

СИСТЕМНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

УДК 539.3 + 629.7

П.П. Белоножко

**ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ДЕФОРМИРУЕМЫХ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ СИСТЕМАМИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ**

Введение

Представление деформируемых упругих конструкций расчетными схемами вида совокупностей твердых тел, соединенных шарнирами – один из перспективных подходов к моделированию динамики сложных технических систем. Его привлекательность обусловлена, в частности, наличием современных программных инструментов, предназначенных для моделирования динамики систем твердых тел, например, программный комплекс “Универсальный механизм”, или пакет SimMechanics в составе MatLab. Применительно к пространственно развитым периферийным элементам космических аппаратов [1–6] актуальной является также возможность использования методов разработки систем управления для механических объектов с конечным числом степеней свободы. Одна из основных трудностей, сопряженных с использованием твердотельных расчетных схем, связана с необходимостью разработки критериев их эквивалентности расчетным схемам с распределенными параметрами.

В настоящей работе описан критерий динамической эквивалентности расчетных схем пространственно развитого периферийного элемента космического аппарата (КА) вида упругой балки и вида цепи шарнирно связанных твердых тел, основанный на сравнении передаточных функций [7–8].

Критерий динамической эквивалентности

Рассмотрим космический комплекс, состоящий из жесткого корпуса, моделируемого твердым телом, и присоединенного периферийного элемента (выдвижной штанги, фермы, панели солнечной батареи), моделируемого балкой, или цепью тел. Подобные

механические модели используются для исследования влияния упругих движений периферийного элемента на динамику комплекса [1–3, 7–9]. Разделим движение системы на перемещение КА с "отвердевшим" периферийным элементом как твердого тела, и движение системы, обусловленное упругими колебаниями периферийного элемента. Первая составляющая может быть охарактеризована движением системы координат O_0 , связанной с недеформированным комплексом "КА–периферийный элемент", по отношению к некоторой инерциальной системе отсчета. Вторая составляющая характеризуется изменением вследствие деформаций периферийного элемента координат точек комплекса "КА–периферийный элемент" в системе O_0 . Для определенности будем рассматривать поперечные колебания периферийного элемента. Движение комплекса в целом будем полагать таким, что обеспечивается малость упругих отклонений точек от недеформированного положения, т.е. возможна линеаризация уравнений движения по отношению к системе координат O_0 . Далее ограничимся рассмотрением плоского случая.

Является очевидным требование равенства массово-инерционных характеристик "отвердевших" расчетных схем "КА–балка" и "КА–цепь тел". Для сопоставления упругих движений достаточно рассмотреть движение периферийного элемента по отношению к системе координат XYZ под действием силы и момента, приложенных со стороны КА в точке крепления, а также сил и моментов, приложенных к периферийному элементу извне.

На рис. 1 изображена расчетная схема периферийного элемента, представляющая собой совокупность трех последовательно соединенных твердых тел, движущаяся в плоскости XOY инерциальной системы координат XYZ . На рис. 1 обозначено:

$C_i(x_i, y_i, 0)$, m_i , I_i , – соответственно центр масс, масса и момент инерции вокруг оси, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости движения, i -го тела, $i = 1, 2, 3$;

$n_0(x_0, y_0, 0)$ – точка крепления тела 1 к КА;

$\vec{r}_0(x_0, y_0, 0)$ – радиус-вектор точки крепления относительно начала координат;

$n_{12}(x_{12}, y_{12}, 0)$, $n_{23}(x_{23}, y_{23}, 0)$ – точки шарнирного соединения тел 1 и 2 и 2 и 3 соответственно;

$n_{33}(x_{33}, y_{33}, 0)$ – точка предполагаемого присоединения следующего тела к цепи;

$\bar{l}_1 = \overline{n_1 n_{12}}$, $\bar{l}_2 = \overline{n_{12} n_{23}}$, $\bar{l}_3 = \overline{n_{23} n_{33}}$ – векторы, проходящие через центры масс соответствующих тел, в дальнейшем для модулей векторов используется обозначение l_i , $i = 1, 2, 3$;

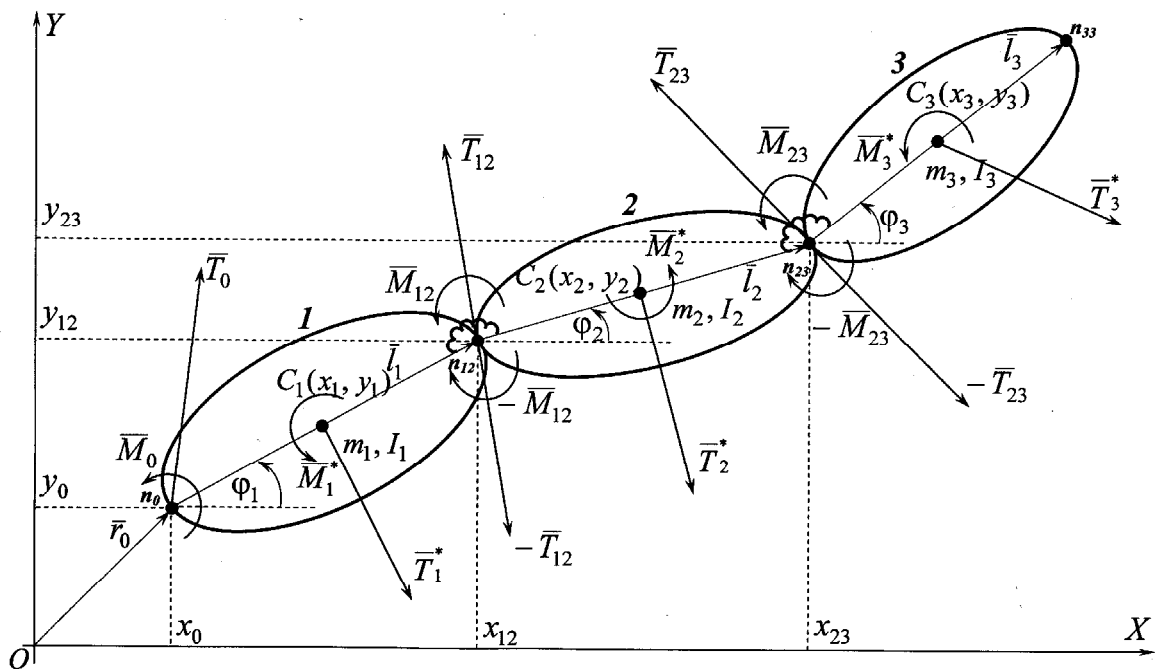


Рисунок 1 – Расчетная схема упруго деформируемого периферийного элемента КА

φ_i – углы между положительными направлениями оси OX и векторов \bar{l}_i , отсчитываемые против часовой стрелки, $i = 1, 2, 3$;

\bar{T}_0 , \bar{M}_0 – сила и момент, приложенные к телу 1 со стороны КА в точке крепления n_0 ;

\bar{T}_{12} , \bar{M}_{12} , \bar{T}_{23} , \bar{M}_{23} – силы и моменты в шарнирах;

\bar{T}_i^* , \bar{M}_i^* – главный вектор и главный момент (вокруг центра масс C_i) внешних возмущающих сил, приложенных к i -му телу, $i = 1, 2, 3$;

Будем полагать возникающий в шарнирах упругий момент линейно зависящим от угла поворота тел друг относительно друга:

$$M_{12} = c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2), \quad M_{23} = c_{23}(\varphi_2 - \varphi_3), \quad (1)$$

где M_{12}, M_{23} – проекции моментов в шарнирах на ось OZ , системы координат XYZ ;

c_{12}, c_{23} – постоянные коэффициенты, характеризующие упругие свойства соответствующих шарниров.

Равенства (1) записаны в предположении отсутствия диссипации энергии в шарнирах.

Введем вспомогательные векторы:

$$\bar{A}_i = \begin{bmatrix} \cos \varphi_i \\ \sin \varphi_i \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{A}_i' = \frac{d\bar{A}_i(\varphi_i)}{d\varphi_i} = \begin{bmatrix} -\sin \varphi_i \\ \cos \varphi_i \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\bar{A}_i'' = \frac{d^2\bar{A}_i(\varphi_i)}{d\varphi_i^2} = \begin{bmatrix} -\cos \varphi_i \\ -\sin \varphi_i \\ 0 \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, 3.$$

Так как центры масс тел расположены на векторах \bar{l}_i , их положение может быть определено заданием безразмерных коэффициентов k_i , характеризующих относительное расстояние от начала вектора \bar{l}_i до центра масс тела C_i , $i = 1, 2, 3$. Тогда радиусы-векторы центров масс тел:

$$\bar{r}_1 = \bar{r}_0 + k_1\bar{l}_1, \quad \bar{r}_2 = \bar{r}_0 + \bar{l}_1 + k_2\bar{l}_2, \quad \bar{r}_3 = \bar{r}_0 + \bar{l}_1 + \bar{l}_2 + k_3\bar{l}_3. \quad (3)$$

С учетом (1-3) уравнения динамики рассматриваемой цепи тел могут быть записаны в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_1[\ddot{\bar{r}}_0 + k_1 l_1(\ddot{\varphi}_1 \bar{A}_1' + \dot{\varphi}_1^2 \bar{A}_1'')] = \bar{T}_0 - \bar{T}_{12} + \bar{T}_1^*, \\ m_2[\ddot{\bar{r}}_0 + l_1(\ddot{\varphi}_1 \bar{A}_1' + \dot{\varphi}_1^2 \bar{A}_1'') + k_2 l_2(\ddot{\varphi}_2 \bar{A}_2' + \dot{\varphi}_2^2 \bar{A}_2'')] = \bar{T}_{12} - \bar{T}_{23} + \bar{T}_2^*, \\ m_3[\ddot{\bar{r}}_0 + l_1(\ddot{\varphi}_1 \bar{A}_1' + \dot{\varphi}_1^2 \bar{A}_1'') + l_2(\ddot{\varphi}_2 \bar{A}_2' + \dot{\varphi}_2^2 \bar{A}_2'') + k_3 l_3(\ddot{\varphi}_3 \bar{A}_3' + \dot{\varphi}_3^2 \bar{A}_3'')] = \\ = \bar{T}_{23} + \bar{T}_3^*, \\ I_1 \ddot{\varphi}_1 \bar{k}_z = \bar{M}_0 - c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) \bar{k}_z - k_1 l_1 \bar{A}_1 \times \bar{T}_0 - (1 - k_1) l_1 \bar{A}_1 \times \bar{T}_{12} + \bar{M}_1^*, \\ I_2 \ddot{\varphi}_2 \bar{k}_z = c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) \bar{k}_z - c_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) \bar{k}_z - k_2 l_2 \bar{A}_2 \times \bar{T}_{12} - \\ - (1 - k_2) l_2 \bar{A}_2 \times \bar{T}_{23} + \bar{M}_2^*, \\ I_3 \ddot{\varphi}_3 \bar{k}_z = c_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) \bar{k}_z - k_3 l_3 \bar{A}_3 \times \bar{T}_{23} + \bar{M}_3^*, \end{array} \right. \quad (4)$$

где \bar{k}_z – орт оси OZ , системы координат XYZ , символом “ \times ” обозначено векторное произведение векторов.

Эквивалентная (4) система скалярных уравнений относительно независимых обобщенных координат $x_0, y_0, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ имеет вид:

$$(m_1 + m_2 + m_3)\ddot{x}_0 - (m_1k_1 + m_2 + m_3)l_1\ddot{\varphi}_1 \sin \varphi_1 - (m_2k_2 + m_3)l_2\ddot{\varphi}_2 \sin \varphi_2 - \\ - m_3k_3l_3\ddot{\varphi}_3 \sin \varphi_3 - (m_1k_1 + m_2 + m_3)l_1\dot{\varphi}_1^2 \cos \varphi_1 - (m_2k_2 + m_3)l_2\dot{\varphi}_2^2 \cos \varphi_2 - \\ - m_3k_3l_3\dot{\varphi}_3^2 \cos \varphi_3 = T_{0x} + T_{1x}^* + T_{2x}^* + T_{3x}^*, \quad (5)$$

$$(m_1 + m_2 + m_3)\ddot{y}_0 + (m_1k_1 + m_2 + m_3)l_1\ddot{\varphi}_1 \cos \varphi_1 + (m_2k_2 + m_3)l_2\ddot{\varphi}_2 \cos \varphi_2 + \\ + m_3k_3l_3\ddot{\varphi}_3 \cos \varphi_3 - (m_1k_1 + m_2 + m_3)l_1\dot{\varphi}_1^2 \sin \varphi_1 - (m_2k_2 + m_3)l_2\dot{\varphi}_2^2 \sin \varphi_2 - \\ - m_3k_3l_3\dot{\varphi}_3^2 \sin \varphi_3 = T_{0y} + T_{1y}^* + T_{2y}^* + T_{3y}^*,$$

$$m_1(1 - k_1)l_1\ddot{x}_0 \sin \varphi_1 - m_1(1 - k_1)l_1\ddot{y}_0 \cos \varphi_1 + [I_1 - m_1k_1(1 - k_1)l_1^2]\ddot{\varphi}_1 = \\ = M_0 - c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) + l_1T_{0x} \sin \varphi_1 - l_1T_{0y} \cos \varphi_1 + \\ + (1 - k_1)l_1T_{1x}^* \sin \varphi_1 - (1 - k_1)l_1T_{1y}^* \cos \varphi_1 + M_1^*,$$

$$[m_1 + m_2(1 - k_2)]l_2\ddot{x}_0 \sin \varphi_2 - [m_1 + m_2(1 - k_2)]l_2\ddot{y}_0 \cos \varphi_2 - \\ - [m_1k_1 + m_2(1 - k_2)]l_1l_2\ddot{\varphi}_1 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) + [I_2 - m_2k_2(1 - k_2)l_2^2]\ddot{\varphi}_2 = \\ = c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) - c_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) + [m_1k_1 + m_2(1 - k_2)]l_1l_2\dot{\varphi}_1^2 \sin(\varphi_2 - \varphi_1) + \\ + l_2T_{0x} \sin \varphi_2 - l_2T_{0y} \cos \varphi_2 + l_2T_{1x}^* \sin \varphi_2 - l_2T_{1y}^* \cos \varphi_2 + \\ + (1 - k_2)l_2T_{2x}^* \sin \varphi_2 - (1 - k_2)l_2T_{2y}^* \cos \varphi_2 + M_2^*,$$

$$(m_1 + m_2)k_3l_3\ddot{x}_0 \sin \varphi_3 - (m_1 + m_2)k_3l_3\ddot{y}_0 \cos \varphi_3 - \\ - (m_1k_1 + m_2)k_3l_1l_2\ddot{\varphi}_1 \cos(\varphi_3 - \varphi_1) - m_2k_2k_3l_2l_3\ddot{\varphi}_2 \cos(\varphi_3 - \varphi_2) + I_3\ddot{\varphi}_3 = \\ = c_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) + (m_1k_1 + m_2)k_3l_1l_3\dot{\varphi}_1^2 \sin(\varphi_3 - \varphi_1) + \\ + m_2k_2k_3l_2l_3\dot{\varphi}_2^2 \sin(\varphi_3 - \varphi_2) + k_3l_3T_{0x} \sin \varphi_3 - k_3l_3T_{0y} \cos \varphi_3 + \\ + k_3l_3T_{1x}^* \sin \varphi_3 - k_3l_3T_{1y}^* \cos \varphi_3 + k_3l_3T_{2x}^* \sin \varphi_3 - k_3l_3T_{2y}^* \cos \varphi_3 + M_3^*,$$

где $T_{0x}, T_{ix}^*, T_{0y}, T_{iy}^*$ – проекции сил на оси OX и OY , $i = 1, 2, 3$,

M_0, M_i^* – проекции моментов на ось OZ , $i = 1, 2, 3$.

Будем полагать, что исходному недеформированному положению комплекса КА–периферийный элемент соответствует расположение точки n_0 в начале координат и центров масс на оси абсцисс. Очевидно, что в отсутствие силовых воздействий данное положение периферийного элемента будет равновесным:

$$\begin{aligned}
 x_0(t) &\equiv 0, & y_0(t) &\equiv 0, & \varphi_1(t) &\equiv 0, & \varphi_2(t) &\equiv 0, & \varphi_3(t) &\equiv 0, \\
 T_{0x}(t) &\equiv 0, & T_{0y}(t) &\equiv 0, & M_0(t) &\equiv 0, \\
 T_{1x}^*(t) &\equiv 0, & T_{1y}^*(t) &\equiv 0, & M_1^*(t) &\equiv 0, \\
 T_{2x}^*(t) &\equiv 0, & T_{2y}^*(t) &\equiv 0, & M_2^*(t) &\equiv 0, \\
 T_{3x}^*(t) &\equiv 0, & T_{3y}^*(t) &\equiv 0, & M_3^*(t) &\equiv 0.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Линеаризованные в окрестности положения (6) уравнения (5) имеют вид:

$$\left\{ \begin{aligned}
 (m_1 + m_2 + m_3)\Delta\ddot{x}_0 &= \Delta T_{0x} + \Delta T_{1x}^* + \Delta T_{2x}^* + \Delta T_{3x}^*, \\
 (m_1 + m_2 + m_3)\Delta\ddot{y}_0 + (m_1k_1 + m_2 + m_3)l_1\Delta\ddot{\phi}_1 + \\
 + (m_2k_2 + m_3)l_2\Delta\ddot{\phi}_2 + m_3k_3l_3\Delta\ddot{\phi}_3 &= \Delta T_{0y} + \Delta T_{1y}^* + \Delta T_{2y}^* + \Delta T_{3y}^*, \\
 -[m_1(1 - k_1)]l_1\Delta\ddot{y}_0 + [I_1 - m_1k_1(1 - k_1)l_1^2]\Delta\ddot{\phi}_1 + c_{12}\Delta\phi_1 - c_{12}\Delta\phi_2 = \\
 -l_1\Delta T_{0y} + \Delta M_0 - [(1 - k_1)l_1]\Delta T_{1y}^* + \Delta M_1^*, \\
 -[m_1 + m_2(1 - k_2)]l_2\Delta\ddot{y}_0 - [m_1k_1 + m_2(1 - k_2)]l_1l_2\Delta\ddot{\phi}_1 + \\
 + [I_2 - m_2k_2(1 - k_2)l_2^2]\Delta\ddot{\phi}_2 - c_{12}\Delta\phi_1 + (c_{12} + c_{23})\Delta\phi_2 - c_{23}\Delta\phi_3 = \\
 = -l_2\Delta T_{0y} - l_2\Delta T_{1y}^* - (1 - k_2)l_2\Delta T_{2y}^* + \Delta M_2^*, \\
 -[(m_1 + m_2)k_3l_3]\Delta\ddot{y}_0 - [(m_1k_1 + m_2)k_3l_1l_3]\Delta\ddot{\phi}_1 - m_2k_2k_3l_2l_3\Delta\ddot{\phi}_2 + \\
 + I_3\Delta\ddot{\phi}_3 - c_{23}\Delta\phi_2 + c_{23}\Delta\phi_3 = \\
 = -k_3l_3\Delta T_{0y} - k_3l_3\Delta T_{1y}^* - k_3l_3\Delta T_{2y}^* + \Delta M_3^*.
 \end{aligned} \right. \tag{7}$$

Символом "Δ" обозначены отклонения соответствующих переменных от положения (6). Так как рассматриваются отклонения от нулевых значений, символ "Δ" в дальнейшем опущен.

Первое уравнение системы (7), описывающее движение периферийного элемента как твердого тела вдоль оси абсцисс, не зависит от остальных, и может рассматриваться отдельно.

Введем векторы переменных состояния \bar{z} , силовых воздействий \bar{u} и координат, характеризующих вертикальное перемещение и поворот сечения, примыкающего к КА, \bar{y} в соответствии с равенством:

$$\begin{aligned}
 \bar{z} &= \bar{z}(t) = [y_0, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dot{y}_0, \dot{\phi}_1, \dot{\phi}_2, \dot{\phi}_3]^T, \\
 \bar{u} &= \bar{u}(t) = [T_{0y}, M_0, T_{1y}^*, T_{2y}^*, T_{3y}^*, M_1^*, M_2^*, M_3^*]^T, \\
 \bar{y} &= \bar{y}(t) = [y_0, \varphi_1]^T,
 \end{aligned}$$

где "T" – символ транспонирования.

Тогда уравнения (7) в пространстве состояний могут быть записаны в виде:

$$\begin{aligned}\dot{\bar{z}} &= \bar{A}\bar{z} + \bar{B}\bar{u}, \\ \bar{y} &= \bar{C}\bar{z},\end{aligned}\quad (8)$$

где \bar{A} , \bar{B} и \bar{C} – матрицы, составленные из коэффициентов системы (7).

