигналов АЭ дислокационного типа (точка 5), который продолжается до степени деформации ~ 2,5 %, что свидетельствует о достижении материалом физического предела текучести. Дальнейший процесс деформации протекает со спадом активности обоих процессов. На стадии деформации, соответствующей ~ 10 %, происходит

монотонный спад активности сигналов АЭ дислокационного типа. Спада активности генерации сигналов АЭ, идентифицируемых как образование микро- и макротрещин, не наблюдается вплоть до последней стадии деформации образца. Это связано с накоплением повреждений, образующихся главным образом за счет продвижения вглубь материала новых дефектов, зарождающихся на границах трещин. При деформации образца с азотированным покрытием было зарегистрировано 48 000 сигналов АЭ дислокационного типа и 12 000 сигналов АЭ, идентифицируемых как микротрещинообразование, что превышает в 16 и 40 раз число соответствующих сигналов АЭ, генерируемых при деформации образца без упрочненного поверхностного слоя. Механические свойства стали изменились незначительно: предел прочности образца с азотированным слоем в сравнении с образцом необработанного материала уменьшился с 640 МПа до 620 МПа, относительное удлинение при разрыве уменьшилось с 43 % до 39 % соответственно. Механические свойства образцов находятся в пределах статистического отклонения. Различие в числе зарегистрированных сигналов АЭ, по мнению авторов, заключается в следующем:

1) Происходит локализация большого числа мезообъемов в приповерхностных слоях, прилегающих к фрагментированному в результате растрескивания упрочненному поверхностному слою. Локализованные объемы испытывают значительную ротационно-сдвиговую деформацию в местах их «закрепления» в районе образовавшихся поверхностных трещин.

2) Локализованная деформация, в сравнении с равномерно распределенной по объему, протекает при больших скоростях в локальных зонах. В результате чего возрастает энергия упругого излучения.

3) Образование микротрещин происходит как на хрупкой фазе, так и на вновь образованных поверхностях растущих трещин.

4) Увеличение концентрации напряжений и коэффициента интенсивности напряжений приводит к увеличению числа зарегистрированных сигналов АЭ [7, 17].

Выводы

В работе показан характер деформации образцов стали 12Х18Н10Т в состоянии поставки и с поверхностно упрочненным слоем, полученным путем газового азотирования. На основании ранее полученных данных при деформации широкого круга материалов была разработана методика классификации сигналов АЭ с целью идентификации источников АЭ. Для ряда материалов были выделены три типа сигналов АЭ: сигналы, излучаемые при движении дислокаций (дислокационный механизм) и сигналы, излучаемые при образовании микро- и макротрещин. Для исследуемой стали 12Х18Н10Т по результатам анализа сигналов АЭ было установлено:

1) наличие стадийности процесса деформации материала: стадии микропластичности, текучести, упрочнения, трещинообразования;

2) стадийность деформации на микро- и мезоуровнях образцов с однородной структурой и образцов с двухфазной композиционной структурой, полученной в результате поверхностного упрочнения, различна;

3) на стадии упругой деформации действуют механизмы микропластичности и микротрещинообразования;

4) образование магистральной трещины и разрушение пластичного материала проходит по механизму пластической деформации в вершине трещины;

5) активность АЭ при деформации материалов с наличием двухфазной или композиционной структуры значительно выше, чем при деформации однофазных материалов.

Дальнейшие перспективы развития данной работы направлены на совершенствование методики идентификации сигналов АЭ и создание программно-аппаратного комплекса для регистрации и экспресс-анализа в реальном времени структурных процессов в материалах при их диагностике и исследовании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов / Под ред. В.Е. Панина. – Новосибирск: Наука. – 1995. – Т. 1. – 298 с., Т. 2. – 320 с.
2. Панин В.Е. Основы физической мезомеханики / В.Е. Панин // Физическая мезомеханика. – 1998. – Т. 1. – № 1. – С. 2-22.
3. Семашко Н.А. Влияние степени деформации на эволюцию дефектности структуры титанового сплава ОТ4 / Н.А. Семашко, О.В. Башков, Т.И. Башкова // Перспективные материалы. – 2000. – № 1. – С. 25-29.
4. Муравин Г.Б. Идентификация механизма разрушения материалов методами спектрального анализа сигналов акустический эмиссии / Г.Б. Муравин, Я.В. Симкин, А.И. Мерман // Дефектоскопия. – 1989. - № 4. – С. 9–15.
5. Брагинский А.П. Распознавание дефектов по спектральным характеристикам акустической эмиссии / А.П. Брагинский // Дефектоскопия. – 1984. - № 1. – С. 47–55.
6. Брагинский А.П. Амплитудно-частотная методика локации источников акустической эмиссии / А.П. Брагинский, Б.М. Медведев, А.И. Платков // Дефектоскопия. – 1988. - № 8. – С. 58–65.
7. Лысак Н.В. О методологии АЭ-диагностирования трещинообразования / Н.В. Лысак, В.Р. Скальский, О.Н. Сергиенко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1991. – № 3. – С. 9–14.
8. Hamstad M. A., Gallagher A. O. and Gary J. Examination of the Application of a Wavelet Transform to Acoustic Emission Signals: Part 1. Source Identification// J. Acoustic Emission. – 2002. – V. 20. – P. 39-61.
9. Башков О.В. Применение вейвлет-анализа для идентификации источников акустической эмиссии при деформации и разрушении поликристаллических материалов / О.В. Башков, Д.А. Шпак, И.М. Гололобова // Материалы VIII российско-китайского симпозиума «Modern materials and technologies 2007». – г. Хабаровск. – 17-18 октября 2007. – Ч. 2. – С. 83–87.
10. Bashkov O.V. Identification of acoustic emission sources at scale levels of plastic deformation / O.V. Bashkov, D.A. Shpak // 2008 Joint China-Russia Symposium on Advanced Materials and Processing Technology. – Harbin, China, June 16 – June 20, 2008. – P. 365 – 370.
11. Красильников В.А. Введение в физическую акустику / В.А. Красильников, В.В. Крылов. – М.: Наука. – 1984. – 403 с.
12. Пенкин А.Г. Оценка степени повреждаемости конструкционной стали 19Г при статистическом и циклическом деформировании с использованием акустической эмиссии / А.Г. Пенкин, В.Ф. Терентьев // Металлы. –2004. – № 3. – С. 78–85.
13. Одинг И.А. Накопление дефектов и образование субмикроскопических трещин при статическом деформировании армко-железа / И.А. Одинг, Ю.П. Либеров // Изв. АН СССР. ОТН. Металлургия и топливо, горное дело. – 1964. – № 1. – С. 113–119.
14. Панин С.В. Закономерности пластической деформации и разрушения на мезоуровне материалов с покрытиями и поверхностным упрочнением / С.В. Панин // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7. – Ч. 1. – С. 109-112.
15. Панин В.Е. Полевая теория многоуровневого пластического течения в шейке деформируемого твердого тела / В.Е. Панин, Ю.В. Гриняев, А.В. Панин // Физическая мезомеханика. – 2007. – Т. 10. – №. 5. – С. 5-16.
16. Панин В.Е. Влияние внутренней структуры и состояния поверхности на развитие деформации на мезоуровне малоуглеродистой стали / В.Е. Панин, А.И. Слосман, Н.А. Антипина, А.В. Литвиненко // Физическая мезомеханика. – 2001. – Т. 4. – №. 1. – С. 105-110.
17. Тишкин А.П. Связь числа сигналов акустической эмиссии с развитием пластической зоны в вершине трещины / А.П. Тишкин // Дефектоскопия. – 1989. - № 2. – С. 61–65.

Учёные записки № II-1(2) 2010
Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета

Цуй Сюй, Гусева Р.И., Чжан Линюни, Гао Юй
Cui Xu, R.I.Guseva, Zhang Lingyun, Gao Yu

ОЦЕНКА СВОЙСТВ АППРЕТОВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ СВЯЗИ МЕЖДУ ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЕЙ И ВЫСОКОПРОЧНЫМ УГЛЕРОДНЫМ ВОЛОКНОМ Т800

EVALUATION OF THE FEATURE GEL COMPOSITION SURFACE ADHESION FOR IMPROVING THE BOND GAINING FOR T800 AND RESIN MATRIX CARBON FIBER

Гусева Р.И. – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры "Технология самолетостроения", зам. декана самолетостроительного факультета Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Россия. E-mail: r_guseva@knastu.ru
Ms. R.I. Gusseva – PhD in Engineering, Professor of the Department of Aircraft Building Technology, Vice-dead of the Department of Aricraft Engineering at Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), e-mail: r_guseva@knastu.ru

Цуй Сюй[1]– доцент, магистр технических наук, зам. декана факультета аэрокосмической техники Шэньянского авиационного технического института. Китай. E-mail: cuixug@163.com.
Cui Xu1[2] - Master of Engineering, Associate Professor, Vice-head of the Aero-space Department at the Sheng-Yang Technical Aviation Institute, China, E-mail: cuixug@163.com.

Чжан Линюни - профессор Шэньянского авиационного технического института. Китай. E-mail: ZhangLY79 @163.com
Zhang Lingyun - Xian Linyuni – Professor, Sheng-Yang Technical Aviation Institute, China. e-mail: **ZhangLY79** @163.com

Гао Юй - доцент, Шэньянский авиационный технический институт, Китай
Gao Yui – Associate Professor, Sheng-Yang Technical Aviation Institute.

Аннотация: Проанализированы аппреты для углеродных волокон Т800 с целью улучшения адгезионных свойств поверхности волокна перед введением в композиционный материал связующего. На основе проведенных экспериментов сравниваются сдвиговые прочности для полимерных композиционных угольных материалов на основе волокон Т800 (КМУ Т800) с разными матричными материалами; проанализированы результаты исследований электронным микроскопом сканирования (SEM) сечений, полученных в результаты разрушения от изгиба образцов КМУ Т800. Испытания позволяют заключить, что аппрет Е-51, наносимый на углеродное волокно Т800, значительно повышает прочность на сдвиг КМУ Т800 с применяемой матрицей TDE-85.

Summary: The gel composition for T800 carbon fiber is analyzed with the purpose of the fiber surface adhesion features improving before the bond adding in the composite. The interlaminar shear mechanical properties of the T800 carbon fiber composite materials under different resin matrix are also compared. Moreover, the scan results on T800 composite curved cross-section. Experiments show that the interlaminar shear strength of composite materials which are composed of TDE-85 complex matrix resin and T800 carbon fibre coated the E-51 epoxy resin, reaches 124 MPa. Furthermore, by scanning the composite curved cross-section,

1. Статья новаторского ряда отдела образования провинции Ляонин Китая (2008T149)
the Project is sponsored by “Liaoning BaiQianWan Talents Program” (2008921102)

2.This innovation paper has been submitted by the Education Department of Liaoning Province of China (2008T149). The Project is sponsored by “Liaoning BaiQianWan Talents Program” (2008921102)

it is found that the T800 carbon fibers have been closely connected with resin matrix, and the interfacial bonding strength is high enough.

Ключевые слова: Углеродные волокна Т800, КМУ, механические свойства на поверхности раздела волокно-связующее**,** сдвиговые прочности.

Keywords: T800 carbon fiber, CMC, ccomposite materials, interfacial properties.

УДК 678.4

Угольные и углеродные полимерные композиционные материалы, применяемые в аэрокосмической области, обладают рядом уникальных свойств. Высокопрочные угольные волокна в комбинации с эпоксидными матрицами позволяют добиться ряда ценных свойств у КМУ, которые позволят снизить массу планера самолета до 26 % и более и увеличить выносливость и ресурс летательного аппарата.

Новейшей модификацией угольных композиционных материалов на сегодня является КМУ Т800, армированный углеродным волокном Т800, взамен углеродных волокон Т300 и Т700 [2]. Матричные системы и аппреты для углеродных волокон Т300 и Т700 достаточно хорошо изучены, в то время как для КМУ Т800 недостаточно накоплено статистического материала [3].

Унифилярный диаметр угольного волокна Т800 меньше, чем у волокон Т300 и Т700, поверхность волокна жестче, что в целом приводит к плохому смачиванию волокна связующим и его высокой поверхностной инертности [4, 5]. Поэтому имеющиеся матричные материалы нельзя использовать для формования высокопрочных изделий из КМУ Т800.