Обозначим изображения по Лапласу векторов \bar{z} , \bar{u} и \bar{y} соответственно \bar{Z} , \bar{U} и \bar{Y} :

$$\bar{Z}(s) = L\{\bar{z}(t)\}, \quad \bar{U}(s) = L\{\bar{u}(t)\}, \quad \bar{Y}(s) = L\{\bar{y}(t)\}$$

где s – переменная преобразования Лапласа.

При нулевых начальных условиях уравнения (8) в изображениях по Лапласу:

$$\begin{cases} \bar{Z}(s) = (s\bar{E} - \bar{A})^{-1}\bar{B}\bar{U}(s), \\ \bar{Y}(s) = \bar{C}(s\bar{E} - \bar{A})^{-1}\bar{U}(s), \end{cases}\quad (9)$$

где \bar{E} – единичная матрица 8×8 .

Обозначим

$$\bar{W}(s) = \bar{C}(s\bar{E} - \bar{A})^{-1}.$$

Матрица $\bar{W}(s)$ размерности 8×2 представляет собой матрицу передаточных функций системы. Входными величинами являются компоненты вектора $\bar{U}(s)$, выходными – компоненты вектора $\bar{Y}(s)$.

Запишем вектор \bar{u} в виде:

$$\bar{u} = [\bar{u}_1, \bar{u}_2]^T, \quad \bar{u}_1 = [T_{0y}, M_0], \quad \bar{u}_2 = [T_{1y}^*, T_{2y}^*, T_{3y}^*, M_1^*, M_2^*, M_3^*], \quad (10)$$

тогда

$$\begin{aligned}\bar{U}_1(s) &= L\{\bar{u}_1(t)\}, \\ \bar{U}_2(s) &= L\{\bar{u}_2(t)\}.\end{aligned}$$

Соответственно матрицу $\bar{W}(s)$ можно представить в блочном виде:

$$\bar{W}(s) = [\bar{W}_1(s), \bar{W}_2(s)], \quad (11)$$

где $\bar{W}_1(s)$ имеет размерность 2×2 , а $\bar{W}_2(s)$ – размерность 6×2 .

Перепишем второе равенство из (9) с учетом (10) и (11):

$$\bar{Y}(s) = [\bar{W}_1(s), \bar{W}_2(s)] \begin{bmatrix} \bar{U}_1(s) \\ \bar{U}_2(s) \end{bmatrix} = \bar{W}_1(s)\bar{U}_1(s) + \bar{W}_2(s)\bar{U}_2(s). \quad (12)$$

По смыслу введенных обозначений $\overline{\overline{W}}_1(s)$ есть матрица передаточных функций от воздействий на периферийный элемент со стороны космического аппарата, а матрица $\overline{\overline{W}}_2(s)$ – матрица передаточных функций от внешних воздействий. Выходными величинами являются компоненты вектора $\overline{Y}(s)$.

В развернутом виде матрица $\overline{\overline{W}}_1(s)$ определяется равенством:

$$\overline{\overline{W}}_1(s) = \begin{bmatrix} W_{T_{0y}y_0}(s) & W_{T_{0y}\varphi_1}(s) \\ W_{M_0y_0}(s) & W_{M_0\varphi_1}(s) \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где $\overline{\overline{W}}_{T_{0y}y_0}(s)$ – передаточная функция от T_{0y} к y_0 ,

$\overline{\overline{W}}_{M_0y_0}(s)$ – передаточная функция от M_0 к y_0 ,

$\overline{\overline{W}}_{T_{0y}\varphi_1}(s)$ – передаточная функция от T_{0y} к φ_1 ,

$\overline{\overline{W}}_{M_0\varphi_1}(s)$ – передаточная функция от M_0 к φ_1 .

Рассмотрим случай отсутствия воздействий на периферийный элемент извне. Тогда выражение (12) преобразуется к виду:

$$\overline{Y}(s) = \overline{\overline{W}}_1(s)\overline{U}_1(s).$$

Если учитывать два первых тона поперечных колебаний, система уравнений движения периферийного элемента вида упругой балки под действием силы и момента, приложенных в точке крепления, также может быть приведена к виду:

$$\overline{Y}(s) = \overline{\overline{\tilde{W}}}_1(s)\overline{U}_1(s),$$

где $\overline{\overline{\tilde{W}}}_1(s)$ – матрица передаточных функций, элементы которой имеют тот же смысл, что и элементы матрицы $\overline{\overline{W}}_1(s)$:

$$\overline{\overline{\tilde{W}}}_1(s) = \begin{bmatrix} \tilde{W}_{T_{0y}y_0}(s) & \tilde{W}_{T_{0y}\varphi_1}(s) \\ \tilde{W}_{M_0y_0}(s) & \tilde{W}_{M_0\varphi_1}(s) \end{bmatrix}.$$

Отметим, что физический смысл переменных y_0 , φ_1 , T_{0y} , M_0 при переходе от расчетной схемы вида цепи тел к расчетной схеме вида упругой балки сохраняется. Таким образом, равенство матричных передаточных функций $\overline{\overline{W}}_1(s)$ и $\overline{\overline{\tilde{W}}}_1(s)$ является формальным критерием динамической эквивалентности сопоставляемых расчетных схем:

$$\overline{\overline{W}}_I(s) = \widetilde{\overline{W}}_I(s). \quad (14)$$

Выполнение (14) означает одинаковое движение примыкающего к КА торцевого сечения периферийного элемента, представленного балкой и цепью тел, под действием силы и момента, приложенного со стороны КА, т.е. одинаковое расчетное влияние на динамику комплекса упругих колебаний идеализированного сопоставляемыми вариантами расчетных схем периферийного элемента.

Влияние конструктивных параметров расчетной схемы вида цепи тел на ее динамическую эквивалентность расчетной схеме вида упругой балки

Будем полагать тела цепи твердыми стержнями – фрагментами "отвердевшей" балки круглого поперечного сечения длиной l и массой m , равномерно распределенной по длине. При этом очевидно совпадение массово-инерционных характеристик "отвердевших" расчетных схем. Центры масс расположены в серединах стержней ($k_1 = k_2 = k_3 = 0.5$). Упругие характеристики шарниров одинаковы ($c_{12} = c_{23} = c$). Длины стержней:

$$l_1 = l_3 = \frac{(1-k)l}{2}, \quad l_2 = kl,$$

где k – относительная длина среднего стержня.

Передаточные функции (13) представим в виде:

$$W_{rq} = \frac{k_{rq}(s^2 + n_{1rq}^2)(s^2 + n_{2rq}^2)}{(s^2 + \omega_1^2)(s^2 + \omega_2^2)}, \quad (15)$$

где ω_1, ω_2 – собственные частоты системы,

k_{rq}, n_{1rq}, n_{2rq} – параметры числителей передаточных функций,

r – индекс усилия, принимающий значения " T_{0y} " и " M_0 ",

q – индекс перемещения, принимающий значения " y_0 " и φ_1 .

Тогда условия полной динамической эквивалентности (14) могут быть записаны в виде:

$$\omega_j = \tilde{\omega}_j, \quad k_{rq} = \tilde{k}_{rq}, \quad n_{jrq} = \tilde{n}_{jrq}, \quad j = 1, 2, \quad (16)$$

где тильдой обозначены параметры передаточных функций, соответствующие упругой балке. Полагая эти параметры заданными, проанализируем вид зависимостей параметров передаточных функций

(16) для цепи тел как функций конструктивных параметров m, l, c, k расчетной схемы.

Выражения для собственных частот системы имеют вид:

$$\begin{aligned}\omega_1 &= \frac{\sqrt{c}}{l\sqrt{m}} \omega_1^*(k), & \omega_1^*(k) &= \frac{4\sqrt{6}}{(k-1)\sqrt{1+2k-3k^2}}, \\ \omega_2 &= \frac{\sqrt{c}}{l\sqrt{m}} \omega_2^*(k), & \omega_2^*(k) &= \frac{4\sqrt{6}}{k(k-1)\sqrt{3-2k-k^2}},\end{aligned}\quad (17)$$

и их отношение зависит только от k :

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\omega_1^*(k)}{\omega_2^*(k)} = \frac{k\sqrt{k+3}}{\sqrt{3k+1}}. \quad (18)$$

Подобно соотношениям (17) для собственных частот, соотношения для параметров числителей передаточных функций (15) также могут быть представлены в виде произведения двух сомножителей, один из которых зависит только от k , а второй от m, l и c :

$$\begin{aligned}k_{T_{0y}y_0} &= \frac{1}{m} k_{T_{0y}y_0}^*(k), & n_{jT_{0y}y_0} &= \frac{\sqrt{c}}{l\sqrt{m}} n_{jT_{0y}y_0}^*(k), \\ k_{M_{0y}y_0} &= \frac{1}{ml} k_{M_{0y}y_0}^*(k), & n_{jM_{0y}y_0} &= \frac{\sqrt{c}}{l\sqrt{m}} n_{jM_{0y}y_0}^*(k), \\ k_{T_{0y}\varphi_1} &= \frac{1}{ml} k_{T_{0y}\varphi_1}^*(k), & n_{jT_{0y}\varphi_1} &= \frac{\sqrt{c}}{l\sqrt{m}} n_{jT_{0y}\varphi_1}^*(k), \\ k_{M_{0\varphi_1}} &= \frac{1}{ml^2} k_{M_{0\varphi_1}}^*(k), & n_{jM_{0\varphi_1}} &= \frac{\sqrt{c}}{l\sqrt{m}} n_{jM_{0\varphi_1}}^*(k), \\ j &= 1, 2.\end{aligned}\quad (19)$$

Выражения для входящих в (19) отмеченных символом "*" сомножителей, зависящих от k , достаточно громоздки. Удобнее производить анализ соответствующих графических зависимостей, полученных после непосредственной подстановки численных значений в (8) при помощи соответствующих программных инструментов (например, пакета прикладных программ Control System Toolbox, входящего в состав MatLAB), минуя стадию символьных преобразований.

В качестве примера на рис. 2 изображены графики зависимостей $\omega_1^*(k), \omega_2^*(k), n_{1T_{0y}y_0}^*(k), n_{2T_{0y}y_0}^*(k), k_{T_{0y}y_0}^*(k)$. Из соотношений (17–19) и графиков на рис. 2 очевидно, что при заданных m, l и c выбором,

например, собственных частот $\omega_1^*(k)$ и $\omega_2^*(k)$ (из диапазона возможных значений), однозначно определяются все остальные параметры передаточных функций (15).

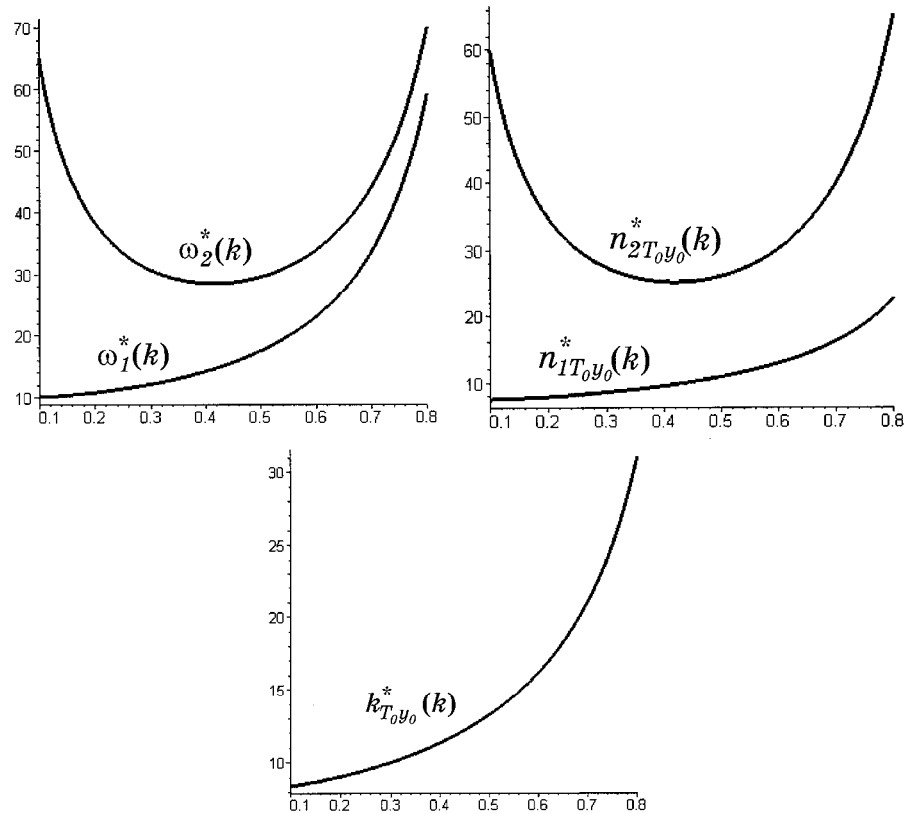


Рисунок 2 – Зависимости параметров передаточных функций цепи тел от относительной длины среднего звена

Рассмотрим цилиндрическую балку со следующими конструктивными параметрами:

$$\tilde{l} = 15 \text{ м}, \tilde{d} = 0.012 \text{ м}, \tilde{\rho} = 7800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \tilde{E} = 2.06 \cdot 10^{11} \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}. \quad (20)$$

где \tilde{l} – длина балки,

\tilde{d} – диаметр балки,

$\tilde{\rho}$ – плотность материала балки,

\tilde{E} – модуль Юнга материала балки.

Примем, что диаметр, плотность и модуль Юнга балки постоянны по длине. Тогда масса балки будет равна $\tilde{m} = 13.232 \text{ кг}$.

В соответствии с требованием равенства массово-инерционных характеристик “отвердевших” расчетных схем, примем для цепи тел:

$$l = 15 \text{ м}, m = 13.232 \text{ кг}.$$

Первая и вторая собственные частоты изгибных колебаний балки при значениях конструктивных параметров (20):

$$\tilde{\omega}_1 = 1.533 \frac{1}{c}, \quad \tilde{\omega}_2 = 4.2257 \frac{1}{c}.$$

Те же собственные частоты

$$\omega_1 = 1.533 \frac{1}{c}, \quad \omega_2 = 4.2257 \frac{1}{c}$$

будет иметь цепь тел при

$$k = 0.26985, \quad c = 51.325 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

При этом остальные параметры передаточных функций будут иметь следующие значения:

$$\begin{aligned} \tilde{k}_{T_0y_0} &= 0.9069 \frac{\text{м}}{\text{Н} \cdot \text{с}^2}, & k_{T_0y_0} &= 0.7321 \frac{\text{м}}{\text{Н} \cdot \text{с}^2}, \\ \tilde{k}_{M_0y_0} &= \tilde{k}_{T_0y\varphi_1} = -0.2823 \frac{1}{\text{Н} \cdot \text{с}^2}, & k_{M_0y_0} &= k_{T_0y\varphi_1} = -0.1743 \frac{1}{\text{Н} \cdot \text{с}^2}, \\ \tilde{k}_{M_0\varphi_1} &= 0.1160 \frac{1}{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2}, & k_{M_0\varphi_1} &= 0.0541 \frac{1}{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2}, \\ \tilde{n}_{1T_0y_0} &= 1.0648 \frac{1}{c}, & n_{1T_0y_0} &= 1.0977 \frac{1}{c}, \\ \tilde{n}_{1M_0y_0} &= \tilde{n}_{1T_0y\varphi_1} = 0.7105 \frac{1}{c}, & n_{1M_0y_0} &= n_{1T_0y\varphi_1} = 0.7815 \frac{1}{c}, \\ \tilde{n}_{1M_0\varphi_1} &= 0.4690 \frac{1}{c}, & n_{1M_0\varphi_1} &= 0.5613 \frac{1}{c}, \\ \tilde{n}_{2T_0y_0(2)} &= 3.5124 \frac{1}{c}, & n_{2T_0y_0} &= 3.7917 \frac{1}{c}, \\ \tilde{n}_{2M_0y_0} &= \tilde{n}_{2T_0y\varphi_1} = 2.9837 \frac{1}{c}, & n_{2M_0y_0} &= n_{2T_0y\varphi_1} = 3.4521 \frac{1}{c}, \\ \tilde{n}_{2M_0\varphi_1} &= 2.5745 \frac{1}{c}, & n_{2M_0\varphi_1} &= 3.1515 \frac{1}{c}. \end{aligned}$$

Поскольку не все равенства (16) выполняются точно, можно говорить о достижении частичной динамической эквивалентности. При этом следует отметить относительно небольшое отличие не совпадающих точно параметров, что гарантирует близость сопоставляемых динамических характеристик. Более точного выполнения равенств (16) можно достичь, например, введением дополнительных варьируемых параметров, характеризующих перераспределение массы тел цепи без нарушения принятых ранее допущений о ее геометрических и массово-инерционных характеристиках как твердого тела.

Выводы

Предложенный в работе подход к сопоставлению расчетных схем с распределенными и сосредоточенными параметрами ориентирован на использование при моделировании динамики космических аппаратов с пространственно развитыми деформируемыми периферийными элементами. Использование аппарата передаточных

функций обеспечивает определенную степень гибкости процедуры выбора конструктивных параметров, что может представлять интерес с точки зрения применения современных компьютерных средств моделирования динамики на ранних стадиях проектирования космических комплексов и разработки систем управления. В частности, возможен оперативный анализ влияния изменений конструктивного облика деформируемых элементов на динамику комплекса в целом.

Проведенные расчеты показали, что для обеспечения динамической эквивалентности балки и цепи тел необходимо введение в рассмотрение дополнительных варьируемых конструктивных параметров твердотельной расчетной схемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алпатов А.П., Белоножко П.А., Горбунцов В.В., Ивлев О.Г., Чернявская С.С., Шичанин В.Н. Динамика пространственно развитых механических систем изменяемой конфигурации – К.: Наукова думка, 1990. – 256 с.
2. Згуровский М.З., Бидюк П.И. Анализ и управление большими космическими конструкциями / Национальный технический ун-т Украины “Киевский политехнический ин-т”. – К.: Наукова думка, 1997. – 451 с.
3. Баничук Н.В., Карпов И.И., Климов Д.М. и др. Механика больших космических конструкций. – М.: Факториал, 1997. – 302 с.
4. Алпатов А.П., Белоножко П.А., Белоножко П.П., Витушкин А.А., Фоков А.А. Большие отражающие поверхности в космосе. Антенны спутниковой связи // Системные технологии – 2007. – № 3(50). – С. 73 – 87.
5. Алпатов А.П., Белоножко П.А., Белоножко П.П., Витушкин А.А., Фоков А.А. Большие отражающие поверхности в космосе. Радиотелескопы, солнечные концентраторы, плоские отражатели // Системные технологии – 2007. – № 3(50). – С. 88 – 101.
6. А.П. Алпатов, П.А. Белоножко, П.П. Белоножко, С.В. Григорьев, А. А. Фоков Актуальные задачи динамики космических аппаратов с пространственно развитыми периферийными элементами // Техническая механика. – 2007. – № 2. – С. 32 – 38.
7. Белоножко П.А., Белоножко П.П., Фоков А. А. Сопоставление механических расчетных схем пространственно развитых космических объектов методом сравнения передаточных функций // Сборник докладов и тезисов международной научно-практической конференции «Информационные технологии в управлении сложными системами». – Днепропетровск, 2008. – С. 81–82.
8. Белоножко П.А., Белоножко П.П., Фоков А. А. Использование аппарата передаточных функций для определения параметров механического эквивалента периферийного протяженного элемента в составе КА // Сборник докладов и тезисов международной научно-

- практической конференции «Информационные технологии в управлении сложными системами». – Днепропетровск, 2008. – С. 83.
9. Закржевский А.Е. Об оптимальном угле разворота упругого космического аппарата // Прикладная механика – 2003. – т. 39. – № 1. – С. 106 – 113.

УДК 622.788

М.Н. Бойко, Д.А. Ковалев, Н.Д. Ванюкова

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНОСТИ, ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЖИГА, ГЛИНОЗЕМИСТОГО И МАГНЕЗИАЛЬНОГО ИНДЕКСОВ НА КАЧЕСТВО ОКАТЫШЕЙ

Постановка проблемы. При производстве окатышей большое внимание уделяется проблемам снижения расхода энергоресурсов и повышению качества конечного продукта. Создание исходных условий для получения в процессе обжига связки и рудной части благоприятного химического и минералогического состава может значительно улучшить качественные характеристики обожженных окатышей.