Некоторые источники показывают, что прочность КМУ Т800 с имеющимися матричными материалами и аппретами даже меньше прочности КМУ Т700 и Т300 [6].

Механические свойства КМУ значительно зависят от поверхностных свойств волокон и средств связи между волокнами и матрицей. Исследования, проводимые Го Хуйлин [7] и его коллегами, показали, что углеродные волокна Т800 имеют более гладкую поверхность вдоль оси волокна, чем у углеродных волокон Т300.

Чэнь Вэймин [8] и его коллеги изучали матрицы для углеродных волокон Т800 и доказали, что аппреты, матричные материалы, разбавители значительно влияют на свойства поверхности волокон КМУ Т800.

Исследования показывают, что механические характеристики КМУ зависят от трёх главных факторов: прочности и упругости применяемого волокна, прочности и химической стабильности связующего-матрицы, а также от прочности связи между волокном и матрицей на поверхности раздела. Установлено, что состояние поверхности раздела между волокнами и матрицами оказывает важное значение и влияет на механические свойства КМУ [9-13].

Лучшими КМУ следует считать материалы, которые обработаны аппретирующими добавками, которые повышают когезионные и адгезиооные свойства поверхности раздела волокно-матрица, имеют хорошее физико-химическое сцепление. Такие материалы хорошо передают и воспринимают нагрузки, обладают высоким сопротивлением против растрескивания поверхности раздела при высоких нагрузках [10].

В настоящей работе проводятся исследования механических свойств волокон Т800, связующих для этих волокон и аппретирующих добавок для КМУ Т800 с целью улучшения свойств КМУ Т800 и применения КМУ Т800 на летательном аппарате.

Изготовление образцов

В работе использовались следующие компоненты:

- матричные материалы: три марки связующих - 5405, 5228 и TDE-85, в которые добавляются отвердители и разбавители в регламентированных соотношениях;
- углеродные волокна - Торейка Т800Н (12К), Т700, Т300 (США);
- аппрет Е-51.

В табл. 1 представлены основные параметры углеродных волокон.

Аппреты на углеродные волокна Т800 наносят на заводе-изготовителе: волокна помещают в закрытый герметичный обогреваемый реактор, нагревают до температуры 100 ^{0}С в растворе ацетона и кислоты, выдерживают в течение 24 ч, промывают дистиллированной водой.

Таблица 1

Основные параметры углеродных волокон

Углеродные волокна	Унифилярный диаметр, мкм	Прочность на растяжение, GПа	Модуль упругости при растяжении, GПа	Предельные разрушения, %
Т300В-3000-40В	7	3,5	230	1,70
Т700SC-12000-5ОС	7	4,9	230	2,10
Т800НВ-12000-40В	5	5,5	294	1,90

Формование плоских образцов матричных материалов проводят после смешивания связующего и отвердителя в соотношении 10:1, разлива смеси по плоским штампам. Отверждение образцов проводят при нормальном давлении в термопечи по режимам:

- температура отверждения 70 ^{0}С, время отверждения - 1 ч;
- температура отверждения 80 ^{0}С, время отверждения - 2 ч;
- температура отверждения 100 ^{0}С, время отверждения - 2 ч;
- температура отверждения 150 ^{0}С, время отверждения - 4 ч.

Перед формованием КМУТ800 углеродные волокна Т800 пропитывают связующим, затем проводят укладку волокон, разглаживание волокон для ориентации волокон вдоль оси, предварительное натяжение однонаправленных волокон, отверждение образцов КМУ. Содержание углеродных волокон Т800 – 60 %.

Испытания и анализ испытаний

В результате проведенных экспериментов:

1 Проанализирован состав поверхности раздела КМУ Т800 с помощью инфракрасного стилоскопа Spectrum100 B FTIR американской компании PE.

2 Измерена вязкость матричных материалов вискозиметром NDJ-8S.

3 С помощью универсального оборудования измерены прочностные характеристики связующих в соответствии с государственным стандартом GB2568-1995.

4 Измерена прочность на сдвиг однонаправленных плоских образцов для КМУ Т800 с разными матричными материалами в соответствии с государственными стандартами.

5 Просканированы электронным микроскопом (тип S-250) и обработаны результаты сканирования разрушенных сечений КМУ Т800, полученных от изгиба.

Анализ составов аппретов для углеродных волокон Т800

Поверхностные аппреты для углеродных волокон улучшают адгезионные свойства поверхности раздела КМ [12]. Для формирования высоких свойств КМ [7] необходимо проанализировать состояние поверхностных оболочек для углеродных волокон Т800. Для анализа составов аппретов и связующего использовано современное оборудование с установкой FT-IR.

На рис. 1 представлен сравнительный анализ для углеродных волокон Т800 с нанесенным аппретом Е-51 и с раствором эпоксифенольного связующего А(DGEBA). По оси абсцисс отложена частота колебаний связующего, по оси ординат - световая пропускаемость аппрета.

Полученные результаты позволяют заключить, что поверхностная оболочка для углеродных волокон Т800 с аппретом Е-51 – самая лучшая для повышения адгезионных свойств волокна к матрице.