Для характеристики подготовленности шихты к процессам феррито- и силикатообразования, помимо основности, предложено использовать глиноземный Al_2O_3/SiO_2 и магнезиальный MgO/SiO_2 индексы в качестве оценочных характеристик реакционной способности шихты. [1]

Постановка задачи. Для практического применения предложенных индексов необходимо комплексное исследование влияния основности, глиноземистого и магнезиального индексов, а также температуры обжига на показатели качества окатышей, что и явилось предметом исследования настоящей работы.

Методика исследования. Поставленная задача решалась методом планирования эксперимента. Исследование выполнили в соответствии с ортогональным композиционным планом второго порядка для четырёх факторов [2].

В исследовании использовали шихтовые материалы, химический состав которых приведён в таблице 1.

В качестве факторов эксперимента были выбраны:

Основность (CaO/SiO_2) – X_1 ; глиноземистый индекс (отношение Al_2O_3/SiO_2) – X_2 ; магнезиальный индекс (отношение MgO/SiO_2) – X_3 ; температура обжига – X_4 . Интервал варьирования и величины уровней факторов приведены в таблице 2.

Все двадцать пять опытов были выполнены с обеспечением рандомизации. Опыты, в которых полученная прочность имеет максимальное, минимальное значение и для нулевой точки были повторены дважды.

Таблица 1

Химический состав компонентов шихты

Материал	Содержание, %						
	Fe _{о6}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
Концентрат	65	26,49	66,28	5,05	0,2	0,08	0,3
Известняк	0,47	0	0,7	1,6	0,8	53,5	0,7
MgO (ч.д.а.)	0	0	0	0	0	0	100
Al ₂ O ₃ (ч.д.а.)	0	0	0	0	100	0	0
Бентонит	4,1	0	6,08	62,28	13,56	1,7	1,94

Таблица 2

Натуральные значения факторов для уровней

Номер фактора	Наименование фактора	Уровни факторов				
		-1,41	-1	0	1	1,41
1	Основность CaO/вЮг	0,318	0,4	0,6	0,8	0,882
2	Отношение Al ₂ O ₃ /8Ю2	0,118	0,2	0,4	0,6	0,682
3	Отношение МёО/8Ю2	0,1513	0,18	0,25	0,32	0,3487
4	Температура обжига, °С	1221,8	1230	1250	1270	1278,2

Получение брикетов. Компоненты шихты для конкретного опыта дозировались согласно рассчитанному составу шихт (таблица 3), исходя из общей массы шихты 0,2 кг на один опыт. Смешивание производили в ручном смесителе мешкового типа в течение 0,5 минут. После шихту выгружали в фарфоровую чашу, добавляли влагу (10 % от массы шихты) и повторно перемешивали в ватше в течении 2 минут.

При наборе шихты для каждого брикета использовали объёмное дозирование, которое позволяет получать брикеты в колебаниями по высоте $\Delta H \pm 1$ мм. Диаметр брикетов постоянный и равен 10 мм.

Брикетиrowание осуществляли на прессе РМ-1 с усилием 350 кг/брикет или 275 кг/см².

Обжиг брикетов. Полученные брикеты сушили в сушильном шкафу при температуре 115 °С в течение 2 часов.

Окатыши обжигали в вертикальной силитовой печи мощностью 6 КВт. Температуру внутри печи контролировали с помощью термопары PtRh10. Предварительно печь разогревали до требуемой температуры обжига согласно плану эксперимента (таблица 3). Сухие

брикеты в количестве 30 штук помещались в корзинку из нихромовой проволоки. Корзинка с пробой помещалась в печь с заданной температурой и выдерживалась в естественной атмосфере в течение 15 минут. Предварительно для определения влияния времени обжига на прочность окатышей продолжительность выдержки составляла 5, 10 и 15 минут.

Таблица 3

Расчетный состав шихт и прочность окатышей

Номер опыта	Содержание компонента, %					Прочность на сжатие, кг/ок
	Концентрат	Известняк	MgO	Al ₂ O ₃	Бентонит	
1	95,14	2,68	0,64	0,75	0,80	88,75
2	89,71	7,52	1,31	0,68	0,80	97,65
3	94,44	2,66	1,38	0,74	0,80	103,71
4	93,16	2,63	0,63	2,82	0,80	110,17
5	88,53	7,42	0,58	2,70	0,80	95,09
6	90,36	7,57	0,59	0,69	0,80	124,89
7	92,48	2,61	1,35	2,80	0,80	79,30
8	87,91	7,37	1,28	2,68	0,80	98,56
9	95,14	2,68	0,64	0,75	0,80	123,79
10	90,36	7,57	0,59	0,69	0,80	106,16
11	93,16	2,63	0,63	2,82	0,80	78,04
12	94,44	2,66	1,38	0,74	0,80	84,81
13	87,91	7,37	1,28	2,68	0,80	89,03
14	92,48	2,61	1,35	2,80	0,80	103,35
15	89,71	7,52	1,31	0,68	0,80	106,07
16	88,53	7,42	0,58	2,70	0,80	94,81
17	94,79	1,61	1,01	1,81	0,80	83,94
18	88,20	8,42	0,93	1,68	0,80	110,25
19	92,77	5,18	0,98	0,29	0,80	118,76
20	90,10	5,03	0,96	3,16	0,80	99,77
21	91,88	5,13	0,46	1,75	0,80	96,15
22	90,95	5,07	1,47	1,73	0,80	67,39
22*	90,95	5,07	1,47	1,73	0,80	71,25
23	91,41	5,10	0,97	1,74	0,80	68,59
23*	91,41	5,10	0,97	1,74	0,80	64,5
24	91,41	5,10	0,97	1,74	0,80	150,88
25	91,41	5,10	0,97	1,74	0,80	117,81
25*	91,41	5,10	0,97	1,74	0,80	123,45
24,5	91,41	5,10	0,97	1,74	0,80	86,23
24,10	91,41	5,10	0,97	1,74	0,80	114,18
24,15*	91,41	5,10	0,97	1,74	0,80	143,78

* - повторные опыты, 24,5; 24,10; 24,15 время обжига 5, 10, 15 мин соответственно

После обжига корзинка извлекалась из печи и брикеты охлаждались на воздухе до температуры менее 80 °С.

Определения прочности брикетов. Прочность брикетов после обжига определяли с помощью пресса РМ-1.

Пересчет прочности на сжатие брикет-окатыш. Для оценки прочности окатышей на основе определенной прочности брикетов был проведен следующий эксперимент.

Брикеты диаметром 10 мм, изготовленные из шихт, которые использовались в основном эксперименте, подвергались обжигу по принятой методике при температурах 1220-1280 °С. Для сравнения при тех же условиях обжигались окатыши диаметром 10-12 мм, полученные на тарельчатом окомкователе диаметром 1 м. Из обожженных брикетов вырезали окатыши (шарики) диаметром 10 мм. Результаты сравнения прочности на сжатие брикетов в вертикальном (площадь основания брикетов диаметром 10 мм составляет см²) и горизонтальном (по образующей цилиндра) положениях, полученных шариков и окатышей приведены в таблице 4.

Графически результаты сравнения и уравнения для пересчетов прочности брикетов (в вертикальном и горизонтальном положениях) на прочность окатышей диаметром 10 мм приведены на рисунке 1.

Таблица 4

Сравнение прочности брикетов и окатышей

№п.п.	Прочность на сжатие брикетов и окатышей, кг/бр (ок)			
	Брикеты, диаметр 10 мм			Окатыши, диаметр 10-12 мм
	Вертикально	Горизонтально	Шарик (выточен)	
1	379	92	62	43
2	455	97	91	61
3	477	119	96	66
4	-	165	124	123
5	-	341	268	142
Пересчет на кг/см ² *	556,4			

Таким образом экспериментально обоснована методика пересчета прочности брикетов (кг/бр) на прочность окатышей (кг/ок).

Результаты исследования. Результаты измерения прочности обожженных брикетов и рассчитанной прочности окатышей показаны в таблице 3. Зависимость прочности окатышей от времени обжига при температуре 1280 °С графически представлена на рисунке 2.

На основе экспериментальных результатов, полученных в соответствии с планом экспериментов, была разработана математическая модель для расчета прочности на сжатие окатышей.

Коэффициент корреляции факторов относительно выходной характеристики (прочность окатышей на сжатие) составил 0,9.

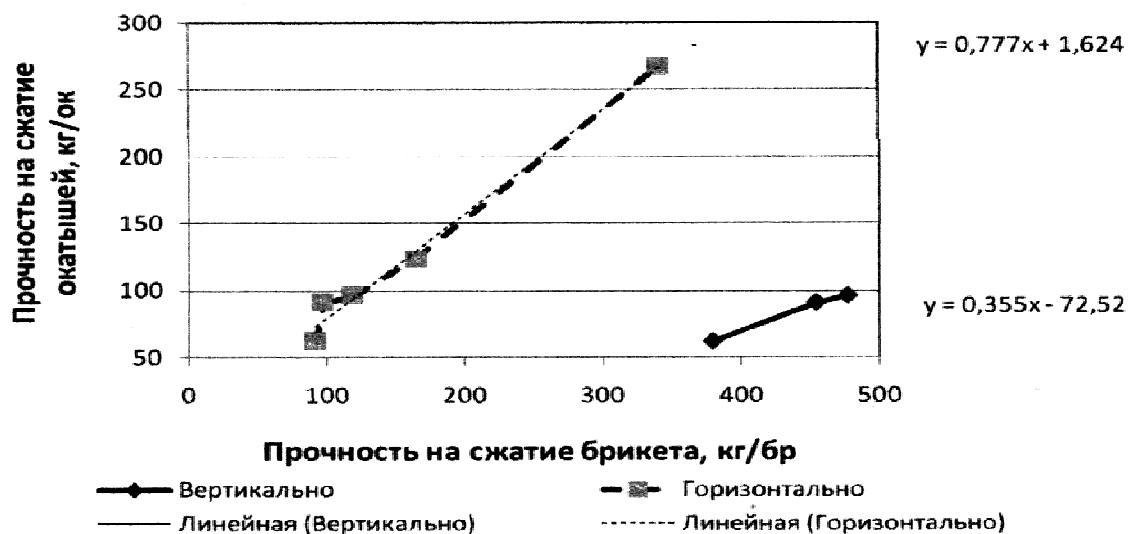


Рисунок 1 - Сравнение прочности на сжатие брикетов и окатышей
Получены следующие коэффициенты полинома:

1. Коэффициенты регрессии полинома:

$$b_1 = 4,301684, b_2 = -6,34702, b_3 = -5,54278, b_4 = 14,5853.$$

2. Эффекты взаимодействия факторов:

$$b_{12} = -1,69173, b_{13} = -0,00343, b_{14} = -4,60653, b_{23} = 2,71758, \\ b_{24} = -0,97864, b_{34} = -1,54501.$$

3. Коэффициенты регрессии при квадратичных факторах:

$$b_{11} = -6,45534, b_{22} = 5,811341, b_{33} = -21,9015, b_{44} = 6,285032.$$

4. Свободный член полинома:

$$b_0 = 99,90854.$$

После записи рассчитанных коэффициентов в отрезок ряда Тейлора, получили полином, отражающий зависимость прочности окатышей на раздавливание в модели от перечисленных выше факторов:

$$\begin{aligned} & \Pi - 99,90854 + 4,301684 \cdot X_1 - 6,34702 \cdot X_2 - 5,54278 \cdot X_3 + 14,5853 \cdot X_4 \\ & - 1,69173 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,00343 \cdot X_1 \cdot X_3 - 4,60653 \cdot X_1 \cdot X_4 + 2,71758 \cdot X_2 \cdot X_3 \\ & - 0,97864 \cdot X_2 \cdot X_4 - 1,54501 \cdot X_3 \cdot X_4 - 6,45534 \cdot X_1^2 + 5,811341 \cdot X_2^2 \\ & - 21,9015 \cdot X_3^2 + 6,285032 \cdot X_4^2 \end{aligned}$$

Чтобы отделить значимые члены полинома от незначимых, подсчитали дисперсию эксперимента по повторным опытам: $S_{оп}^2 = 867,6$.

Проверили воспроизводимость процесса по критерию Кохрена, выборке $k = 4$ и степени свободы $3G_{рас} = 0,59 < G_{таб}^{0,05} = 0,9065$

Воспроизводимость достаточна.

Проверили адекватность математической модели реальному процессу. Для этого рассчитали по полученному полиному параметры оптимизации для условий опыта. Дисперсия адекватности: $S_{ад}^2 = 367,87$.

Критерий Фишера: $F_{рас} = 0,424 < F_{таб}^{0,05} = 5,8$.

Следовательно, модель адекватна, т. е. полином достаточно точно описывает процесс изменения прочности окатышей под влиянием различных факторов.



Рисунок 2 - Зависимость прочности окатышей от времени обжига

На рисунках 3,4,5 показаны рассчитанные по модели зависимости прочности окатышей на сжатие от основности, отношения Al_2O_3/SiO_2 , отношения MgO/SiO_2 при различных температурах.

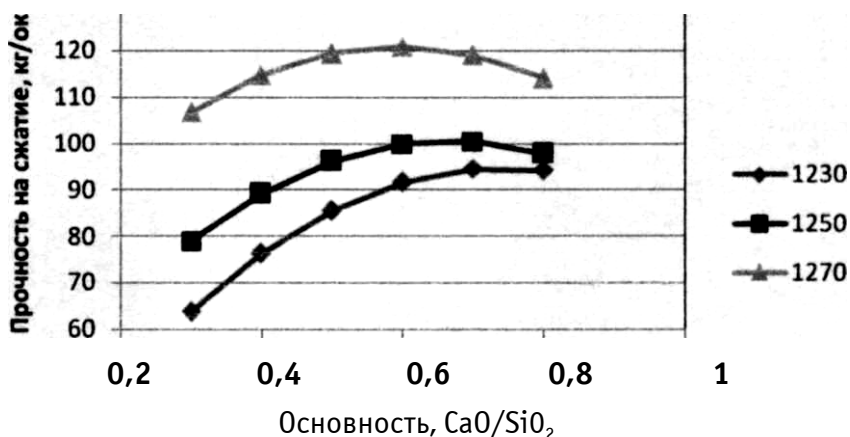


Рисунок 3 - Зависимость прочности окатышей от основности CaO/SiO_2 при различных температурах (модель)

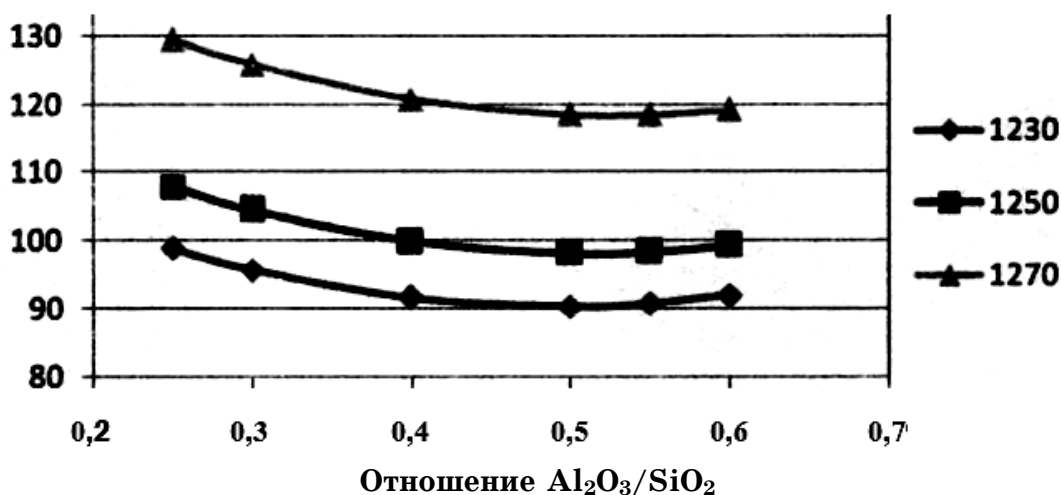


Рисунок 4 - Зависимость прочности окатышей от отношения Al_2O_3/SiO_2 при различных температурах (модель)

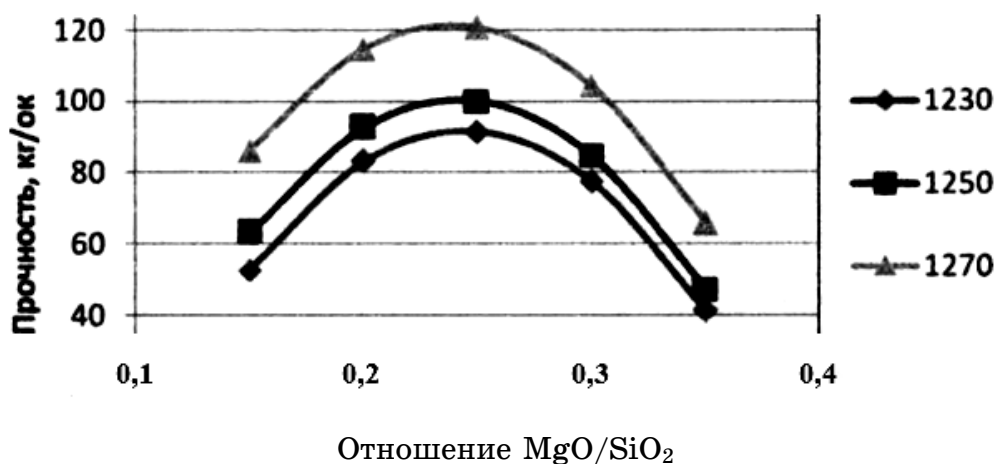


Рисунок 5 - Зависимость прочности окатышей от отношения MgO/SiO_2 при различных температурах (модель)

На рисунке 6 показаны полученные на основе опытных данных зависимости прочности окатышей от температуры обжига, основности, отношения Al_2O_3/SiO_2 , отношения MgO/SiO_2 при различных температурах.

Окатыши, как продукт высокотемпературной обработки, можно представить состоящим из трёх элементов структуры: кристаллической рудной части, шлакообразующей связки и порового пространства. При этом рудная составляющая (оксиды железа) определяют его горячую прочность, а связка в зависимости от основности, вместе с порами - холодную прочность. Обычно химический состав офлюсованных окатышей включает следующие оксиды: Fe_2O_3 , FeO , CaO , SiO_2 , MgO и Al_2O_3 , из которых, однако, только четыре первых являются минералообразующими, оксиды же магния и алюминия,

влияющие главным образом на морфологию фаз, следует рассматривать как дополнительные или структурообразующие [3,4]. Прочностные и другие характеристики окатышей как в горячем, так и в холодном состояниях могут быть существенно улучшены путём воздействия на химический состав связки и рудной части за счет добавок оксидов магния и алюминия. Оксид магния распределяется между рудными, ферритными и силикатными минералами, влияя на их морфологию, стабильность в холодном и горячем состояниях [5].