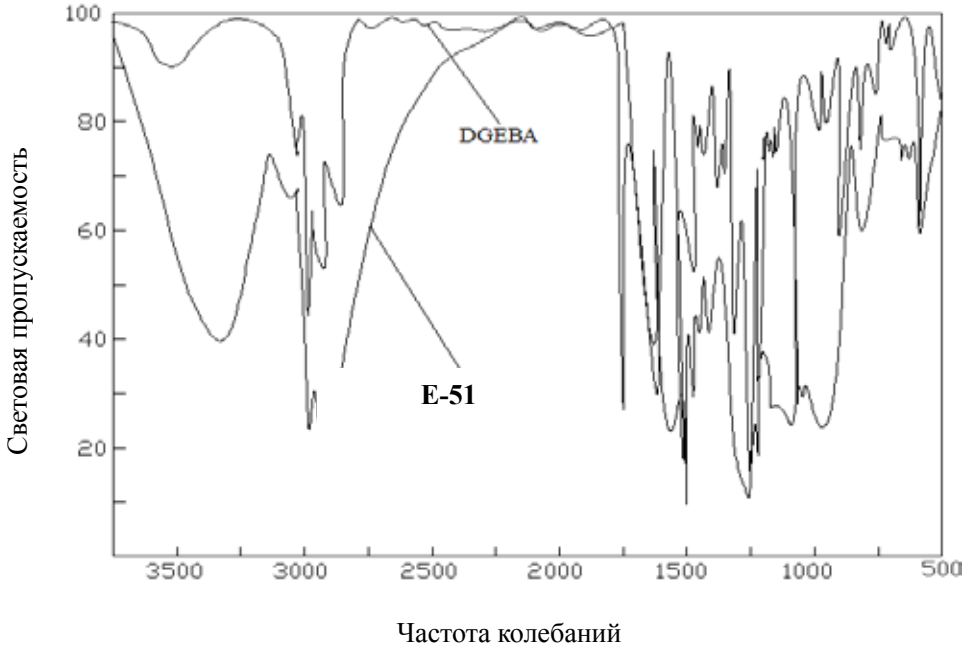


Рис. 1. Сравнительные кривые разных аппретов в зависимости от частоты колебаний и светопрозрачности связующих

Анализ механических свойств КМУ Т800

В табл. 2 представлены обработанные результаты эксперимента - механические характеристики для различных матричных материалов и КМУ Т800, а также представлены для сравнения значения прочности на сдвиг КМУ Т300 и КМУ Т700.

Из табл. 2 видно, что прочность на растяжение связующего (матрицы) TDE-85 самая высокая (более 100 МПа), в то время как прочность на растяжение других матриц в пределах 84,0 – 86,0 МПа.

В опытах на сдвиг сдвиговая прочность КМУ Т800 с матрицей TDE-85 самая высокая (124 МПа), это выше сдвиговых прочностей КМУ Т300 и КМУ Т700. Сдвиговая прочность КМУ Т800 с матрицами 5228 больше 100 МПа; а сдвиговая прочность КМУ Т800 с матрицами 5405 еще ниже (90,3МПа).

Анализируя приведенные данные табл. 2, можно отметить, что в зависимости от типа связующего прочность на сдвиг у КМУ Т800 резко изменяется и имеет большее значение при связующем TDE-85, в то время как для материалов КМУ Т300 и КМУ 700 можно отметить слабое влияние типа связующих на сдвиговую прочность.

Таблица 2

Механические свойства разных матричных материалов и КМУ

Типы матричных материалов	Прочность на растяжение, GПа	Предельные разрушения, %	Модуль упругости при растяжении, GПа	Сдвиговая прочность, МПа		
				Т300	Т700	Т800
5405	84,7	3,8	3,1	-	83,9	90,3
5228	86,0	3,4	3,5	82,6	87,1	101,0
TDE-85	101,0	4,1	3,5	89,0	92,0	124,0

Анализ сечений образцов КМУ Т800, разрушенных от изгиба

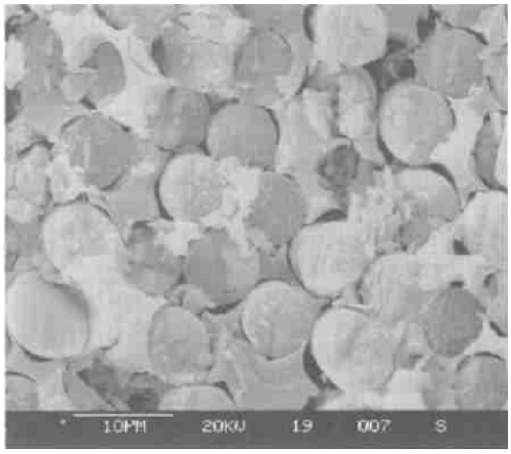
С помощью электронного микроскопа сканирования (SEM) проведено исследование плотности в сечениях образцов КМУ Т800, разрушенных под действием сил изгиба. Фотографии срезов показывают неоднозначность влияния разных матричных материалов на свойства поверхности раздела КМУ Т800.

На рис. 2, а показано место разрушения в сечении для КМУ Т800 с матрицей 5405. Ясно видно, что в сечении имеются пустоты, зазоры между волокном и матрицей, рыхлость структуры поверхностной оболочки.

На рис. 2, б представлено аналогичное сечение КМУ Т800 с матрицей TDE-85. В сечении сколы практически отсутствуют, поверхность разрушения ровная, без пустот, склеивание между волокнами и матрицей отличное.

Анализ экспериментальных данных показывает, что плотность и структура связи между волокном Т800 и матрицей 5405 недостаточная для получения высоких характеристик; разрушение в сечении наступает по границам раздела, что приводит к возникновению рыхлости поверхности за счет плохого сцепления связи матрица-волокно.

а) б)



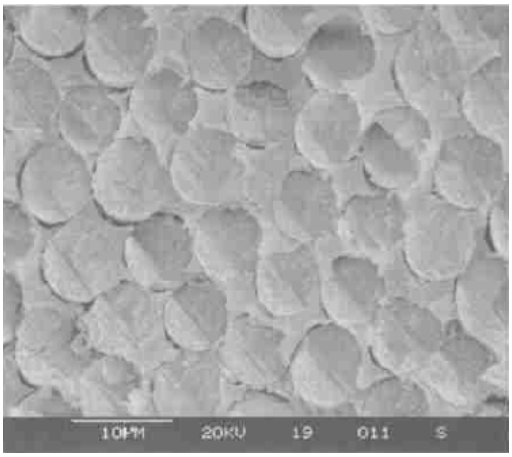


Рис. 2. Сечения образцов из КМУ Т800 с использованием:
а - КМУ 5405/Т800; б - КМУ TDE-85/Т800 (электронный микроскоп сканирования)

Поверхность раздела у КМУ Т800 с матрицей TDE-85 - плотная, структура без трещин, пустот, адгезия хорошая, что позволяет связующему передавать и распределять нагрузку более равномерно на все волокна, что в конечном итоге увеличивает прочность КМУ Т800 и улучшает его свойства.

Выводы

Результаты исследований сечений образцов КМУ Т800 с матрицей TDE-85, разрушенных от изгиба, показывают, что если поверхность раздела будет обработана специальным аппретом, то прочность сцепления волокон с матрицей значительно будет выше и даже превзойдет когезионную прочность матрицы.

1. Матричные материалы с применяемыми аппретами оказывают большое влияние на свойства КМУ Т800.