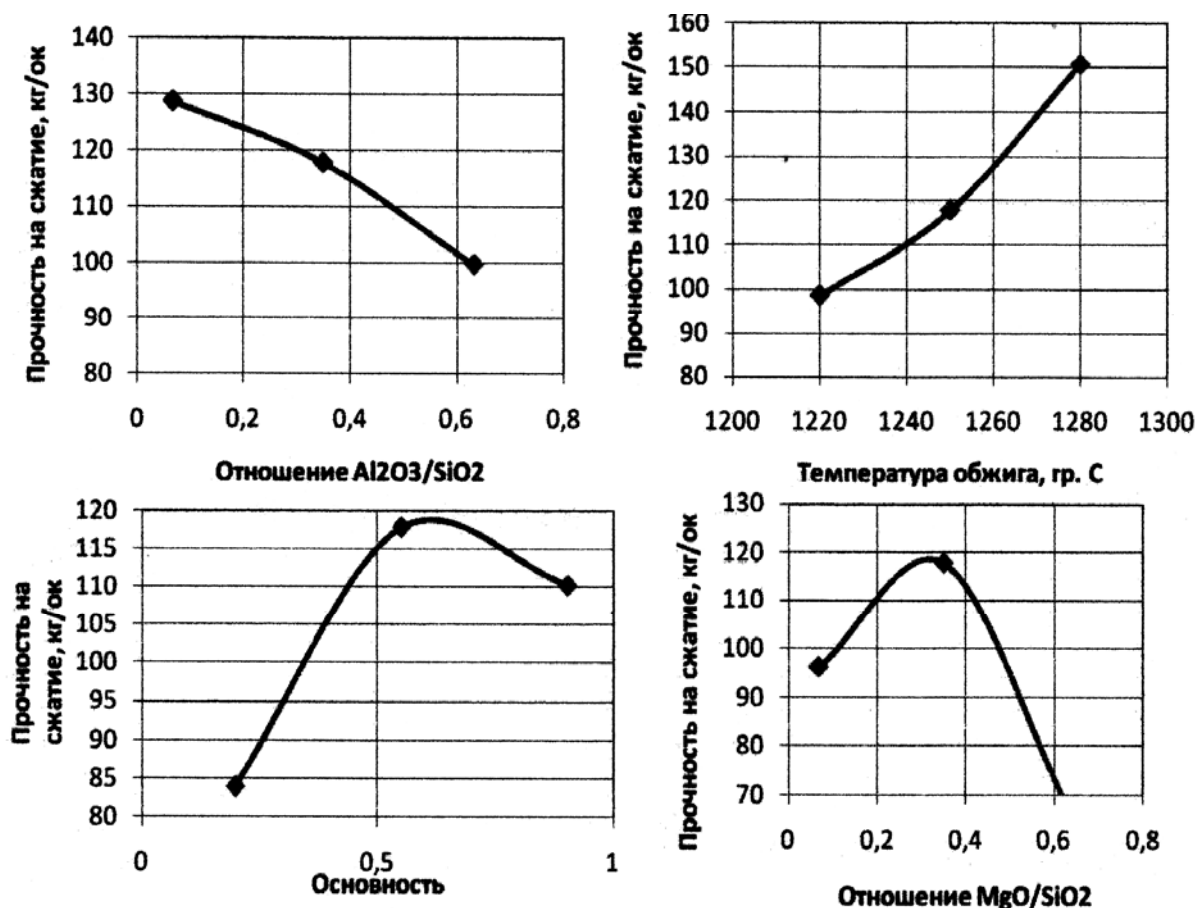


Рисунок 6 - Зависимость прочности окатышей от исследуемых параметров (эксперимент)

При пониженном содержании FeO в окатышах Al_2O_3 переходит в фазы связки, а MgO - сосредотачивается в рудной части. MgO является добавкой - кристаллизатором, так как в объёме расплава при охлаждении формирует центры кристаллизации. С уменьшением крупности частиц прочность окатышей возрастает и при этом снижается окисленность окатышей [6].

Изложенное является основанием для ввода дополнительных показателей, включающих соотношение структурообразующих

оксидов MgO и Al_2O_3 и оксидов, являющихся основой химического состава. На рисунках 4, 5 и 6 показано действие корректирующих модулей на уровень прочностных характеристик окатышей, рассчитанных по модели и установленных экспериментально. Из приведенных данных следует, что при добавках MgO наблюдается экстремальная зависимость с максимумом при отношении MgO/SiO_2 равном 0,22-0,25, в то время как влияние Al_2O_3/SiO_2 на прочность в холодном состоянии противоположно.

Очевидно, что с увеличением содержания SiO_2 в концентрате количество добавки MgO необходимо повышать (рис. 7), а роль Al_2O_3 будет снижаться.

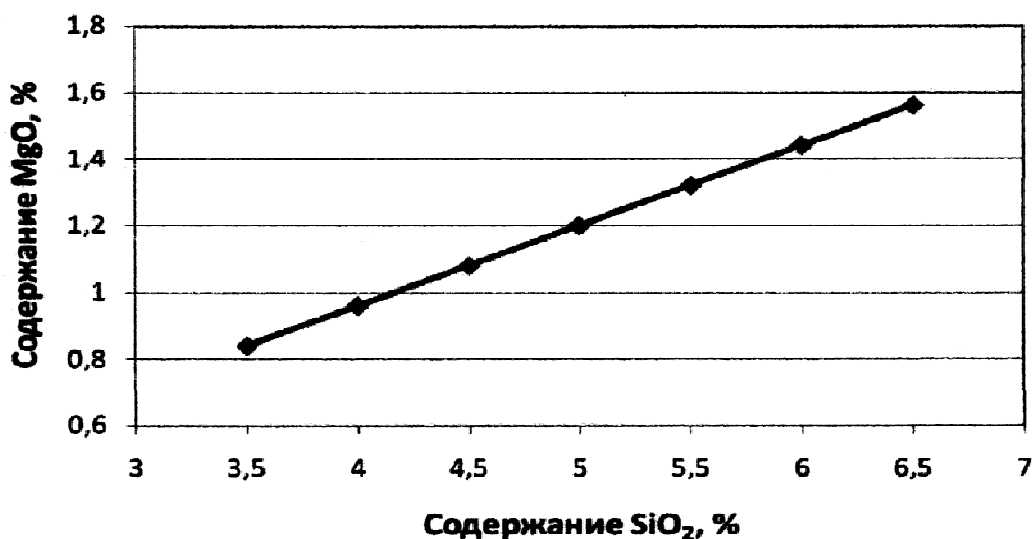


Рисунок 7 - Изменение количества добавки MgO в зависимости от содержания SiO_2

Выводы. На основании экспериментальных данных разработана математическая модель для расчёта прочности окатышей на раздавливание при изменении основности CaO/SiO_2 , глиноземистого Al_2O_3/SiO_2 и магнезиального MgO/SiO_2 индексов, а также температуры обжига.

Анализ процесса с использованием математической модели показал, что максимальная прочность окатышей достигается при магнезиальном индексе равном 0,23-0,28 и основности 0,55-0,65.

Увеличение температуры обжига с 1230 до 1280 °C способствует повышению прочности при основности до 0,8 и магнезиальном индексе до 0,35. При этом изменение глиноземистого индекса с 0,25

до 0,4 снижает прочность окатышей, с 0,4 до 0,55 - не изменяет, а дальнейшее увеличение индекса до 0,6 повышает прочность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Модель М.С., Лядова В.Я., Чугунова М.В. // Феритообразование в железорудном сырье.- М.: Наука.- 1990.- 152 С.
2. Ковшов В.Н. //Постановка инженерного эксперимента.- Киев.- Донецк. - Вища школа.- Головне изд-во.- 1982.- 120 С.
3. Синтез и свойства тройного алюмоферрита кальция - основной ферритной фазы офлюсованного железорудного сырья. / Т.Я. Малышева, И.В. Островская, В.Я. Лядова и др. // Известия АН СССР. - Металлы. -1976. - № 6 - С. 78 - 86.
4. Малышева Т.Я. // Петрография железорудного агломерата.-М.: Наука.- 1969 - 168 С.
5. Малышева Т.Я. // Железорудное сырьё: упрочнение при термообработке.- М.- Наука.- 1988.- 198 С.
6. Влияние магнезии на минеральный состав и структуру спека./ Г.С. Васильев, Р.А. Кравченко // Известия ВУЗов. Черная металлургия.- 1974.-М4.- С. 41-43.

УДК 539.3 + 629.7

А.А. Фоков

**ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕННОГО УПРУГОГО
ПЕРИФЕРИЙНОГО ЭЛЕМЕНТА В СОСТАВЕ КА В ЗАДАЧЕ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЕГО МЕХАНИЧЕСКОГО
ЭКВИВАЛЕНТА**

Введение

Одной из составляющих процедуры исследования динамики сложных механических систем, содержащих распределенные упругие элементы, является упрощение расчетной схемы. Упрощение может быть произведено, в частности, путем замены упругих элементов с распределенными параметрами их механическими эквивалентами с сосредоточенными параметрами. Это избавляет от необходимости иметь дело с уравнениями в частных производных и делает более наглядным процесс моделирования движения. Это позволяет также использовать средства визуального моделирования, например, пакета SimMechanics в системе MatLab, который не предоставляет возможность прямого моделирования динамики упругих тел с распределенными параметрами.

В [1,2] рассмотрена задача упрощения расчетной схемы при исследовании влияния динамики распределенного упругого элемента в составе КА на движение КА. С этой целью предложена процедура определения характеристик механического объекта с сосредоточенными параметрами, который эквивалентен по динамическим свойствам исходному распределенному упругому элементу. Для обеспечения эквивалентности в условиях больших перемещений использовано требование одинаковости характеристик «жестких вариантов» сравниваемых объектов. Для обеспечения эквивалентности применительно к упругим отклонениям использован метод сопоставления механических расчетных схем распределенного упругого элемента и его эквивалента путем сравнения передаточных функций. При определении передаточных функций в качестве входных величин рассматриваются силовые воздействия (силы и

моменты), приложенные к некоторым характерным точкам распределенного упругого элемента, в частности, к точке его крепления к КА. В качестве выходных величин – перемещения (линейные и угловые) распределенного упругого элемента в точке его крепления к КА.

Известен метод суперэлемента [3] определения характеристик механического объекта с сосредоточенными параметрами, который эквивалентен по отдельным механическим свойствам исходному распределенному упругому элементу в составе ветроэнергетической установки. В задаче упрощения расчетной схемы при исследовании влияния движения распределенного периферийного упругого элемента в составе КА на движение КА может быть использован этот метод. Отметим, что два названных метода отличаются с постановочной точки зрения. Первый из них предназначен для изучения движения тела (или системы таких тел), к которому прикреплен распределенный упругий элемент, без акцентирования внимания на поведении упругого элемента. Второй метод предполагает изучение поведения и динамического нагружения самого распределенного упругого элемента.

В связи с вышеизложенным представляет интерес получение соотношений для передаточных функций распределенного упругого элемента и оценка метода суперэлемента с точки зрения использования аппарата передаточных функций. В настоящей статье рассмотрен распределенный упругий элемент в виде протяженной упругой балки.

Передаточные функции

При получении уравнений движения многоэлементных механических систем, в том числе содержащих распределенные упругие элементы, часто записывают уравнения динамики для каждого отдельного элемента системы. При этом каждый элемент рассматривают как свободный, а связи с соседними элементами заменяют приложенными с их стороны силами и моментами.

В [4] приведен вывод справедливых в рамках линейной теории вязкоупругости уравнений движения свободной большой космической конструкции произвольной конфигурации. Для случая плоского движения свободной упругой балки при пренебрежении зависимостью

силовых воздействий от упругих координат и при учете поперечных колебаний балки уравнения движения выглядят следующим образом:

$$\dot{R}_x = V_x + \dot{\phi} \cdot R_y, \quad \dot{V}_x = \dot{\phi} \cdot V_y + m^{-1} \cdot T_x, \quad (1)$$

$$\dot{R}_y = V_y - \dot{\phi} \cdot R_x, \quad \dot{V}_y = -\dot{\phi} \cdot V_x + m^{-1} \cdot T_y, \quad (2)$$

$$\ddot{\phi} = J^{-1} \cdot (M + x_T \cdot T_y - u(x_T) \cdot T_x), \quad (3)$$

$$\ddot{q}_k + 2\chi b \Omega_k^2 \cdot \dot{q}_k + \Omega_k^2 \cdot q_k = -\dot{\phi}^2 \cdot q_k + T_y \cdot U_k(x_T) + M \cdot U'_k(x_M), \quad (4)$$

где $k = 1, 2, \dots, N$. В соотношениях (1-4) и на поясняющем рисунке 1 используются следующие обозначения: $\Sigma\xi\eta$ – инерциальная система координат (ИСК); Sxy – средняя система координат (ССК), связанная с недеформированной балкой; C – центр масс балки; R – радиус-вектор центра масс балки в ИСК; ϕ – угловое положение балки относительно ИСК; ρ – радиус-вектор элемента балки в ССК; u – поперечное отклонение элемента балки; V – вектор скорости центра масс балки; l – длина балки; m – масса балки; N – число учитываемых мод колебаний балки; Ω_k – k -я круговая частота поперечных свободных колебаний балки; χ и b – безразмерный параметр и константа в выражении для элементарной работы диссипативных сил [4]; J – главный центральный момент инерции относительно оси перпендикулярной плоскости движения, $q_k = q_k(t)$ – k -я упругая обобщенная координата, функция времени t ; $U_k(x)$ – k -я форма упругих поперечных колебаний; точкой обозначены производные по времени, штрихом – производные по координате x . В соотношение (4) по сравнению с [4] введено слагаемое, учитывающее влияние изгибающего момента, процедура учета которого описана в [5].

Соотношения (1-4) записаны для случая приложения к свободной балке сосредоточенной силы T в точке с координатой x_T и сосредоточенного изгибающего момента M , приложенного в точке с координатой x_M . Индексы x и y в соотношениях (1-4) обозначают проекции соответствующих величин на оси ССК. Формы поперечных колебаний нормированы так, что

$$\gamma A \cdot \int_{-l/2}^{l/2} U_n(x) \cdot U_k(x) dx = \delta_{nk}, \quad (5)$$

где δ_{nk} – символ Кронекера; γ – плотность материала; A – площадь поперечного сечения балки.

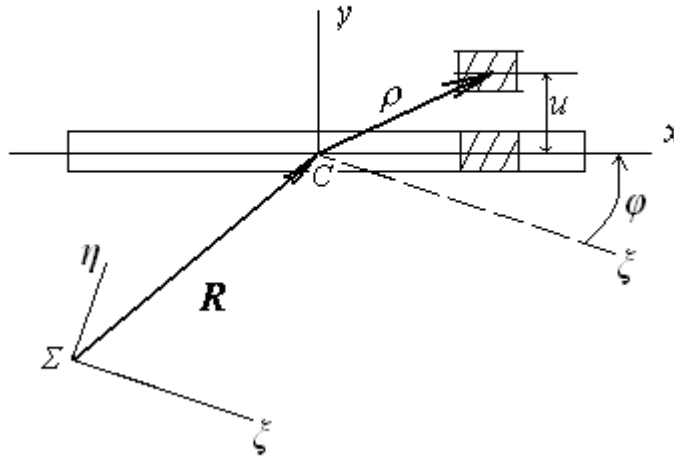


Рисунок 1 – Системы координат

При более общей форме записи соотношения (4) следует вместо $U_i(x)$ подставить выражение [6] $f_i(x) \cdot (m_i^{corr})^{-1}$, где приведенная масса i -того тона колебаний $m_i^{corr} = \gamma A \cdot \int_{-l/2}^{l/2} f_i^2(x) dx$ и $f_i(x)$ – собственные формы изгибных колебаний, $i = 1, 2, \dots, N$.

Соотношения для координат ξ , η произвольного элементарного участка балки с координатой x и угла θ поворота его сечения относительно оси $\Sigma\xi$ имеют следующий вид

$$\xi(x, t) = (R_x(t) + x) \cdot \cos \varphi(t) - (R_y(t) + u(x, t)) \cdot \sin \varphi(t), \quad (6)$$

$$\eta(x, t) = (R_x(t) + x) \cdot \sin \varphi(t) + (R_y(t) + u(x, t)) \cdot \cos \varphi(t), \quad (7)$$

$$\theta(x, t) = \varphi(t) + u'(x, t), \quad (8)$$

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^N q_n(t) \cdot f_n(x), \quad u'(x, t) = \sum_{n=1}^N q_n(t) \cdot f_n'(x). \quad (9)$$

Для получения передаточных функций систему уравнений (1-4, 5, 6-9) необходимо линеаризовать. Проведя линеаризацию около невозмущенного положения балки, которое характеризуется значениями параметров

$$\begin{aligned} R_x &= R_x^*, \quad V_x = 0, \quad R_y = R_y^*, \quad V_y = 0, \quad \varphi = 0, \quad \dot{\varphi} = 0, \\ q_k &= 0, \quad \dot{q}_k = 0, \quad k = 1, 2, \dots, N, \end{aligned}$$

и переходя от временных зависимостей к их изображениям по Лапласу, получим следующие соотношения:

$$\tilde{\eta}(s, x, x_T, x_M) = W^{T\eta} \cdot \tilde{T}_y(s) + W^{M\eta} \cdot \tilde{M}(s),$$

$$\tilde{\theta}(s, x, x_T, x_M) = W^{T\theta} \cdot \tilde{T}_y(s) + W^{M\theta} \cdot \tilde{M}(s),$$

где тильдой обозначены изображения по Лапласу соответствующих временных зависимостей, $W^{T\eta}$, $W^{M\eta}$, $W^{T\theta}$, $W^{M\theta}$ – передаточные функции от изображения приложенной в точке x_T силы $T_y(t)$ и от изображения приложенной в точке x_M момента $M(t)$ к изображению в точке с координатой x перемещения $\eta(x, t)$ элемента балки и к изображению угла $\theta(x, t)$ поворота его сечения, соответственно. Введем обобщающее обозначение W^{Fz} для названных передаточных функций, где индекс F может принимать значения T и M , а индекс z – η и θ . Для передаточных функций справедливы следующие соотношения

$$W^{Fz} = W^{Fz}(s, x, x_T, x_M) = \sum_{n=1}^{\infty} W_n^{Fz}, \quad (10)$$

$$W_0^{Fz} = \frac{k_0^{Fz}}{s^2}, \quad (11)$$

$$W_n^{Fz} = \frac{k_n^{Fz}}{s^2 + 2\chi b \Omega_n^2 s + \Omega_n^2}, \quad (12)$$

где

$$k_0^{T\eta} = k_0^{T\eta}(x, x_T) = m^{-1} + x \cdot J^{-1} \cdot x_T, \quad (13)$$

$$k_0^{M\eta} = k_0^{M\eta}(x) = x \cdot J^{-1}, \quad (14)$$

$$k_0^{T\theta} = k_0^{T\theta}(x_T) = J^{-1} \cdot x_T, \quad (15)$$

$$k_0^{M\theta} = J^{-1}, \quad (16)$$

$$k_n^{T\eta} = k_n^{T\eta}(x, x_T) = f_n(x) \cdot f_n(x_T) / m_n^{corr}, \quad (17)$$

$$k_n^{M\eta} = k_n^{M\eta}(x, x_M) = f_n(x) \cdot f'_n(x_M) / m_n^{corr}, \quad (18)$$

$$k_n^{T\theta} = k_n^{T\theta}(x, x_T) = f'_n(x) \cdot f_n(x_T) / m_n^{corr}, \quad (19)$$

$$k_n^{M\theta} = k_n^{M\theta}(x, x_M) = f'_n(x) \cdot f'_n(x_M) / m_n^{corr} \quad (20)$$

и $n = 1, 2, \dots, N$.

Без учета демпфирования варианты представления передаточных функций (10) определяются равенствами:

$$W^{Fz} = \frac{k_0^{Fz}(x, x_T)}{s^2} + \frac{k_1^{Fz}(x, x_T, x_M)}{s^2 + \Omega_1^2} + \dots + \frac{k_N^{Fz}(x, x_T, x_M)}{s^2 + \Omega_N^2}, \quad (21)$$

$$W^{Fz} = \frac{k_\sigma^{Fz}(s^2 + (n_1^{Fz})^2) \cdot (s^2 + (n_2^{Fz})^2) \cdot \dots \cdot (s^2 + (n_N^{Fz})^2)}{s^2 (s^2 + \Omega_1^2) \cdot (s^2 + \Omega_2^2) \cdot \dots \cdot (s^2 + \Omega_N^2)}, \quad (22)$$

$$W^{Fz} = \frac{k_0^{Fz}(x, x_T)}{s^2} + k_{yc}^{Fz} \frac{c_{N-1}^{Fz} \cdot s^{2(N-1)} + c_{N-2}^{Fz} \cdot s^{2(N-2)} + \dots + c_1^{Fz} \cdot s^2 + 1}{(T_1^2 s^2 + 1) \cdot (T_2^2 s^2 + 1) \cdot \dots \cdot (T_N^2 s^2 + 1)}, \quad (23)$$

где

$$k_\sigma^{Fz} = k_0^{Fz} + k_1^{Fz} + k_2^{Fz} + \dots + k_N^{Fz}, \quad (24)$$

$$k_{yc}^{Fz} = S_1(k_1^{Fz} \varepsilon_1, k_2^{Fz} \varepsilon_2, \dots, k_N^{Fz} \varepsilon_N), \quad (25)$$

$$c_j^{Fz} = \frac{1}{k_{Fz}^{Fz}} \sum_{i=1}^N k_i^{Fz} \varepsilon_i \cdot S_j(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{i-1}, \varepsilon_{i+1}, \dots, \varepsilon_N), \quad j = 1, 2, \dots, N-2, \quad (26)$$

$$c_{N-1}^{Fz} = \frac{k_\sigma^{Fz}}{k_{yc}^{Fz}} \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \dots \cdot \varepsilon_N, \quad (27)$$

$$T_i^2 = \varepsilon_i, \quad \varepsilon_i = 1 / \Omega_i^2, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (28)$$

S_j – j -я элементарная симметрическая функция [7],

$n_1^{Fz}, n_2^{Fz}, \dots, n_N^{Fz}$ – нули передаточных функций.

Соотношения для передаточных функций получены для свободной упругой балки. Если на концы балки наложены иные граничные условия, то соотношения (10 - 28) будут описывать «упругие» перемещения балки, и останутся справедливыми при условии исключения из них слагаемых, содержащих нижний индекс «0», то есть, при исключении слагаемых, описывающих «жесткое» движение балки.

Представления передаточных функций в соотношениях (21), (22) и (23) могут оказаться удобными при подборе параметров механического эквивалента протяженного периферийного элемента КА, аппроксимированного в виде упругой балки. Представление передаточных функций в виде (21) целесообразно использовать при оценке вклада каждого тона колебаний. Для определения квазистатических отклонений элементов балки более удобным является представление передаточных функций в виде (23), так как коэффициент k_{yc}^{Fz} , входящий в соотношение (23), численно равен значению установившегося отклонения z при приложении единичного ступенчатого воздействия F .

Метод суперэлемента с точки зрения использования аппарата передаточных функций

Структура и параметры механического эквивалента должны удовлетворять некоторому заданному критерию. Известен метод суперэлемента, согласно которому расчетная схема упругого протяженного элемента представляется системой жестких стержней и сосредоточенных упругих элементов. В [3] рассмотрен случай балки Эйлера-Бернулли, для которой простейшим вариантом расчетной схемы является система с тремя стержнями, последовательно соединенными между собой пружинами.

Критерием выбора параметров в этом случае является равенство прогибов и углов поворота на свободном конце балки и соответствующем конце механического эквивалента при одинаковых силовых воздействиях, приложенных к этим же точкам, а также близость первой частоты собственных колебаний балки и ее механического эквивалента. Показано [3], что для обеспечения близости последующих собственных частот колебаний расчетная схема механического эквивалента может быть представлена в виде набора последовательно соединенных простейших суперэлементов. При этом добавление в расчетную схему очередного простейшего суперэлемента обеспечивает близость для очередного номера собственной частоты балки и ее механического эквивалента. Равенство прогибов и углов поворота обеспечивается в [3] подбором жесткостей пружин, а близость основной частоты собственных колебаний – соотношением длин стержней.

Представляет интерес оценка метода суперэлемента с точки зрения сопоставления характеристик передаточных функций упругого распределенного элемента и его эквивалента.

В методе суперэлемента рассматривается схема механического эквивалента, представленная на рисунке 2, при этом концевые стержни имеют одинаковую длину.

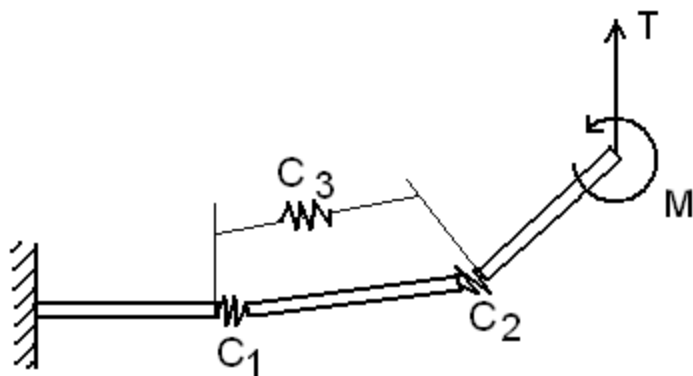


Рисунок 2 – Схема механического эквивалента в методе суперэлемента

В качестве упругого распределенного элемента здесь рассматривается упругая балка, защемленная левым концом. Прогиб δ и угол наклона ϑ свободного конца балки при приложении к нему постоянных силы T и момента M определяется соотношением:

$$\begin{bmatrix} \delta \\ \vartheta \end{bmatrix} = \frac{EI}{L} \cdot \begin{bmatrix} 2L^3 & 3L^2 \\ 3L^2 & 6L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T \\ M \end{bmatrix},$$

где E – модуль упругости материала балки, I – момент инерции сечения балки.

Для обеспечения равенства прогиба и угла наклона свободного конца механического эквивалента и распределенной балки при приложении к ним одинаковых усилий должны выполняться соотношения

$$C_1 = C_2 = \frac{6EI}{L} \cdot k^2 \text{ и } C_3 = \frac{EI}{L} \cdot (1 - 3k^2), \quad (29)$$

где k отношение длины среднего стержня суперэлемента ко всей его длине.

Таким образом, выбором величины k может быть обеспечено выполнение условия (29) равенства статических отклонений. Для упрощения схемы эквивалента выбирается такое значение k , при котором упругая жесткость C_3 равняется нулю. При этом фиксированном значении k получаем простейшую схему суперэлемента. К тому же оказывается, что при этом значении k первая собственная частота колебаний суперэлемента близка к первой собственной частоте колебаний соответствующей упругой распределенной балки. По второй собственной частоте – отличие почти в два раза.

Что касается метода сопоставления передаточных функций для рассматриваемого случая заземленной балки, имеем равенства

$$W^{Fz}(s, x_1, x_T, x_M) = k_{yc}^{Fz} \cdot \frac{(T_0^2 s^2 + 1)}{(T_1^2 s^2 + 1)(T_2^2 s^2 + 1)}, \quad (30)$$

$$k_{yc}^{Fz} = \frac{k_1^{Fz}}{\Omega_1^2} + \frac{k_2^{Fz}}{\Omega_2^2}, \quad T_0^2 = \frac{k_1^{Fz} + k_2^{Fz}}{k_1^{Fz} \Omega_2^2 + k_2^{Fz} \Omega_1^2}, \quad T_1^2 = \frac{1}{\Omega_1^2}, \quad T_2^2 = \frac{1}{\Omega_2^2},$$

где индекс F , как и ранее, соответствует усилиям T и M , а индекс z – отклонениям δ и ϑ .

При единичном ступенчатом воздействии $F(t) = 1(t)$, согласно предельной теореме [7], для конечного значения оригинала $z(t)$ можно получить

$$\lim_{t \rightarrow \infty} z(t) = \lim_{s \rightarrow 0} (s \cdot W^{Fz}(s) \cdot \frac{1}{s}) = k_{yc}^{Fz}.$$

Таким образом, коэффициенты усиления в передаточных функциях (30)

$$\begin{bmatrix} k_{yc}^{T\delta} & k_{yc}^{M\delta} \\ k_{yc}^{T\vartheta} & k_{yc}^{M\vartheta} \end{bmatrix} = \frac{EI}{L} \cdot \begin{bmatrix} 2L^3 \cdot T_1 & 3L^2 \cdot M_1 \\ 3L^2 \cdot T_1 & 6L \cdot M_1 \end{bmatrix}$$

численно равны статическим упругим отклонениям на свободном конце суперэлемента при постоянных единичных воздействиях T и M , приложенных к этому же концу. То есть, жесткости шарниров рассчитанные для суперэлемента, обеспечивают равенство коэффициентов усиления передаточных функций механического эквивалента статическим отклонениям распределенной упругой балки при единичных воздействиях.

Выводы

Получены соотношения для передаточных функций распределенного упругого элемента в виде протяженной упругой балки. Эти соотношения необходимы при использовании предложенного в [1,2] и основанного на использовании аппарата передаточных функций метода определения характеристик механического объекта с сосредоточенными параметрами, который эквивалентен по динамическим свойствам исходному распределенному упругому элементу в составе КА. Также дана трактовка критерия эквивалентности, применяемого в методе суперэлемента [3], основанная на сопоставлении передаточных

функций распределенного упругого элемента и его механического эквивалента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоножко П.А., Белоножко П.П., Фоков А.А. Сопоставление механических расчетных схем пространственно развитых космических объектов методом сравнения передаточных функций// Сборник докладов и тезисов международной научно-практической конференции «Информационные технологии в управлении сложными системами». 22-23 мая 2008, г. Днепропетровск, Украина.– Днепропетровск, 2008. с.81-82.
2. Белоножко П.А., Белоножко П.П., Фоков А.А. Использование аппарата передаточных функций для определения параметров механического эквивалента периферийного протяженного упругого элемента в составе КА// Сборник докладов и тезисов международной научно-практической конференции «Информационные технологии в управлении сложными системами». 22-23 мая 2008, г. Днепропетровск, Украина.– Днепропетровск, 2008. с.83
3. D.P. Molenaar. Cost effective design and operation of variable speed wind turbines. DUP Science, Delft, The Netherlands, 2003.
4. Механика больших космических конструкций / Н.В. Баничук, И.И. Карпов, Д.М. Климов и др. – М.: Факториал, 1997. – 302 с.
5. Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле / Пер. с англ. Л.Г. Корнейчука; Под ред. Э.И. Григолюка. – М.: Машиностроение, 1985. – 472 с.
6. Дмитриев В.В. Формирование динамических свойств упругих конструкций. Учебное пособие / Самар. гос. аэрокосм. ун-т. – Самара, 2005. – 72 с.
7. Г. Корн, Т. Корн. Справочник по математике. Для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1974. – 832 с.

УДК 621.74.002.6:669.131.7

Л.Х.Иванова, Е.В.Колотило, И.В.Ивонин

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛИТЬЯ ВАЛКОВ ИЗ КОМПЛЕКСНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ ЧУГУНОВ

Введение

В данной работе представлены результаты серии экспериментов, посвященные разработке технологии литья валков нового типа из чугуна с вермикулярным графитом.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами

Комплексное легирование и модифицирование чугунов являются эффективными способами повышения механических и эксплуатационных свойств отливок. Ежегодно в Украине производится около 1 млн. т чугунных отливок, и только 5...6% от их выпуска из высокопрочных чугунов, что существенно меньше, чем в мировом выпуске таких отливок (30...60%). Особенно влиятельным это является для вальцелитейного производства как основного производителя чугунных отливок.

В основе технологии литья прокатных валков лежит следующее: получение отливок с твердым, износо- и термостойким рабочим слоем и высокопрочной сердцевиной. Это требование и в настоящее время является основным при оценке качества литых валков. В настоящее время нормативно-технической документацией на чугунные прокатные валки [1] изготовление их из чугуна с вермикулярным графитом (ЧВГ) не предусматривается.

Анализ публикаций

Впервые в отечественной литературе термин «вермикулярный графит» был введен в 1967 г. в работе [2]. ВГ образуется в чугунах, содержащих около 0,01% магния и небольшие концентрации церия. Область концентрации модификаторов, обеспечивающих получение ВГ, расширяются при добавках 0,3% титана. Аналогичным образом действуют добавки алюминия и циркония. ЧВГ имеет предел прочности при растяжении от 300 до 500 МПа, относительное

удлинение от 2 до 6% и модуль упругости около 145000 МПа. В связи с более высокой демпфирующей способностью ЧВГ рекомендуется применять зачастую вместо чугуна с шаровидным графитом (ЧШГ).

ЧВГ известен с момента открытия ЧШГ (1948 г.). В качестве конструкционного материала ЧВГ предложили использовать авторы [3], а четкую классификацию понятия вермикулярного графита дал Шеленг (Shelleng R.D.) в 1967 г. [4]. От момента открытия ЧВГ до настоящего времени интерес к этому материалу значительно возрос причем, как к технологии его получения, так и к применению в различных областях промышленности. В частности, в работе [5] была показана перспективность применения комплексных модификаторов (КМ) на основе редкоземельных металлов (РЗМ) для литья прокатных валков из ЧВГ. К преимуществам ЧВГ [6] в сравнении с чугуном с пластинчатым графитом (ЧПГ) следует отнести: более высокую прочность без применения дорогих легирующих добавок; более высокую пластичность и вязкость и обусловленное этим высокое сопротивление разрушению; более низкую склонность к окислению и росту в случае использования при высоких температурах.

В настоящее время вопросы теории и практики производства и применения отливок из ЧВГ очень широко освещены как в отечественной, так и в зарубежной научно-технической литературе [6-12]. Показано, например [6], что для получения таких чугунов применяют обработку расплавов недостаточными для сфероидизации графита количествами магния или КМ на его основе, обработку КМ различных составов. В этих работах приведены количественные и температурные параметры обработки расплавов. Так, в работе [7] был предложен следующий способ получения ЧВГ: одновременное введение в расплав лигатуры ФСМг5 и ферротитана марки ФТи65 или последовательное – ФТи65 в печь расплавления, а ФСМг5 – в печь выдержки. Авторами [8] отмечается, что самостоятельными направлениями работ по технологии получения ЧВГ являются применение РЗМ на основе церия, мишметалла, ферроцерия, КМ типа железо-кремний-РЗМ или железо-кремний-иттрий-мишметалл. Эти направления получили развитие в СНГ, Японии, Германии и Франции. Авторы [9] показали, что при выплавке ЧВГ можно применять до 30% возврата чугуна с компактным графитом,

что не рекомендуется при выплавке ЧШГ с высокой пластичностью и вязкостью. В ряде работ приведены результаты исследования влияния формы графитных включений на физико-механические и эксплуатационные свойства чугунов, в том числе при высоких температурах. Например, в работе [10] на основании лабораторных исследований показано, что ЧВГ имеет в два раза большую термостойкость, чем ЧШГ, и в шесть раз большую, чем ЧПГ, что объясняется его большей теплопроводностью, меньшим уровнем термонапряжений, меньшей скоростью распространения трещин. Исследовано также влияние различных модификаторов на механические свойства чугунов. Так, применение ЧВГ взамен чугуна марки СЧ20 ГОСТ 1412-85 увеличивает срок службы отливок блока цилиндров и картера перемены передач в 1,5-1,7 раза, что объясняется в 1,7-2 раза большей статической прочностью ЧВГ. Однозначно во всех работах показано, что по уровню механических и теплофизических свойств ЧВГ приближается к ЧШГ. В некоторых немногочисленных работах [11,12] авторы отмечают целесообразность использования ЧВГ для отливок большой массы.

Таким образом, проанализировав состояние вопроса о производстве ЧВГ можно сделать вывод: сочетание высоких показателей механических с высокими теплофизическими характеристиками открывает широкие возможности применения ЧВГ для производства прокатных валков, работающих в условиях высоких циклических нагрузок и термосмен.

Результаты исследований. Поскольку ЧВГ занимает промежуточное положение между ЧШГ и ЧПГ, опытные плавки проводили, с одной стороны для замены валков исполнения СШХН, а с другой - СПХН и ЛП. Целью исследований была разработка способа модифицирования расплавов для литья прокатных валков новых исполнений - СВХН и ЛВ.

По существующей в вальцелитейном производстве технологии при изготовлении прокатных валков исполнения СШХН металл плавят в мартеновских, отражательных или индукционных печах. При температуре 1673-1723К весь металл выпускают в заливочный ковш, из которого отливают 7-10 т металла в дополнительный ковш. Заливочный ковш передают на стенд для удаления шлака, после чего устанавливают в специальную камеру и при достижении необходимой

температуры металл обрабатывают металлическим магнием, загруженным в баллоны-испарители в количестве, рассчитанном на металл всей плавки. После окончания процесса модифицирования осуществляют перелив металла из дополнительного ковша в заливочный, повторное удаление шлака и при достижении температуры 1573-1603К производят заливку литейных форм, во время которой осуществляют вторичное модифицирование ферросилицием.

По разработанной нами технологии после доводки металла по химическому составу и при достижении температуры 1673...1683К весь металл выпускают в подогретый ковш с загруженным в него необходимым количеством КМ. После выпуска металла заливочный ковш передают на стенд для удаления шлака и при достижении температуры 1613...1623К производят заливку валковых форм. Очевидно, что применение КМ позволяет значительно упростить технологию получения больших масс расплавов, сократить время от выпуска металла из плавильного агрегата до заливки литейных форм, а значит уменьшить число крановых операций (экономия электроэнергии) и устранить необходимость в дополнительном ковше, баллонах-испарителях, камере для модифицирования.

С целью отработки технологического процесса литья в условиях вальцелитейного цеха были отлиты три опытно-промышленные партии прокатных валков с использованием для обработки расплавов модифицирующей смеси, состоящей из двух лигатур: КМ-1 (ФС30РЗМ30) и КМ-2 (ФС15Т20М25РЗМ10) в соотношении 1:3. В качестве лигатуры КМ-2 использовали специально рассчитанную механическую смесь. Суммарное количество лигатур было в пределах 1,8-2,5% от массы расплава. Обе лигатуры имели фракцию 60-80 мм. Лигатуры загружали на дно подогретого до 673-773К заливочного ковша. Порядок загрузки лигатур в заливочный ковш был следующим: сначала лигатура КМ-1, затем - КМ-2. Для сопоставительного анализа провели также исследования валков-представителей текущего производства – исполнений СШХН-47, СШХН-60 и ЛП-58.

Рабочий слой валка текущего производства исполнения СШХН-47 имел структуру, состоящую из графита шаровидной и компактной форм, перлита и цементита. Дисперсность перлита соответствовала

баллу ПД1,0 и ПД0,5. В опытном валке исполнения СВХН-47 комплексная обработка обеспечила получение ВГ при небольшом количестве включений компактной формы. Количество цементита, графита и дисперсность перлита в чугунах валков текущего производства и опытной партии были приблизительно одинаковыми, однако количество других компонентов структуры отличалось: феррита в чугунах опытного валка практически не было, а перлита - на 7...11% больше, чем в чугунах валка текущего производства. Микротвердость цементита в чугунах рабочего слоя опытного валка была на 8% выше.

Структура чугуна рабочего слоя валка-представителя текущего производства исполнения СПХН-60 состояла из перлитной матрицы и небольших количеств графита и феррита, а также карбидов и ледебуритной эвтектики сотового строения. Перлит имел дисперсность ПД0,5, графитные включения характеризовались баллами ПГф2 и ПГф3. В чугунах рабочего слоя валка-представителя исполнения СВХН-60 опытной партии, отлитого из расплава с пониженным содержанием никеля и обработанного МС из КМ-1 и КМ-2, перлит имел дисперсность ПД0,5 и ПД1,0. Графитные включения имели, в основном, вермикулярную форму, частично мелко пластинчатую. Микротвердость цементита и перлита в валке текущего производства была выше.

На расстоянии 10 мм от поверхности валок из чугуна исполнения ЛП-58 имел структуру доэвтектического чугуна, в расположении структурных составляющих наблюдалась столбчатость. С удалением от рабочей поверхности структура грубела, появлялись графитные включения формы ПГф2, снижалось количество цементита. Чугун рабочего слоя валка исполнения ЛВ-58 опытной партии имел сходную с валком текущего производства структуру, отличие состояло в несколько большем количестве перлита (на 7...9%) и меньшем - феррита (на 15...19%).

Таким образом, оптимальной структурой чугуна рабочего слоя валков из ЧВГ следует считать структуру половинчатого чугуна с перлитной металлической основой, карбидной фазой с минимальным количеством ледебурита сотового типа и небольшим количеством графитных включений вермикулярной формы и специальных карбидов.

Проведенные испытания механических свойств чугуна валков показали, что более высокие прочностные свойства по сравнению с валками текущего производства имели опытные валки исполнений СВХН-60 и ЛВ-58 (табл.). В группе 1 валки текущего производства и опытные имели приблизительно одинаковые прочностные свойства, а твердость в опытном валке была на 11...15% выше.

Таблица

Результаты исследования свойств материала прокатных валков

Группа валков	Исполнение валков	Расстояние от поверхности вглубь бочки валка, мм	Свойства		
			$\sigma_B^{\text{изг}}$, МПа	σ_B^D , МПа	НВ
1	СПХН-47	10	340	315	445
		30	320	325	450
	СВХН-47	10	380	305	440
		30	370	320	445
2	СПХН-60	10	430	280	405
		30	405	290	415
	СВХН-60	10	415	310	450
		30	400	310	435
3	ЛП-58	10	400	190	305
		30	365	200	315
	ЛВ-58	10	390	200	320
		30	370	205	330

Результаты проведенных исследований показали, что перспективной является замена валков исполнений СПХН-47 на СВХН-47, а СПХН-60 и ЛП-58 на СВХН-60 и ЛВ-58, то есть из ЧВГ.

Опытная партия валков нового типа СВХН-47 в количестве 35 шт. в условиях Днепропетровского металлургического завода им. Петровского в стане 550-2 показала повышение стойкости на 12-55%.

Выводы

Научно обоснованы технологии литья прокатных валков из чугуна с вермикулярным графитом с повышенными эксплуатационными характеристиками. Установлены закономерности получения чугуна с вермикулярным графитом для литья прокатных валков разных исполнений. Применение разработанного технологического процесса позволило уменьшить расход модифицирующих и легирующих элементов и повысить эксплуатационные характеристики валков на прокатных станах.

ЛІТЕРАТУРА

1. ТУ У27.1-26524137-1291:2007. Валки чавунні для гарячого прокатування металів.- На заміну ТУ У 27.1-00190319-1291-2002; Чинний з 01.02.2008.- Х., 2007. - 29 с.