2. Поверхностная оболочка, создаваемая аппретом Е-51, является самой лучшей для углеродных волокон Т800 при соединении с эпоксидным связующим TDE-85 и обеспечивает высокую прочность поверхностной адгезии волокна-матрицы. Прочность на растяжение КМУ Т800 с аппретом Е-51 и матрицей TDE-85 имеет самое высокое значение.

3. Сдвиговая прочность составляет 124 МПа для КМУ Т800 с матрицей TDE-85 и аппретом Е-51, что выше сдвиговой прочности для КМУ Т800 с другими матрицами (5405 и 5228).

4. Анализ сечений образцов при разрушении от изгиба для КМУ Т800 с матрицей TDE-85 показывает, что адгезионные свойства поверхности раздела отличные, нет пустот, трещин между волокном и матрицей. У КМУ Т800 с матрицей 5405 структура поверхностного раздела между волокном и матрицей рыхлая, что ведет к плохой адгезии между волокном и матрицей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Композиционные материалы, Т. 6. Поверхности раздела в полимерных композитах / под ред. Э. Плюдемана: М. : Мир, 1978. – 296 с.
2. WANG Xiao-jie, Liang Guo-zheng. High-performance carbon fiber surface analysis and mechanical properties. Journal of Aeronautical Materials, 2006 (4) :119-122
3. Jian-Wen Bao, Bang-Ming Tang, Shen Baohua .5228/T800 study the mechanical properties of composite materials. Fiber composite materials, 1997 (4): 28-31.
4. Bogoeva-Gaceva G, Mader E, Haussler L, et al. Character-ization of the surface and interphase of plasma-treated HM carbon fibers. Composite Part A, 1997, 28(5):445-452.
5. Hughess J D H. The carbon fiber/epoxy interface; A review. Composite Science and Technology, 1991, 41(2) 147-159.
6. Lee J, Soutis C. Thickness effect on the compressive strength of T800/924C carbon fibre-epoxy laminates. Composites Part A, 2005, 36(2):213-227.
7. Guo HL, Zhong WH, Zhang ZG, Zhang BY, Yi XS, Characterization and analysis on several carbon fibers. Acta Material Composite Sinica, 2001; 18:38-42.
8. Chen WM, Wang CZ, Zhou TY, Yang XP, High-performance resin matrix for T800 carbon fiber composite. Acta Material Composite Sinica, 2006; 23:29-35
9. Wu Renjie. Composites. Tianjin: Tianjin University Press, 2000.
10. HUANG Y D. Influence of ultrasonic treatment on the characteristics of epoxy resin and interfacial property of its carbon fiber composites. Composites Science and Technology, 2002, 62: 2153-2159.
11. PARK Soo Jin. Effect of fiber-polymer interactions on fracture toughness behavior of carbon fiber-resinforced epoxy matrix composites. Journal of Colloid and Interface Science, 2000, 22: 287-291.
12. ZHANG De-qing. Carbon fiber (CF) grafted on the surface of polyimide (PMR-15)-based composite material properties of the interface. Journal of Composite Materials, 2001 (1): 50-54.
13. CHEN W M, YU Y H, LI P,et al. Compos. Sci. Techol. , 2007, 67(11-12): 2261-2270.

Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета № II-1(2) 2010

Мысик Р.К., Сулицин А.В., Брусницын С.В.
R. K.Mysik, A.V.Sulitsin, S.V.Brusnitsin

ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ ВЫСОКОХРОМОВОЙ БРОНЗЫ

INVESTIGATION OF CASTING AND DEFORMATION FEATURES OF HIGH CHROMIUM BRONZE

Мысик Раиса Константиновна – доктор технических наук, профессор кафедры «Литейное производство и упрочняющие технологии» ГОУВПО «Уральский государственный технический университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург). E-mail: kafedralp@mail.ru.
Ms. Raisa K. Mysik – Doctor of Engineering, Professor of The Department of Foundry Engineering and Strengthening Technology, the Urals State Technical University named after Boris Yeltsin, (city of Yekaterinburg), e-mail: kafedralp@mail.ru.

Сулицин Андрей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Литейное производство и упрочняющие технологии» ГОУВПО «Уральский государственный технический университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург). E-mail: kafedralp@mail.ru.
Mr. Andrey V. Sulitsin – PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Foundry Engineering and Strengthening Technology, the Urals State Technical University named after Boris Yeltsin, (city of Yekaterinburg), e-mail: kafedralp@mail.ru.

Брусницын Сергей Викторович – доктор технических наук, доцент кафедры «Литейное производство и упрочняющие технологии» ГОУВПО «Уральский государственный технический университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург). E-mail: kafedralp@mail.ru.
Mr. Sergey V. Brusnitsyn - Doctor of Engineering, Associate Professor at the Department of Foundry Engineering and Strengthening Technology, the Urals State Technical University named after Boris Yeltsin, (city of Yekaterinburg), e-mail: kafedralp@mail.ru.

Аннотация: В работе рассмотрены технология получения высокохромовой бронзы и возможности ее дальнейшей пластической деформации, показано влияние различных видов термомеханической обработки на свойства высокохромовой бронзы.

Summary: The paper examines the technology of producing high chromium bronze. Potentials for its further plastic deformation are considered. The article also shows the influence of different ways of thermal and mechanical treatment on the properties of high chromium bronze.

Ключевые слова: высокохромовая бронза, легирование, деформация, термическая обработка.

Keywords: high chromium bronze, alloying, deformation, heat treatment.

УДК 621.74:669.35.6

В промышленном производстве появилось новое направление совместного использования меди и хрома в композициях, в которых хрома содержится от 0,8 до 30 % и более. В зарубежной технической литературе эти материалы получили название HIGH CHROMIUM

Поступила в редакцию 12.05.2010 г.

COPPER BASE ALLOY [2] – высокохромовых сплавов на основе меди в отличие от низколегированной хромовой бронзы. Разработка и применение этих сплавов связаны с дальнейшим улучшением характеристик электротехнических и конструкционных материалов. Цель настоящей работы состояла в получении высокохромового сплава и определении возможности его дальнейшей пластической обработки.

Известно, что легирование меди хромом можно осуществлять двумя способами – лигатурой медь-хром и чистым хромом. Выплавку лигатуры желательно вести в вакуумной печи во избежание насыщения ее кислородом и больших потерь хрома. Однако при выплавке лигатуры расплав необходимо перегревать до температуры 1600 ºС и выдерживать его в печи до полного растворения хрома около 1 ч. Это приводит к частым заменам графитового тигля, а также взаимодействию расплава с графитом и графито-шамотной воронкой, вымыванию из тигля частиц графита и увлечению их в расплав. В результате в полуфабрикатах из сплавов Cu-Cr наблюдаются включения темного цвета [3]. Далее, поскольку содержание хрома в лигатуре не велико (как правило, не превышает 6 – 7 %), то доля лигатуры в составе шихты значительна и иногда достигает 22 – 25 %. Более того, неоднородность лигатуры по составу затрудняет шихтовку сплава. Имеется опыт получения полуфабриката сплава Cu-Cr с содержанием хрома 18 – 22 %, предусматривающий быстрый нагрев и расплавление шихты, перегрев расплава до 1600 – 1700 ºС, введение хрома и разливку при температуре 1450 – 1500 ºС в водоохлаждаемую изложницу. Высокая температура расплава приводит к быстрому выходу тигля из строя, насыщению расплава газами и большой вероятности образования горячих трещин.

Шихта для плавки состояла из катодной меди марки М1к по ГОСТ 859-2001, металлического хрома марки Х98,5 по ГОСТ 5905-2004 и раскислителя – магния марки Мг90 по ГОСТ 804-93. Плавку проводили в вакуумной индукционной печи. После расплавления меди при температуре расплава 1260 – 1280 ºС вводили магний, после него присаживали хром в медной фольге. Отливку слитка проводили в чугунную изложницу диаметром 250 мм и высотой 500 мм.

Химический анализ сплава показал содержание в нем хрома около 4 %. Этот слиток являлся шихтовой заготовкой для дальнейшего его переплава. При последующем расплавлении этой шихтовой заготовки в расплав вводили хром, раздробленный на куски диаметром 3 – 5 мм. Шихтовали на содержание хрома около 30 %. Расплав разлили в изложницу. Анализ химического состава сплава проводили на оптическом эмиссионном спектрометре SPECTROLAB S. Анализ показал значительную неоднородность сплава по содержанию хрома. В среднем содержание хрома в сплаве составило 16 – 17 %.

Из полученного слитка вырезали темплеты, которые подвергали различным видам исследования и термомеханической обработки.

Микроструктура полученного слитка приведена на рис. 1. Полученный материал представляет собой твердый раствор хрома в меди, включающий частицы нерастворенного хрома.

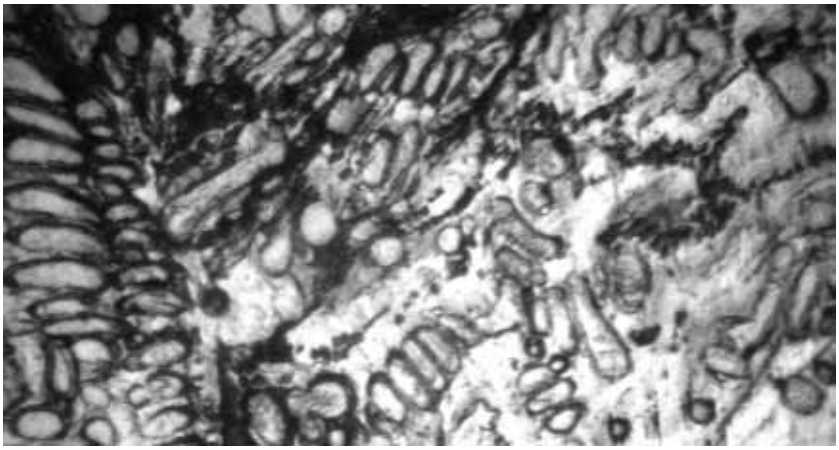


Рис. 1. Микроструктура высокохромовой бронзы, х100

В качестве вариантов обработки давлением применены горячая ковка и холодная осадка, в качестве вариантов термической обработки – отжиг, закалка и старение.

Использованы следующие методы испытания образцов: определение твердости по Бринеллю НВ шариком диаметром 10 мм, определение напряжения пластического течения σ_s (сопротивления деформации) при осадке кубических образцов.

Измерение твердости образцов в литом состоянии показало значительный разброс значений в пределах 43 – 67 при среднем значении 55 и при отклонениях от этой величины в пределах 22 %. Это говорит о высокой неоднородности распределения механических свойств, что может быть обусловлено различиями в химическом и фазовом составе, а также структуре сплава.

Закалка образцов производилась путем нагрева до температуры 920 ^{o}C, выдержки в печи в воздушной среде в течение 20 мин и охлаждения в воде. Поскольку образцы имели небольшую массу, то времени выдержки оказывалось достаточно для их прогрева, большую выдержку не применяли из-за опасности чрезмерного окисления хрома. Микроструктура сплава в литом состоянии после закалки представлена на рис. 2.

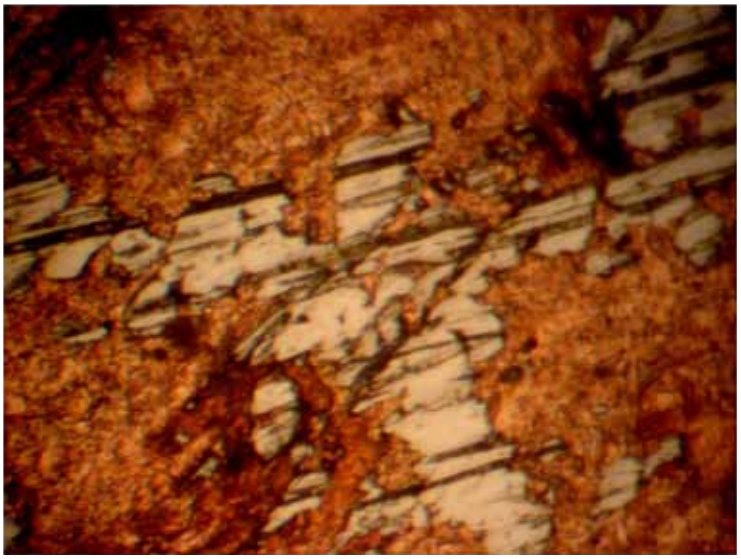


Рис. 2. Микроструктура литого высокохромового сплава

В результате закалки диапазон значений твердости НВ составил 57 – 62 единиц при среднем значении 60 единиц и при отклонениях от этой величины в пределах 4 %, что говорит о выравнивании механических свойств в результате такой термообработки.