2. Белай Г.Е. Исследование влияния модифицирования на кристаллизацию чугуна, структуру и свойства листопрокатных валков: Автореф. дис. ... кандидата техн. наук: 05.323/ Днепропетр. металлург. ин-т.– Д., 1967.- 23 с.
1. 3.Estes I.W., Schneidewind R. New high strength cast irons, produced by injections methods // AFS Transaction.- 1955.- Vol.63.- P. 541-542.
3. Shelleng R.D. Effect of certain elements on the form of graphite in cast iron// AFS Cast Met. Res. J.- 1967.- Vol.3, №1.- P. 30-38.
4. Прокатные валки из модифицированного чугуна с вермикулярным графитом / Е.В.Колотило, О.П.Кондратьев, И.И.Ануфриев, И.Г.Ермолин // Совершенствование технологических процессов литья в мелкосерийном и единичном производстве: Науч.-техн. конф. литейщиков Урала. - Пермь, 1980.- С. 18-19.
5. Отливки из чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом / Э.В.Захарченко, Ю.Н.Левченко, В.Г.Горбенко, П.А.Вареник.-К.: Наук. думка, 1986.-248 с.
6. Чугун с вермикулярным графитом для корпусных деталей двигателей / Н.И.Бех, В.И.Литовка, Н.Г.Руденко и др. // Автомобильная промышленность.-1985.-№ 4.-С. 26-27.
7. Riposan J., Sofroni L. Fonta cu graphit vermicular.- Bucuresti, 1984.- 335 s.
8. Жуков А.А. “Литые металлы” – второй год издания международного журнала // Литейное производство. -1990.-№ 6.- С. 34-36.
9. Бондаренко С.И., Зайденберг А.М., Дахно М.Ю. Повышение термостойкости чугунных дизельных отливок // Литейное производство. - 1990.-№3.-С.5-6.
10. Андреев В.В., Ильичева Л.В. Структура и свойства чугуна с вермикулярным графитом в толстостенных отливках // Литейное производство. - 1982. - № 9.- С. 10-12.
11. Колотило Е.В., Иванова Л.Х. Чугун с вермикулярным графитом – перспективный материал для прокатных валков // Литейное производство.-1989.- №6.- С.3-4.

УДК 621.74

Л.Х.Иванова, Е.В.Колотило

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИИ ЛИТЬЯ ЧУГУННЫХ ВАЛКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШЛАКОВ

Введение

В данной работе представлены и проанализированы результаты по разработке технологии литья прокатных валков исполнения ЛШ-57 с использованием для легирования расплавов шлаков, содержащих ниобий и цирконий.

Проблема и ее связь с научными и практическими результатами

Одним из перспективных направлений повышения качества и совершенствования технологий производства чугунных отливок ответственного назначения является применение комплексов легирующих элементов. В СНГ освоено производство ряда сплавов и опробовано в промышленных условиях значительное число композиций сплавов типа Ni-Si-Ca, Zr-Al-Fe, Nb-Ti-Fe, Nb-Ti-Ni и др., позволяющие повысить качество и снизить стоимость легирующих присадок или использовать новые виды сырья [1]. Однако универсального легирующего комплекса пока не разработано.

Анализ достижений и публикаций

Одним из эффективных направлений повышения механических свойств чугунов является легирование их молибденом, ниобием, цирконием и другими элементами [2-3]. Проведенный патентный поиск показал, что: а) для повышения стойкости против тепловых ударов, снижения отслаивания, эрозии и коррозии вводят 0,04...0,50% ниобия при изготовлении изложниц и поддонов (патент США № 3109733 (1963 г.); б) валки для горячей прокатки из высокопрочного чугуна легируют 0,2–2,5% ниобия, повышая износостойкость, атмосферостойкость и стойкость к трещинообразованию (патент Японии № 56...43100 (1981 г.). Влияние циркония на структуру и свойства серого чугуна исследовали авторы [4]. При этом отмечается, что графитные включения в структуре чугуна измельчаются, что объясняется увеличением центров графитизации при вводе силикоциркония.

В последние годы в нашей стране все большую актуальность приобретают вопросы создания ресурсосберегающих технологий. Особо важное значение они приобретают в материало- и энергоемком

производстве, каким является литейное производство. В настоящее время в литейном производстве применяют шлаки ферросплавного производства [5–6], цветной металлургии [7], сталелитейного передела [8]. В настоящее время уже опубликованы результаты исследований возможности использования применительно к ваграночной плавке вышеперечисленных шлаков и отходов неметаллургических производств [9]. Однако в литературе практически отсутствуют сведения об использовании в литейном производстве для легирования отходов специальных производств. А именно их утилизация позволит заменить дорогостоящие и дефицитные легирующие материалы, такие как ниобий, цирконий и др., тем самым, организовав безотходные межотраслевые технологии, обеспечивающие с одной стороны повышение качества отливок с одновременным снижением их себестоимости, а с другой – увеличение извлечения ценных компонентов в этих производствах.

Основные результаты исследования

Все опытные плавки проводили в мартеновской печи вальцелитейного цеха. Масса выплавленного металла была 32 т. В качестве шихтовых материалов использовали литейные, переделные чугуны, стальной лом, отходы собственного производства, ферросплавы, отходы переработки лопарита и графитизирующий шлак. Отходы производства лопарита являются легирующим шлаком, в состав которого входит ниобий. Присадкой этого шлака в расплав вводится 0,1-0,2% ниобия, который образует в металле карбиды ниобия, что способствует повышению специальных свойств металла. С учетом усвоения ниобия из шлака (80-85%) расход его должен быть 3-5 мас.%. .

Технология изготовления валков исполнения ЛШ-57 заключалась в следующем (рис.1). После расплавления шихтовых материалов и перегрева до $1683 \pm 10\text{K}$ осуществляли выпуск расплава в два нагретых до температуры 673...773K ковша емкостью 30 и 10 т. Предварительно в 30-тонный ковш, предназначенный для металла рабочего слоя валка, загружали расчетные количества лигатуры ФС30РЗМ30 и легирующего шлака, а в 10-тонный ковш, предназначенный для металла сердцевины и шеек валка, загружали расчетные количества лигатуры КМг6, ферросилиция и

графитизирующего шлака. Заливку литейных форм проводили методом “полупромывки” (табл.1).

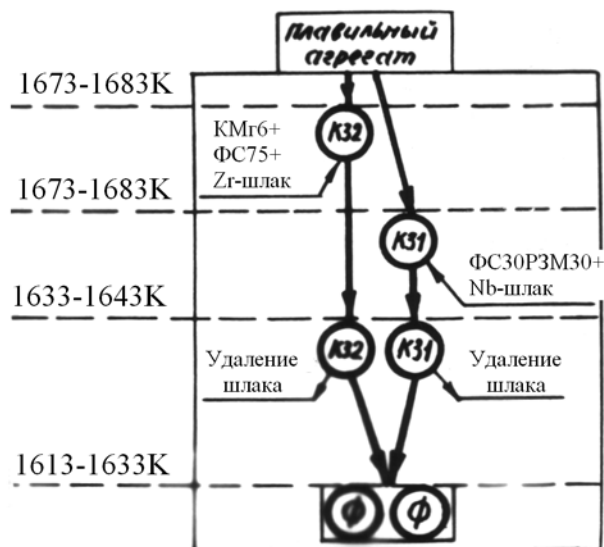


Рисунок 1 - Схема технологического процесса модифицирования расплава и обработки отходами специальных производств для литья прокатных валков исполнения ЛШ-57

Для повышения прочности чугуна в шейках прокатных валков применили комплексное модифицирование его РЗМ ($RZM_{ост} 0,09-0,12\%$) и магнием ($Mg_{ост} 0,015-0,020\%$), что обеспечивает образование графитных включений с фактором формы 0,80-0,85.

При этом расход более дорогого ферросилиция уменьшился.

Таблица 1

Параметры изготовления литых валков

Группа валков	Количество металла, %		Расход присадок, % по массе					Уровень заполнения формы верхней шейки основным металлом
	основного	сердцевины	ФС30-РЗМ30	КМг6	Шлак легирующий	ФС75	Шлак графитизирующий	
1	70	30	0,75	0,8	3,0	5,0	5,0	0,22
2	75	25	1,00	1,0	4,0	5,5	6,0	0,25
3	72	28	1,50	1,2	5,0	6,0	7,0	0,28
4	72	28	2,0	1,5	6,0	7,0	8,0	0,28
5	72	28	0,5	0,5	2,0	4,0	4,0	0,28
-	75	25	-	-	-	8,0	-	0,25

Примечание. При текущем производстве валков расход металлического магния составляет 0,5%.

Для увеличения дисперсности продуктов распада аустенита в материале сердцевины и шеек валков применили обработку шлаком, содержащим цирконий. Оптимальное содержание циркония в металле

должно быть 0,10-0,15%, поэтому с учетом усвоения циркония из шлака (90-95%) расход его должен быть 5-7 мас.%.

Таким образом, исходя из вышеизложенного в металле сердцевины необходимо иметь 3-6% кремния, тогда при смешении основного металла (без магния) со вторым (без РЗМ) получим необходимые соотношения остаточных содержаний магния, РЗМ и кремния (табл.2).

Таблица 2

Химический состав рабочего слоя и шеек опытных валков

Группа валков	Содержание химических элементов, % ¹⁾									
	C	Si	Mn	P	S	Nb	Zr	РЗМ	Mg	Fe
-	3,15	1,02/2,01	0,58	0,14	0,01	-	-	0,17/0,01	0,013/0,04	ост.
1	3,05	1,01/1,50	0,57	0,15	0,01	0,11/-	- /0,10	0,20/0,09	-/0,015	ост
2	3,07	1,12/1,57	0,54	0,17	0,01	0,16/-	- /0,12	0,23/0,10	-/0,018	ост
3	3,14	1,18/1,70	0,65	0,17	0,01	0,19/-	- /0,15	0,29/0,12	-/0,020	ост
4	3,18	0,99/1,91	0,51	0,13	0,01	0,25/-	- /0,21	0,39/0,20	-/0,025	ост
5	3,10	1,05/1,40	0,57	0,12	0,02	0,06/-	- /0,07	0,14/0,06	-/0,010	ост

¹⁾ В числителе приведены содержания элемента в рабочем слое, в знаменателе - в шейках валков.

В результате проведенных испытаний свойств материала рабочего слоя и шеек опытных валков (образцы вырезали при механической обработке валков) установлено, что применение шлаков, содержащих ниобий и цирконий, оправдано, так как свойства материала рабочего слоя повысились у валков, отлитых с их применением, на 31% - предел прочности при изгибе $\sigma_{в}^{изг}$, на 43% - предел прочности при растяжении $\sigma_{в}^p$, на 29% - износостойкость, на 7% - теплопроводность и на 5% снизился модуль упругости (табл.3). Свойства же материала шеек увеличились на 28% - предел прочности при изгибе и на 42% - предел прочности при растяжении (см. табл.3). При этом дисперсность перлита в микроструктуре чугуна рабочего слоя опытных валков характеризовалась баллом ПД0,5, а в валках текущего производства - ПД1,0 и ПД1,5.

Таблица 3

Свойства материала рабочего слоя и шеек прокатных валков

Номер группы валков	Свойства чугуна рабочего слоя					Свойства чугуна шеек	
	Предел прочности $\sigma_{в}^{изг}$, МПа	Предел прочности $\sigma_{в}^p$, МПа	Износостойкость, г	Модуль упругости, МПа	Теплопроводность, кал/см·с·К	Предел прочности $\sigma_{в}^{изг}$, МПа	Предел прочности $\sigma_{в}^p$, МПа
-	510	375	0,043	188000	0,135	550	400
1	660	530	0,031	180000	0,120	705	570
2	670	535	0,030	178000	0,125	705	570
3	675	535	0,028	175000	0,125	720	575
4	665	540	0,033	185000	0,130	680	565
5	655	530	0,038	180000	0,120	640	550

Опытная партия прокатных валков, отлитая с использованием отходов специальных производств и комплексных модификаторов показала, что разработанная технология литья позволяет улучшить условия труда в вальцелитейном цехе и снизить брак по низкой твердости и пластинчатому графиту на 6,5%. Кроме того, при использовании такого способа изготовления валков исполнения ЛШ-57 исключается модифицирование металлическим магнием и необходимость в баллонах для модифицирования, а также снижается расход ферросилиция, что приводит к снижению себестоимости прокатного валка.

Выводы

Предложено и обосновано применение в качестве легирующих элементов отходов специальных производств (шлаков, содержащих ниобий или цирконий) для литья чугуновых прокатных валков. Ранее в вальцелитейном производстве подобные отходы не применяли. Проведенные исследования позволили разработать технологический процесс литья прокатных валков исполнения ЛШ-57 с использованием для обработки валковых расплавов отходов специальных производств, содержащих легирующие элементы. Использование шлаков, содержащих ниобий и цирконий, позволяет повысить свойства чугунов с одновременным увеличением коэффициентов усвоения легирующих элементов, что в комплексе с низкой ценой указанных шлаков позволяет снизить стоимость обработки расплавов.

ЛИТЕРАТУРА

2. Комплексные сплавы для легирования, раскисления и модифицирования (каталог): Сост. А.П.Бушуев, С.В.Безобразов, А.С.Дубровин.- М.: Черметинформация, 1973.- 37 с.

3. Рудницкий Л.С. Металлургические основы производства чугунных валков прогрессивных видов: Автореф. дис. ... доктора техн. наук: 05.16.04/ Моск. ин-т стали и спл.– М., 1981.- 49 с.
4. Боков Л.Ф. Исследование и применение комплекснолегированных чугунов для отливки сортопрокатных валков: Автореф. дис. кандидата техн. наук: 05.323/ Днепропетр. металлург. ин-т. - Д., 1973. - 21 с.
5. Литовка В.И., Волощенко М.В. О влиянии циркония на размеры включений графита в чугуне // Редкоземельные металлы в сплавах. - К.-О.: ИПЛ АН УССР, 1969. - С. 160 -163.
6. Использование отвальных шлаков производства металлического марганца при выплавке стали / Ю.А.Шульте, М.И.Гасик, М.С.Шрамко и др.// Сталь. - 1984. - № 9. - С. 37.
7. Грабеклис А.А. Переработка и использование шлаков ферросплавного производства // Сталь. - 1980. - № 11. - С. 978.
8. Применение отходов титаномагниевого производства для модифицирования стального и чугунного литья / Ю.И.Людковский, Л.Б.Черепинский, В.А.Федьков, Г.А.Федьков // Цветная металлургия. - 1983. - № 22. - С. 30 - 40.
9. Леках С.Н., Слуцкий А.Г., Трибушевский В.Л. Легирование чугуна из шлаковой фазы // Литейное производство. - 1998. - №10. - С. 8.
10. Применение отходов абразивного производства при выплавке серого чугуна / Л.К.Чеботарь, В.С.Шитиков, В.Л.Ларичкин, Ю.И.Величкова // Литейное производство. - 1979. - № 9. - С. 31.

УДК 621.771

А. П. Иванова, П.И. Штыцко

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРИВОДНОГО МЕХАНИЗМА РАБОЧЕЙ КЛЕТИ СТАНОВ ХПТ

Постановка задачи – обоснование выбора элементов кинематических пар в подвижных соединениях приводного механизма рабочей клетки с целью получения самоустанавливающейся схемы без избыточных связей.

Рабочая клетка станов холодной прокатки труб (ХПТ) приводится в возвратно-поступательное движение с помощью кривошипно-шатунного механизма (рис.1,а), включающего две кривошипные шестерни 1, установленные на валу и два шатуна 2 и 4, соединенные с клетью 3. Кинематическую схему механизма обычно оценивают по наличию в ней избыточных связей и лишних подвижностей.

Структурный анализ механизма выполнен по формулам Чебышева П.Л. и Малышева А.П.. Существуют общие закономерности в строении самых различных механизмов, связывающие число степеней подвижности с числом звеньев и числом и видом его кинематических пар. Математические выражения этих зависимостей носят названия структурных формул [1].

Для плоских механизмов степень подвижности определяется по формуле Чебышева П.Л.

$$W = 3n - 2p_1 - p_2, \quad (1)$$

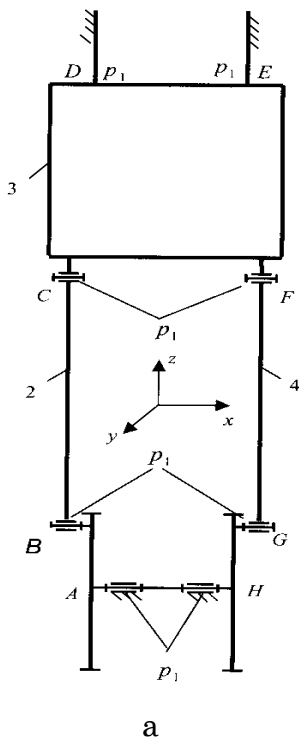
а для пространственных по формуле Малышева А.П.

$$W = 6n - 5p_1 - 4p_2 - 3p_3 - 2p_4 - p_5, \quad (2)$$

где n – число подвижных звеньев; p_1, p_2, p_3, p_4 – число одно-, двух-, трех-, четырех- и пятиподвижных кинематических пар. Схему механизма можно отнести к плоской, так как его звенья движутся в параллельных плоскостях. В схеме $n = 4$ и $p_1 = 5$, тогда $W = 3 \cdot 4 - 2 \cdot 5 = 2$.

В общем число наложенных связей может войти некоторое число q избыточных (повторных) связей, которые дублируют другие связи, не уменьшая подвижность механизма, а только обращают его в статически неопределенную систему. Механизмы с избыточными

связями требуют повышенной точности изготовления, в противном случае в процессе сборки звенья механизма деформируются, что вызывает нагружение кинематических пар дополнительными силами (сверх тех основных для которых механизм предназначен). В приводном механизме с избыточными связями трение в кинематических парах может сильно увеличиться и привести к заклиниванию звеньев, поэтому избыточные связи в этом механизме нежелательны. Производство приводных механизмов станков ХПТ можно отнести к массовому.



$W = 2$	2	2
$n = 4$	-24	6
$p_1 = 5$	25	-5
$K = 1$	3	3

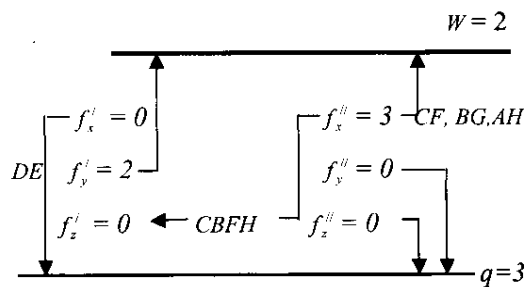


Рисунок 1 - Кинематическая схема механизма: а) во всех соединениях p_1 ; б) таблица подвижностей

Технология их сборки сравнительно проста, она сводится к складыванию и свинчиванию деталей и не требует ручной подгонки. Однако размеры отдельных звеньев трудно выполнить точно, так как последние состоят из отдельных деталей и при их соединении допуски на размеры могут складываться. Размеры звеньев механизма изменяются также в процессе эксплуатации вследствие износа, регулировки зазоров в кинематических парах, упругих деформаций, расширения от нагрева, а также от ошибок при ремонте и сборке.

В двоярном кривошипно-шатунном механизме (два шатуна соединены с клетью) допуски на длины шатунов должны быть минимальными. Необходимо также с большой точностью выдерживать

условие параллельности кривошипов. Учитывая, что в реальных конструкциях приводных механизмов возможны перечисленные выше особенности их изготовления, сборки и работы, то их кинематическую схему следует рассматривать, как пространственную. Количество избыточных связей q в этом случае необходимо определять по формуле Малышева А.П. [1].

$$q = W - 6n + 5p_1 + 4p_2 + 3p_3 + 2p_4 + p_5 \quad (3)$$

В приведенной на (рис.1а) схеме $n = 4, p_1 = 5, W = 2$.

$$q = 2 = 6 \cdot 4 - 5 \cdot 5 = 3$$

Другую структурную формулу предложил Озол Я.Г. [2]. Он поддерживает необходимость устранения избыточных связей и дает сразу формулу для их определения

$$q = W + 6 \cdot k - f, \quad (4)$$

где $k = p - n$ – число независимых контуров в механизме, отличающихся друг от друга, по крайней мере, одним звеном или одной кинематической парой; $f = p + 2p_2 + 3p_3 + 4p_4 + 5p_5$ – сумма подвижностей кинематических пар, p – количество кинематических пар, n – количество подвижных звеньев. На схеме приводного механизма (рис.1,а) $n = 4, f = 5, p_1 = 5 \cdot 1 = 5, k = 5 - 4$ и $q = 2 + 6 \cdot 1 - 5 = 3$ такое же как и по формуле Малышева А.П.