Часть образцов была подвергнута горячей ковке на молоте в температурном диапазоне 700 – 900 ^{o}C при относительных обжатиях 50 – 70 %. В горячем состоянии материал показал высокий уровень пластичности. Диапазон твердости НВ в результате такой обработки составил 72 – 80 при среднем значении 76 и при отклонениях от среднего значения в пределах 11 %. Такой большой диапазон отклонений объясняется неоднородным остыванием образцов на более холодных бойках молота.

Применение после горячей ковки отжига при 920 ^{o}C в течение 20 мин привело к уменьшению твердости до 64 – 66 единиц с отклонениями в 1 %, что говорит о выравнивании механических характеристик по объему. Закалка с той же температуры обеспечила получение твердости 69 – 72 НВ, что выше, чем в случае отжига, на 9 %. На рис. 3, 4 показаны микроструктуры сплава после ковки и отжига, а также после горячей ковки при 920 ºС, деформации 60 % и старения при 500 ºС в течение 20 мин.

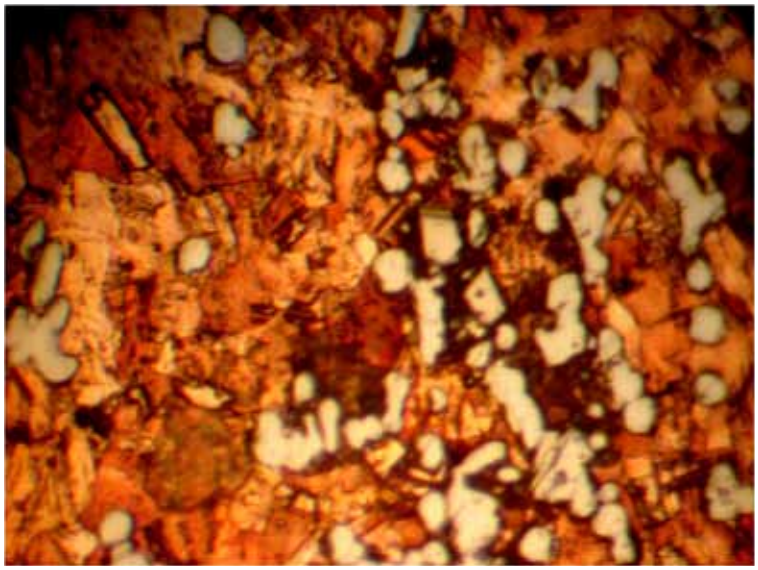


Рис. 3. Микроструктура высокохромового сплава
после горячей ковки при 920 ºС, х100

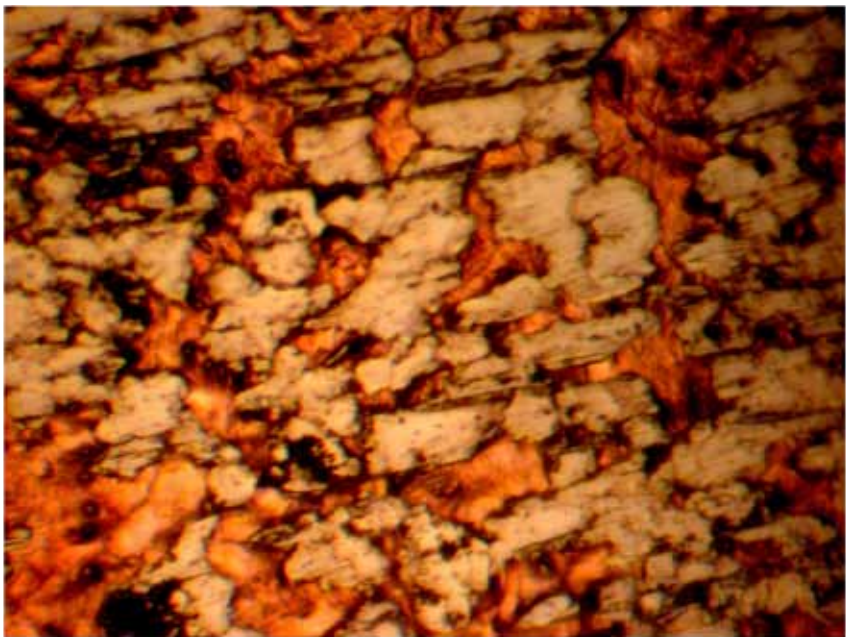


Рис. 4. Микроструктура высокохромового сплава после горячей ковки
при 920 ºС, закалки с 920 ºС и старения при 500 ºС в течение 20 мин, х100

После закалки применили операцию холодной осадки на шлифованных бойках со смазкой в двух вариантах проведения экспериментов. В первом варианте выполняли осадку с замером силы деформации в пошаговой процедуре нагружения, что позволило рассчитать напряжение перехода в пластическое состояние (сопротивление деформации) в функции относительного обжатия. В результате построена кривая упрочнения для сплава в этом состоянии (см. рис. 5).