Методика исследования подвижностей в кинематических парах. При анализе кинематической схемы приводного механизма клетки (в которой известны кинематические пары и их расположение) необходимо уметь определить где и какие имеются подвижности и избыточные связи. Формулы Малышева и Озола дают одну зависимость между структурными параметрами, а их может быть несколько. Ответ на этот вопрос можно найти воспользовавшись исследованиями подвижностей механизмов, приведенными в работах [3] и [4]. В статье использованы основные теоретические положения этих работ, для структурного анализа приводного механизма рабочей клетки стана ХПТ. Сумму подвижностей кинематических пар, определяемую из уравнения (4) $f = 6 \cdot k + W - q$, раскладываем по осям координат. Так как f представляет собой арифметическую сумму, то и в разложение войдет арифметическая сумма: и $f = f'_x + f'_y + f'_z + f''_x + f''_y + f''_z$, где f'_x, f'_y, f'_z – сумма линейных

подвижностей по осям x, y, z ; f_x'', f_y'', f_z'' - сумма угловых подвижностей вокруг осей x, y, z .

Для одноконтурного механизма наличие всех трех угловых подвижностей является необходимым условием, чтобы контур сомкнулся без натяга, то есть $f_x'' \geq 1, f_y'' \geq 1, f_z'' \geq 1$

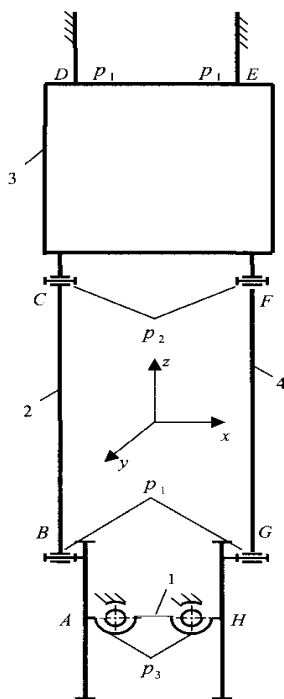
Отсутствие хотя бы одной из этих подвижностей будет означать натяг и избыточную связь.

Для линейных подвижностей при избытке угловых подвижностей выполнение аналогичного условия необязательно, так как линейное сближение при сборке может происходить не только за счет линейной подвижности кинематических пар, но и за счет поворота звеньев вокруг оси перпендикулярной к направлению линейной подвижности. Поэтому линейную подвижность можно заменить угловой вокруг оси перпендикулярной к направлению линейной подвижности, необходимо только проверить наличие звена, которое при этом повороте дало бы линейное перемещение в нужном направлении, а также чтобы эта возможность не нарушалась в некоторых положениях механизма, например в мертвых точках.

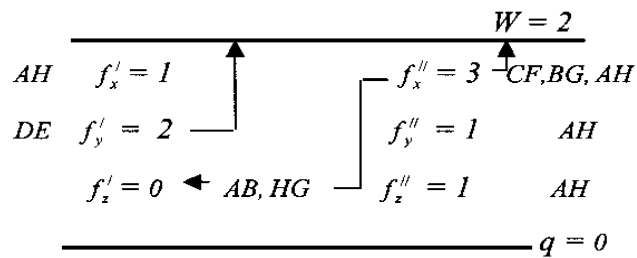
Результаты исследования. Применим этот метод к приводному механизму у которого все кинематические пары одноподвижные (рис.1,а). Оси координат на кинематической схеме механизма направим как показано на рисунке. Подвижности кинематических пар вносим в таблицу (рис.1,б), линейные в левый столбец, а угловые в правый. Замену линейной подвижности угловой изображаем зигзагообразной стрелкой, идущей от угловой подвижности к линейной. На стрелке обозначаем звено, поворачиваемое при этой замене. Первой в этой замене пишем кинематическую пару, угловая подвижность которой идет на замену. Это важно, чтобы одно и то же звено не использовалось дважды путем поворота вокруг той же оси (звено можно поворачивать вокруг разных осей). Из трех возможных перемещений вокруг оси x одна пойдет на замыкание контура, одна на замену f_z и одна останется как подвижность механизма. В механизме остаются три избыточных связи, которые создают натяги вокруг осей y и z , а также натяг вдоль оси x . Наличие в механизме трех избыточных связей подтверждается также формулами Малышева и Озола. На (рис.1,а), в правом верхнем углу, приведена

таблица подсчета по структурным формулам: в среднем столбце – количество связей по формуле Малышева, а в правом – подвижности по формуле Озола.

Для того чтобы механизм был статически определимый (не имел избыточных связей) необходимо сумму подвижностей в кинематических парах увеличить не менее чем на три единицы. В точках С и F одноподвижные кинематические пары p_1 заменим на двухподвижные p_2 , а в точках А и Н – на трехподвижные (рис.2,а). Как следует из таблицы распределения подвижностей (рис. 2,б) в этой схеме избыточных связей нет.



$W = 2$	2	2
$n = 4$	-24	6
$p_1 = 4$	20	-4
$p_2 = 1$	2	-4
$K = 1$	0	0

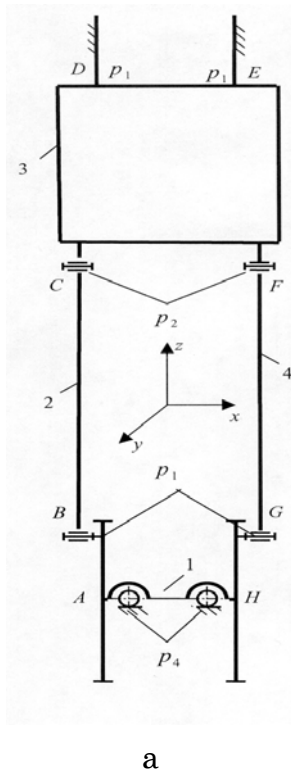


б

а

Рисунок 2 - Кинематическая схема механизма: а) p_2 – в точках С, F; p_3 – в точках А, Н; б) таблица подвижностей.

В другом варианте (рис.3,а) в точках А и Н поставим четырехподвижные кинематические пары p_4 (что достигается применением шариковых или роликовых двухрядных подшипников типа 1000 или 3000), а в остальных соединениях оставим одноподвижные p_1 . В этом варианте также отсутствуют избыточные связи (рис.3,б).



$W = 2$	2	2
$n = 4$	-24	6
$p_i = 5$	25	-5
$K = 1$	3	3

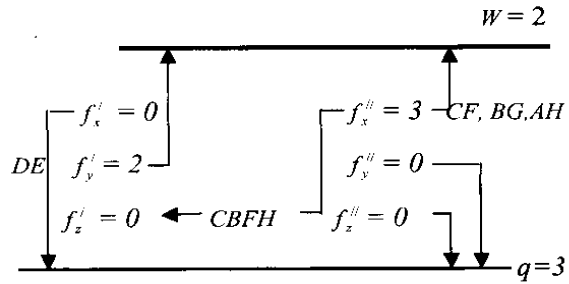


Рисунок 3 - Кинематическая схема механизма: а) р4 - в точках А,Н; б) таблица подвижностей

Выводы. Проведенный анализ кинематической схемы приводного механизма с помощью структурных формул Малышева и Озола позволил установить, что в схеме есть три избыточных связи. Этот прием удобен для проверки заданной или выбранной схемы механизма. Возможность уменьшения, или полного устранения, избыточных связей выполнена путем изучения подвижностей в замкнутом контуре, в котором подвижности раскладывались по трем осям координат. Уменьшение количества избыточных связей получено за счет увеличения подвижностей кинематических пар в замкнутом контуре.

Предложено два варианта схемы без избыточных связей (самоустанавливающиеся механизмы), которые собираются без натягов в кинематических парах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кожевников С.Н. Теория механизмов и машин. – М.: Машиностроение, 1969. – 383с.
2. Озол О.Г. Теория механизмов и машин. – М.: Машиностроение, 1984. – 432с.
3. Решетов Л.Н. Определение подвижностей и избыточных связей в механизмах. – Известия ВУЗОВ. – М.: Машиностроение, 1971, №8, с.71-79.

4. Шамайденко Н.Е. Опыт построения схемы образования механизмов. – ТР. ВЗМИ. Исследования по динамике механизмов и машинных агрегатов. – 1969, вып. IX – с.194 – 212.

УДК 628.543

А.К. Керимов

ГИДРАВЛИКА ТОНКОСЛОЙНОГО ОТСТОЙНИКА

Интенсификация процесса отстаивания жидкости являлась целью мно-гих работ, проведенных за последние десятилетия, в результате которых было установлено, что наиболее эффективным способом является отстаивание стоков в тонком слое [1].

Опыт практического осуществления идей выделения взвесей из воды в тонком слое показал, что несмотря на кажущуюся простоту организации этого процесса, в известных конструкциях сооружений не удаётся в полной мере достичь преимуществ, которые может дать этом перспективный метод [2,3]. Причиной тому в первую очередь сложность организации равномерного водораспределения по всему рабочему сечению сооружения.

Известные конструктивные решения вопроса равномерного водораспределения в тонкослойных отстойниках с наклонным движением в них воды не могут считаться лучшими, т.к. приняты произвольно и несогласуются с законами гидравлики, доказывающих их правомерность.

В самом деле, для достижения равных скоростей течения жидкости между всеми параллельными пластинами необходимо, чтобы поток воды, двигающийся над ними, равномерно раздавал свой расход по межпластинчатым зазорам (рис1). Таким образом, объем 1 над пластинами является распределительным объемом, а поток воды в нем-открытым потоком с переменной массой. Условие отвода из основного потока переменной массы равных расходов воды требует, чтобы скорость этого потока в точках ответвления была одинаковой [4]. Этот закон нарушается при горизонтальном или наклонном расположении линии верхних кромок пластин, т.к. в распределительном объеме постоянного сечения происходит непрерывное уменьшение расхода и скорости воды. Кроме того, в любом открытом потоке воды, каким является поток в распределителе, верхние слои всегда движутся с большими

скоростями, чем нижние [5]. Для того, чтобы кромки пластин отсекали из потока воды в распределителе равные расходы, необходимо обеспечить соответствие между возвышением каждой кромки пластин над предыдущей со скоростью воды в данном сечении, т.е. возвышение друг над другом смежных пластин по длине распределителя должно быть различным. В таком случае линия кромок пластин прямой быть не может. Ни одно из известных решений этого вопроса не согласуется с законами гидравлики.

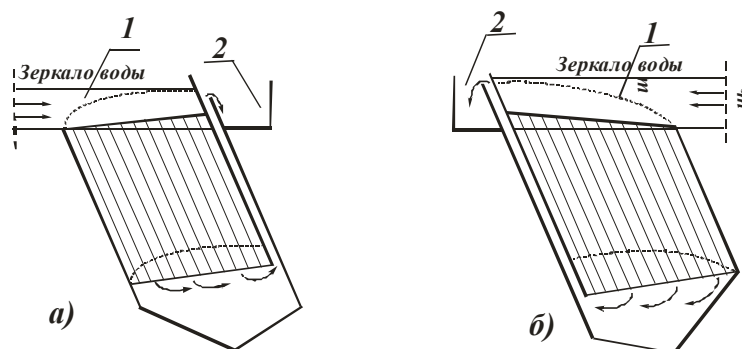


Рисунок 1 - Схема тонкослойного отстойника а) набегающий поток, б) скользящий поток

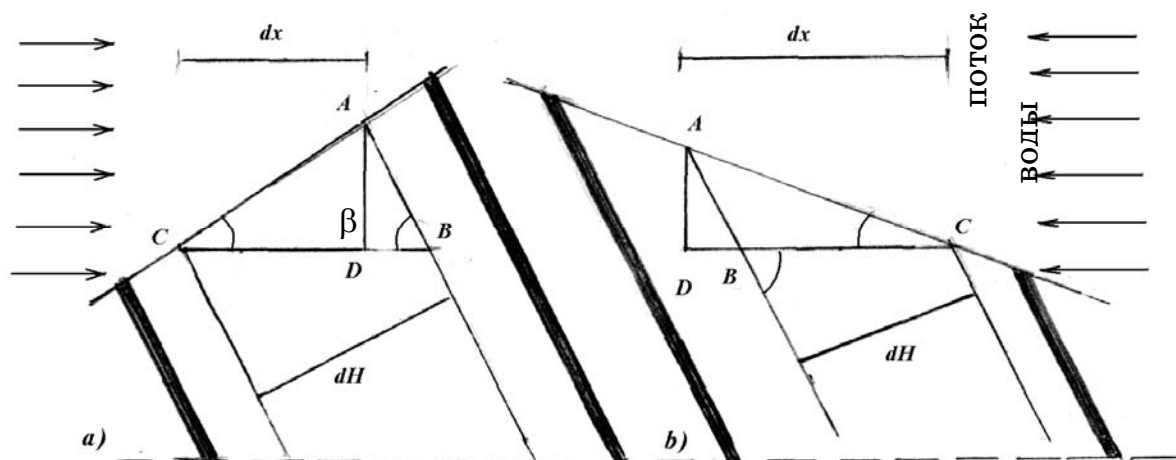


Рисунок 2 - Схема определения dx при набегающем потоке а) и скользящем потоке (б)

Решающим фактором, определяющим степень использования рабочего объема, является режим движения в распределителе потока воды, формирующийся в зависимости от конструктивных и гидравлических параметров отстойника, таких как расход воды, в сооружении, глубина и длина распределителя, угол оттока воды из основного потока в межпластинчатое пространство, скорость течения воды между пластинами. Все указанные параметры непосредственно

связаны с технологическими расчетами процесса отстаивания и только глубина распределителя может приниматься произвольно, т.к. не участвует в этих расчетах. В то же время регулирование её величины по длине распределителя может оказаться достаточным для достижения равного оттока воды во все межпластинчатые пространства. В этом случае решение данного вопроса сведется к определению очертания линии, образованной в продольном сечении сооружения верхними и нижними кромками параллельных пластин.

Рассмотрим поток воды в распределительном объеме, как поток с равномерно убывающим расходом вдоль пути и воспользуемся теорией гидравлики переменной массы [4], общее уравнение которой имеет вид:

$$\frac{\alpha_0}{g\omega} d\left(\frac{Q^2}{\omega}\right) + d\left(\frac{P}{\gamma} + Z\right) + i_f dx - \frac{\alpha_0\theta}{g\omega} dQ, \quad (1)$$

где α_0 - корректив скорости; g - ускорение сил тяжести; Q - расход воды; ω -сечение распределителя; ω -живое сечение потока переменной массы; $\frac{P}{\gamma}$ -пьезометрическая высота; Z -геометрический напор; i_f – потери напора на трение у боковых стенок распределителя; θ -проекция скорости отделяемых расходов воды на направление скорости основного потока в распределителе; Q – элементарный расход воды на бесконечно малой длине dx распределителя пределах распределительного объема.

Параллельные пластины в сооружении могут устанавливаться двояко. В одном случае основной поток воды в распределителе набегаёт на верхние кромки пластин, образуя так называемый “набегающий поток” (рис 1,а), в другом-скользит по их кромкам- “скользящий поток” (рис.1, в). В первом случае основной поток при входе в межпластинчатое пространство отклоняется на угол меньше 90° и направление проекции θ скорости оттока воды совпадает с направлением основного потока. Во втором случае основной поток отклоняется на угол больший 90° , а направление проекции θ противоположно направлению основного потока, и значение θ отрицательное.

Уровень воды в распределительном объеме P постоянен и выше уровня воды в отводящем канале 2 на величину перепада Z . Линия

гидростатического напора расположена на свободном зеркале воды, а поток жидкости находится под воздействием сил тяжести и сил давления. В этом случае для реальных потоков вязкой жидкости с плавно изменяющимся движением давление распределяется по гидростатическому закону, т.е.

$$\frac{P}{\gamma} + Z = const.$$

Тогда уравнение (1), упростится до вида

$$d\left(\frac{Q^2}{\omega}\right) - \theta \cdot dQ = 0 \quad (2)$$

При угле α наклона пластин к горизонту проекция θ скорости воды между пластинами на ось основного потока равна $\theta = \pm y \cdot \cos \alpha \cdot \sqrt{2gz}$, где отрицательное значение принимается при «скользящем потоке» а Y коэффициент скорости. Используя зависимость, характеризующую истечение жидкости через затопленную щель и геометрические схемы (рис.2), определим значения θ и dQ и подставим их в (2). Проинтегрируем полученное уравнения имея ввиду, что переменной вдоль пути потока является его глубина h

$$h = \frac{Q^2 h_0}{Q_0^2 \pm h_0 B^2 \varepsilon \theta^2 (tg \alpha \mp tg \beta) \cdot X}$$

Верхние знаки в знаменателе принимаются при скользящем потоке. воды Уравнение даёт возможность получить единственно верное очертание кривой, обеспечивающей равномерный отток во все межпластинчатые пространства тонкослойного отстойника.

Выводы

Решающим фактором, определяющим степень использования рабочего объёма тонкослойного отстойника является режим движения в распределителе потока воды с переменной массой, формирование, которого находится в зависимости от конструктивных и гидравлических параметров сооружения. Известные конструктивных решена вора распределения в подобных отстойниках не согласуются с законами гидравлики.

Для наиболее полного использования рабочего объёма тонкослойного отстойника верхние кромки параллельных пластин в его продольном сечении должны располагаться по кривой,

рассчитанной массы. Полученная аналитическая зависимость применима для всех конструктивных видов тонкослойных отстойников.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корабельников В.М. исследование процесса осаждения взвеси в тонкослойных отстойниках. Сб. научных трудов.АКХ ОНТИ, М. 1976.
2. Ульмгрен Л., Андерсон К. Пластинчатое осаждение при очистке вод. Швеция, ж. «Ваттен»,1972,29, №5, с.455-468.
3. Лемура М.В. Проектирование тонкослойных отстойников, Киев, «Будивильник», 1981, с.186.
4. Петров Г.А. Гидравлика переменной массы. Изд. Харьковского университета им. А.М.Горького, Харьков, 1964, с.33-40.
5. Справочник по гидравлическим расчётам под редакцией Киселёва Н.А. Изд. «Энергия», М., 1972, с.107-109

УДК 620.179

В.А. Марунич, А.Ю. Яриз

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ С АКТИВНЫМ КОНТРОЛЕМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НЕЖЕСТКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Введение

В современном машиностроении нежесткие изделия, в том числе и крупногабаритные (корпуса двигательных установок, топливных систем, крупногабаритные емкости различного назначения, изделия судостроения), представляют сложность с позиции обеспечения точности обработки.

Особенностью вышеуказанных изделий является низкая пространственная жесткость.

В процессе механической обработки на точность влияет ряд технологических факторов, каждый из которых вызывает образование характерных первичных погрешностей. В сумме они составляют общую погрешность обработки [1].

При обработке заготовок на предварительно настроенном станке, суммарная погрешность механической обработки определяется из выражения [1]:

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{\Delta_{\delta\ddot{a}}^2 + \Delta_{\delta\ddot{n}\delta}^2 + \Delta_i^2 + 3 \cdot \Delta_{\dot{e}}^2 + 3 \cdot \Delta_{\Theta}^2 + \Sigma\Delta_{\delta}} \quad (1)$$

где $\Delta_{\gamma\delta}$ – погрешность от упругих деформаций элементов технологической системы;

Δ_{yct} – погрешность установки заготовки;

Δ_n – погрешность наладки станка;

Δ_u – погрешность, вызванная износом режущего инструмента;

Δ_{θ} – погрешность от воздействий температурных деформаций;

Δ_{ϕ} – сумма погрешностей формы, вызываемых геометрическими неточностями станка и деформациями заготовки.

Для нежестких изделий наибольшую погрешность обработки вызывает погрешность деформации самой заготовки в процессе резания. Не смотря на то, что силы резания при обработке

большинства полимерных материалов незначительны, обеспечить необходимую точность вышеуказанных изделий ввиду их низкой пространственной жесткости и влияния большого числа факторов методом предварительной настройки оборудования не представляется возможным. Вследствие этого, невозможно предварительно рассчитать величину суммарной погрешности обработки.

Постановка проблемы

С учетом вышеупомянутого, при обработке резанием полимерных покрытий, нанесенных на металлические изделия, возникает сложная технологическая задача обеспечения требуемой точности толщины покрытия. Таким образом, появилась необходимость обеспечения высокой точности и производительности лезвийной обработки полимерных покрытий на нежестких изделиях, в том числе и крупногабаритных, что в свою очередь только усложняет задачу из-за больших габаритных размеров и малой жесткости. Для решения поставленной задачи необходимо:

1. Разработать новую технологию, включающую активный неразрушающий контроль толщины покрытия при обработке резанием.
2. Установить зависимость обеспечения высокой точности обработки на основе особенностей неразрушающего способа контроля.