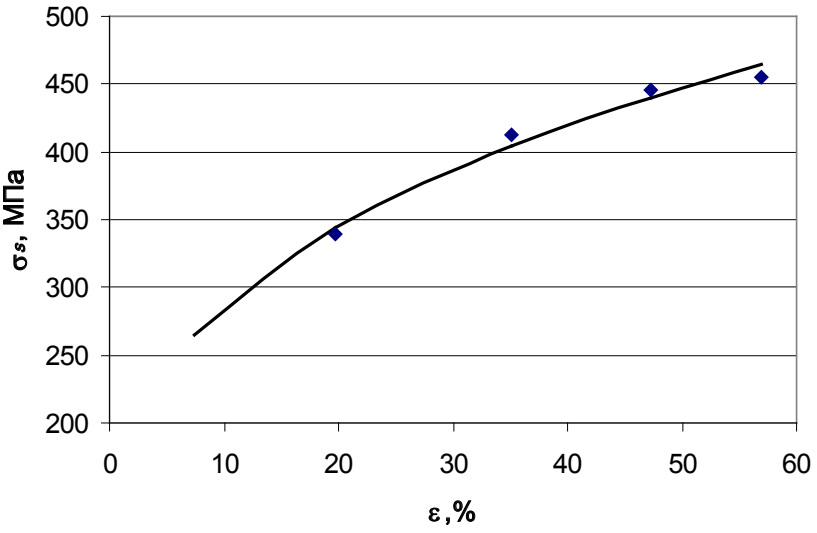


Рис. 5. Зависимость сопротивления деформации высокохромовой бронзы от относительного обжатия при холодной осадке после горячей деформации и закалки

Поскольку основу материала составляет матрица из низкохромовой бронзы с включениями хрома, то можно сравнить эти данные с величиной предела текучести для этой бронзы. По данным справочника [1] для закаленного состояния хромовых бронз с содержанием хрома от 0,85 до 1,0 % характерны пределы текучести от 60 до 99 МПа в зависимости от химсостава и состояния заготовки (литая, горячекованная, прессованная, горячекатаная, холоднокатаная). Как видно из графика, даже при относительном обжатии 10 % полученное значение сопротивления деформации 260 МПа превышает предел текучести низкохромовой бронзы в 3 – 4 раза.

Для возможности выполнения инженерных расчетов график зависимости рис. 5 аппроксимирован функцией вида

$$\sigma_s = 50 + 111\varepsilon^{0,325}, \qquad (1)$$

где ε выражено в процентах, область определения ε = 10 – 60 %.

На рис. 6 отражены результаты измерения твердости образцов, предварительно закаленных, а затем деформированных с различной величиной обжатия при холодной осадке. Видно, что в исследованном интервале обжатий твердость закаленной бронзы удается увеличить с 72 до 114 единиц, для сравнения можно отметить, что твердость низкохромовой бронзы в состоянии закалки составляет 65 единиц.

В справочнике [1] рассмотрены различные режимы старения низкохромовой бронзы. В поставленных опытах был выбран режим выдержки при температуре 500 °С в течение 20 мин. Относительно малое время старения было выбрано исходя из учета опасности окисления и газонасыщения хрома. Судя по данным источника [1], этот режим обеспечивает для сплава меди с 0,91 % хрома достижение максимальной твердости около 110 НВ. В условиях опыта в результате старения была повышена твердость до 134 единиц. Следует отметить, что режимы термомеханической обработки в данном исследовании, скорее всего, не являются оптимальными, об этом говорит тот факт, что при обработке низкохромовой бронзы при применении только операции старения достигают увеличения твердости на 50 единиц (с 60 до 110 НВ), т.е. почти вдвое, чего не было достигнуто в опытах. В связи с этим для нахождения оптимальных параметров термомеханической обработки нужны дополнительные эксперименты.

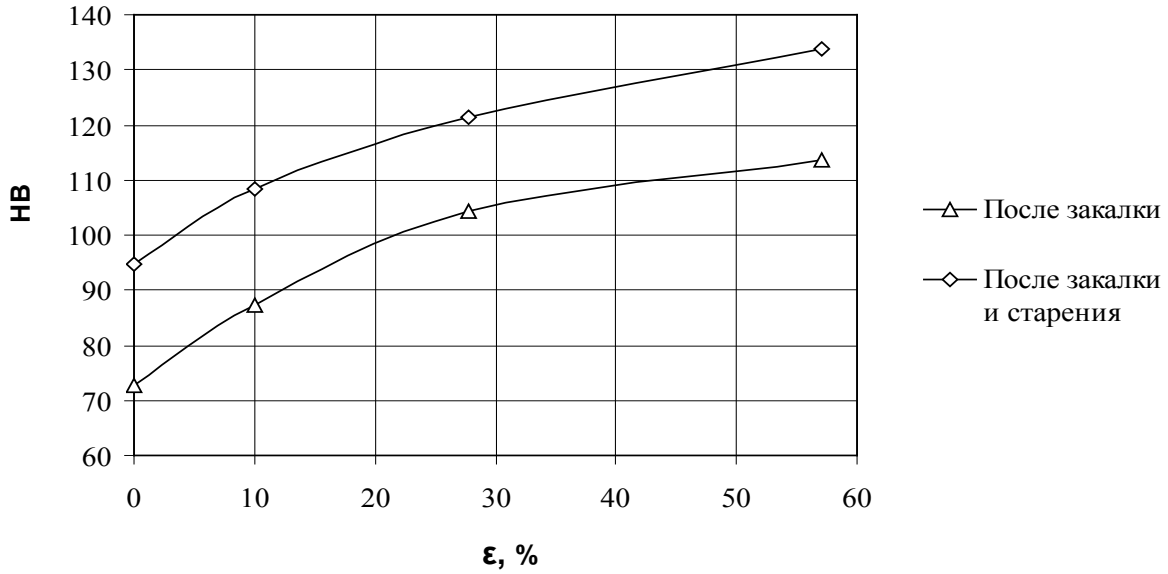


Рис. 6. Зависимость твердости от относительного обжатия для высокохромовой бронзы при холодной деформации

На рис. 7 представлена сводная диаграмма, которая позволяет оценить характер каждой из операций обработки в формировании свойств высокохромовой бронзы.

Рис. 7. Зависимость твердости высокохромовой бронзы от вида термомеханической обработки

Из диаграммы видно, что методами улучшения свойств бронзы из литого состояния являются деформация и термическая обработка, выполняемые в определенной последовательности.

Работа выполнялась при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых Российских ученых.

ЛИТЕРАТУРА

1. Осинцев, О.Е. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки: справочник / О.Е. Осинцев, В.Н. Федоров. – М.: Машиностроение, 2004. – 336 с.
2. Пат. 6065659 Япония, МКИ C22B9/20; C22C1/02; C22C9/00; C22B9/16. Manufacture of high chromium copper base alloy/ Nakanishi Masamitsu; Nakanishi Akira; Wakaumi Hisao; заявитель Nakanishi Masamitsu; publ. 08.03.94.
3. Производство отливок из цветных сплавов / А.В. Курдюмов [и др.]. – М.: МИСиС, 1996. – С. 502.