Проведение исследований

Одним из путей повышения точности технологических процессов механической обработки является использование активного контроля или автоматизированных систем управления точностью обработки (АСУТО). Управление процессом в подобных системах осуществляется на основе полученной от него информации. Как известно, те системы, в которых информация о ходе технологического процесса формируется на основе размерного контроля параметра и поступает в управляющее устройство непрерывно, как в период цикла обработки, так и после его завершения, называют системами активного контроля.

Полученная информация о величине и направлении изменения размеров позволяет оптимизировать процесс обработки и обеспечить заданный уровень точности изготавливаемых деталей [2].

Для обеспечения точности толщины диэлектрического покрытия, выполняющего теплоизоляционную, теплозащитную или др. функцию, необходимо подобрать оптимальный метод неразрушающего контроля, позволяющий с минимальными погрешностью и затратами обеспечить обработку этих покрытий с высокой точностью.

Проведен анализ в смежных областях знаний по бесконтактному контролю толщины диэлектрического покрытия. Были рассмотрены способы, наиболее эффективные с позиции применения активного контроля в процессе обработки резанием.

Анализ известных способов бесконтактного контроля, приведенных в работе [3], таких как визуально-оптический, капиллярная дефектоскопия, магнитный способ контроля, способ контроля вихревыми токами, акустический способ контроля и контроль просвечиванием, показал, что наиболее рациональные для нашей технологической задачи обеспечения активного контроля являются: **магнитный способ контроля, акустический способ контроля и контроль способом вихревых токов.**

Для измерения толщины диэлектрического покрытия на металлических изделиях применяется **магнитный способ контроля**, принцип действия которого основан на регистрации изменений магнитного сопротивления до контролируемого участка, вызванных вариацией расстояния между датчиком и поверхностью изделия. Точность измерения толщины покрытий зависит от различных технологических и конструктивных факторов: кривизны и неплоскостности контролируемой поверхности, шероховатости поверхности, толщины, состояния и свойств материала основы и т.д. Практически данный способ может обеспечить точность в пределах $\pm 10\%$ от верхнего предела шкалы толщиномера. При этом шероховатость поверхности металлического изделия должна быть в пределах $R_z = 80$ мкм. Существенным недостатком, ограничивающим технологические возможности такого способа контроля, является то, что максимальная контролируемая толщина покрытия - 3 мм, а для достаточной точности контроля необходима низкая шероховатость металлического изделия.

Рассмотрим **акустический способ контроля**. Измерение толщины покрытий металлов ультразвуковым способом основано на различии в

поглощении ультразвуковых колебаний покрытием и основой. Ультразвуковой метод измерения толщины диэлектрических покрытий отличается высокой производительностью, достаточной для практики точностью (средняя погрешность измерения составляет 8-10%) и позволяет проводить контрольные операции без нарушения сплошности слоёв и покрытий. Однако данный способ контроля не представляется возможным использовать в качестве активного контроля в виду наличия мертвой зоны, которая ограничивает возможность контроля толщины покрытия в пределах 2,5мм.

Среди всех рассмотренных способов неразрушающего контроля наиболее рациональным, на наш взгляд, является вихретоковый способ.

Контроль способом **вихревых токов** основан на регистрации изменения электромагнитного поля возбуждающей катушки под действием электромагнитного поля вихревых токов, наводимых этой катушкой в контролируемом объекте. При контроле способом вихревых токов используют зависимость амплитуды, фазы, траекторий, переходных характеристик и спектра частот токов, возбуждаемых в изделии, от его формы и размеров, физико-механических свойств и сплошности материала, расстояния до датчика, частоты и скорости перемещений, в том числе вибрации.

К числу главных достоинств вихретокового способа следует отнести электрическую природу сигнала, быстроедействие, что позволяет легко автоматизировать контроль; возможность контроля толщины покрытий в пределах от нескольких микрометров до десятков миллиметров; точность измерения для большинства приборов находится в пределах 5 - 10%. Контроль вихревыми токами выполняют без непосредственного контакта преобразователей с объектом. Это позволяет вести контроль при взаимном перемещении преобразователя и объекта с большой скоростью (до 60 м/с) и облегчает тем самым автоматизацию контроля.

На рисунке 1 приведена обобщённая функциональная схема прибора с накладным измерительным преобразователем [4]. Измерительный преобразователь состоит из возбуждающей обмотки, подключённой к генератору переменного тока, и измерительной обмотки, подключённой к блоку измерения. Магнитное поле измерительного преобразователя возбуждает в плоском объекте

контроля концентрические вихревые токи, плотность которых максимальна на поверхности электропроводящего объекта в контуре, диаметр которого близок к диаметру возбуждающей обмотки. Магнитное поле вихревых токов противоположно первичному магнитному полю возбуждающей обмотки, вследствие этого результирующее поле зависит от электромагнитных свойств контролируемого объекта и от расстояния между преобразователем и объектом, поскольку распределение плотности вихревых токов зависит от этих факторов. В измерительной обмотке преобразователя наводится ЭДС, определяемая потокоцеплением. Эта ЭДС служит сигналом, передающим информацию об объекте в блок измерения.

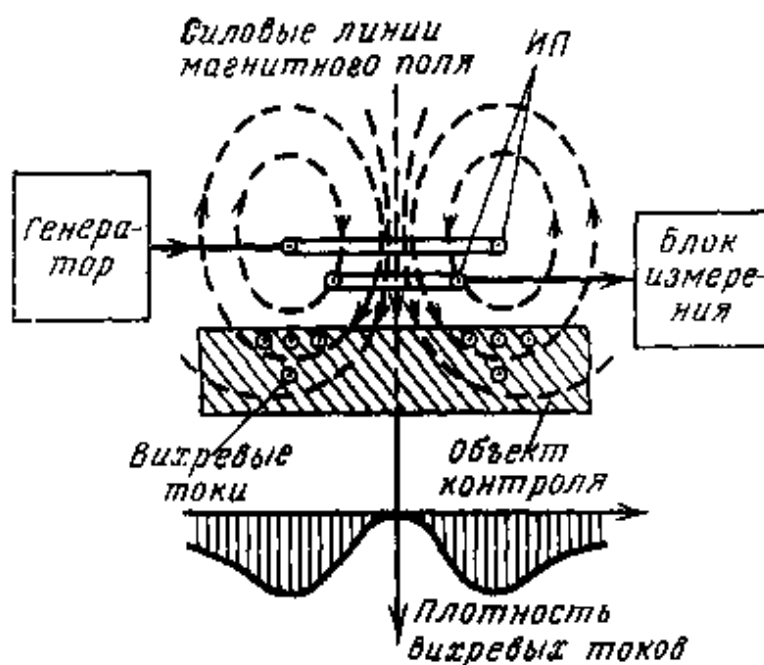


Рисунок 1 - Принцип действия прибора с накладным преобразователем

Следует заметить, что напряжение измерительной обмотки несёт информацию не только об одном параметре объекта контроля. В данном случае это напряжение зависит от толщины покрытия, от удельной электрической проводимости металлической подложки σ , от магнитной проницаемости μ , от состояния поверхности, от наличия и размеров дефектов, от ориентации оси преобразователя и от скорости его движения относительно контролируемого объекта. Таким образом, информация вихретоковых преобразователей имеет многопараметровый характер. Высокая степень информативности вихретоковых преобразователей определяет достоинства и трудности

реализации способа вихревых токов. С одной стороны, способ вихревых токов позволяет осуществлять многопараметровый контроль, с другой стороны, он требует применения специальных приемов для разделения информации об отдельных параметрах объекта. При контроле толщины покрытия влияние остальных факторов на сигнал преобразователя является мешающим, и это влияние необходимо подавлять.

Другая особенность способа вихревых токов состоит в его бесконтактности. Взаимодействие измерительного преобразователя с объектом происходит обычно на расстояниях, достаточных для свободного движения измерительного преобразователя относительно объекта. Как правило, при электромагнитном контроле ограничения скорости налагаются не самим методом, а ограниченным быстродействием регистраторов информации или сортирующих устройств. Следствием этого является высокая производительность способа вихревых токов.

Одна из важных особенностей способа вихревых токов состоит в слабой зависимости результатов контроля от параметров окружающей среды. На сигналы вихретокового преобразователя практически не влияют влажность, давление и загрязненность газовой среды, радиоактивные излучения, загрязнение поверхности объекта контроля непроводящими веществами. Эта особенность вихретокового способа очень важна при обработке резанием диэлектрических покрытий, так как стружка является электростатичной и налипает на систему активного контроля.

Интенсивность и распределение вихревых токов в металле зависят от геометрических размеров датчика активного контроля, электрических и магнитных свойств металла, взаимного расположения преобразователя и обрабатываемого изделия, т.е. от многих параметров.

Конструкция и размеры датчика зависят от формы и размеров изделия и целей контроля. Вихревые токи протекают непосредственно под датчиком, в небольшом объеме изделия [4]. Их амплитуда и фаза различны в каждой точке на поверхности изделия и в глубине (рисунок 2).

Анализ пространственной картины вихревых токов необходим для понимания основ способа и его эффективного практического

использования. Рассмотрим в каждой точке пространства плотность вихревых токов δ и их фазу ψ . Возбуждаемые цилиндрическими датчиками вихревые токи протекают по окружностям, соосным с датчиком. Распределения δ и ψ вихревых токов в пространстве при контроле немагнитных материалов накладными датчиками показаны на рисунке 2.

Координаты ρ и z на рисунке 2 выражены через радиус эквивалентного контура вихревых токов, который равен R_q . Кривые 1 и 2 даны для различных условий возбуждения: 1 - для $\beta_0 = 20$ (β_0 - основной обобщенный параметр при контроле немагнитных материалов), сравнительно большой частоты или электропроводности; 2 - для $\beta_0 = 6$, существенно меньших значений этих величин.

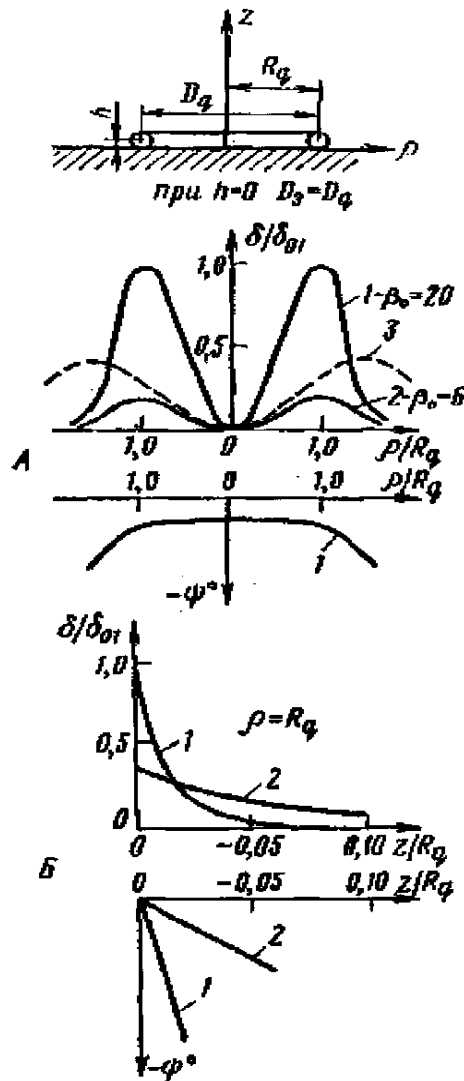


Рисунок 2 - Распределение плотности δ/δ_{01} - и фазы ψ вихревых токов, возбуждаемых витком в плоском изделии: А - по поверхности; Б - по

глубине; 1 - при высокой частоте; 2 - при низкой частоте; 3 - при наличии зазора между витком и изделием в случае высокой частоты

Плотность вихревых токов выражена через максимальное ее значение δ_{01} на поверхности при $\beta_0 = 20$. При контроле накладным датчиком (рисунок 2, А, $\delta/\delta_{01} - \rho/Rq$) на его оси $\delta = 0$. С увеличением ρ увеличивается δ , достигая максимума при $\rho = Rq$ (при $h = 0$).

Удаление датчика от поверхности изделия приводит к уменьшению максимума $\delta(\rho)$ и к увеличению радиуса эквивалентного контура вихревых токов (кривая 3). Фазы токов, находящихся внутри эквивалентного контура, одинаковы (рисунок 2, А, $\psi - z/Rq$). По мере углубления в металл, увеличении z (рисунок 2, Б), наблюдается резкое уменьшение плотности и запаздывание вихревых токов.

Анализ зависимостей $\delta(z, \rho, \beta_0)$ показывает, что на большей частоте для больших значений электропроводности в поверхностных слоях создаются вихревых токов большей плотности.

Таким образом, изучив принцип действия датчиков активного контроля способом вихревых токов, был сделан вывод, что для контроля толщины диэлектрических покрытий нежестких крупногабаритных изделий оптимальным является кольцевой двухобмоточный накладной датчик с максимальным основным обобщенным параметром β_0 . В то же время, бесконтактность и быстродействие способа вихревых токов позволяют автоматизировать процесс активного контроля, при этом его точность остаётся достаточно высокой.

Для упрощения расчётов каждую обмотку датчика принято заменять эквивалентным витком, а вихревые токи - эквивалентным контуром тока диаметром $D_{\text{э}}$ (рисунок 3). Поскольку для накладного датчика значение диаметра эквивалентного контура вихревых токов $D_{\text{э}}$ зависит от расстояния эквивалентного витка возбуждающей обмотки датчика до изделия h , его вычисляют по формуле [4]:

$$D_{\text{э}} = D_q + 1.5 \cdot h \quad (2)$$

где: $D_{\text{э}}$ - диаметр эквивалентного контура вихревых токов;

D_q - средний диаметр датчика активного контроля;

h - расстояние от поверхности металла до середины датчика активного контроля.

Точность обработки диэлектрических покрытий на нежестких изделиях будет достигать своего максимума в том случае, когда зона

наибольшей плотности вихревых токов будет совпадать с зоной резания. Такое условие достижимо когда диаметр режущего инструмента (например, торцевой фрезы) D_i равен диаметру эквивалентного контура вихревых токов D_ε .

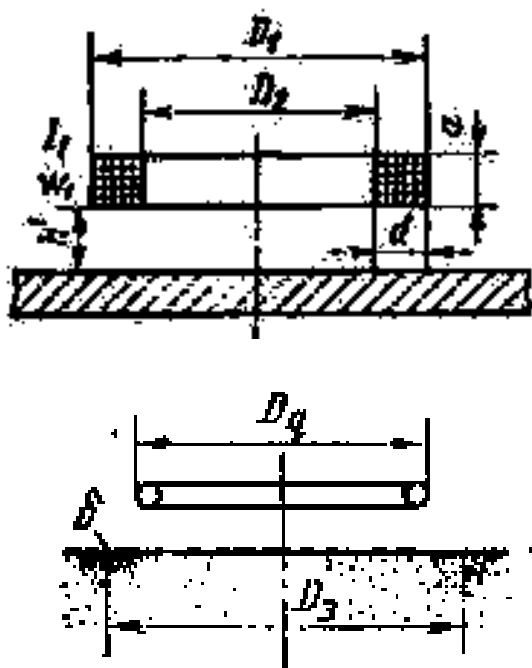


Рисунок 3 - Схемы замены обмоток датчиков эквивалентными витками, вихревых токов - эквивалентным контуром тока

Это условие выражено в зависимости диаметра инструмента D_i от среднего диаметра датчика активного контроля D_q на основании формулы (2) для расчёта эквивалентного контура вихревых токов:

$$D_\varepsilon = D_q + 1.5 \cdot (h' + a/2) \quad (3)$$

где: D_i - диаметр режущего инструмента (например, торцевой фрезы);

D_q - средний диаметр цилиндрического датчика активного контроля;

h' - расстояние от поверхности металла до торца датчика активного контроля;

a - толщина датчика активного контроля.

Анализ патентной информации показал, что все существующие на данный момент способы обеспечения требуемой толщины диэлектрического покрытия при его механической обработке, включающие активный контроль, не позволяют получить высокую точность обработанного покрытия на нежестких крупногабаритных изделиях. Это объясняется тем, что в процессе обработки не

учитывается реальное взаимное расположение зоны резания и зоны наибольшей плотности вихревых токов, которые определяют эффективность активного контроля. Таким образом, фактически осуществляется “ложное” слежение за толщиной покрытия.

Для повышения точности обработки резанием диэлектрического покрытия на нежестких крупногабаритных изделиях мы предлагаем применять новый метод обработки диэлектрических покрытий на крупногабаритных нежестких изделиях. Данный метод реализуется посредством устройства для обработки диэлектрических покрытий металлических изделий [5]. Принципиальная схема этого устройства показана на рисунке 4.

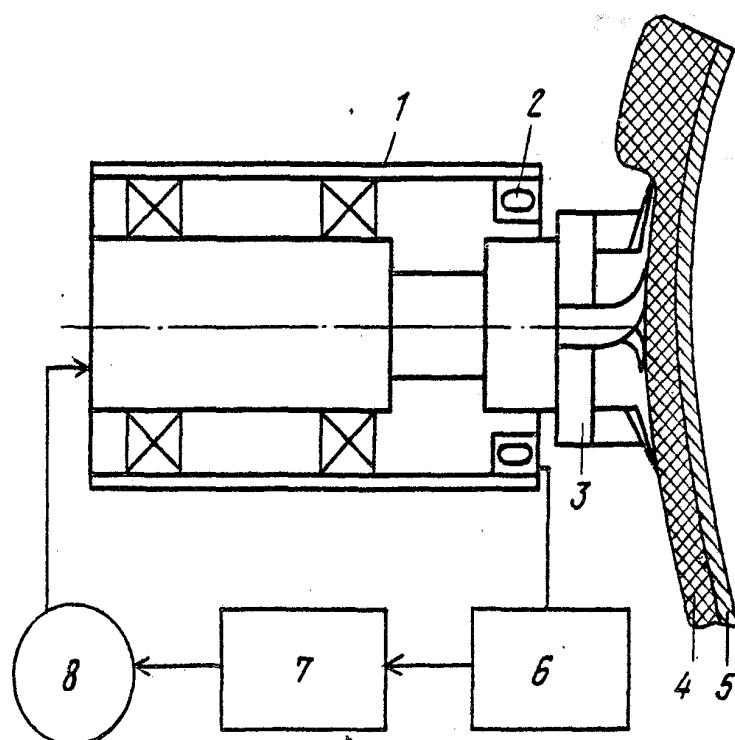


Рисунок 4 - Устройство для обработки диэлектрических покрытий металлических изделий

Устройство для обработки диэлектрических покрытий металлических изделий состоит из режущей головки 1 с кольцевым датчиком 2 и режущего инструмента 3. Кольцевой датчик 2 предназначен для измерения толщины диэлектрического покрытия 4 по отношению к металлической подложке 5 в зоне резания.

Для измерения расстояния от кольцевого датчика 2 до металлического изделия 5 устройство снабжено измерительным блоком 6, блоком управления 7, соединенным с исполнительным механизмом 8 поперечной подачи режущей головки 1.

Исполнительный механизм поперечной подачи 8 подводит или отводит режущую головку 1 от металлического изделия 5. Устройство также содержит механизм продольной подачи и привод вращения режущего инструмента (не показаны).

Метод обработки диэлектрических покрытий на крупногабаритных нежестких изделиях заключается в том, что перед непосредственной механической обработкой вышеуказанное устройство настраивают на заданную толщину таким образом, чтобы диаметр режущего инструмента находился в следующей зависимости от параметров кольцевого датчика вихретокового метода активного контроля:

$$D_{\dot{\epsilon}} = D_q + 1.5 \cdot (h' + a/2) \quad (3)$$

где: $D_{\dot{\epsilon}}$ - диаметр режущего инструмента (например, торцевой фрезы);

D_q - средний диаметр цилиндрического датчика активного контроля;

h' - расстояние от поверхности металла до торца датчика активного контроля;

a - толщина датчика активного контроля.

Настройку осуществляют с помощью эталона толщины покрытия, изготовленного из диэлектрического материала. Затем производится непосредственно механическая обработка.

Режущую головку 1 подводят к обрабатываемому материалу, включают привод вращения режущего инструмента 3 металлического изделия 5 и настраивают кольцевой датчик 2 на заданную толщину покрытия 4, одновременно врезаясь в обрабатываемый материал на соответствующую глубину резания. Потом включают привод вращения металлического изделия 5 и осуществляют обработку. Кольцевой датчик 2 через измерительный блок 6, блок управления 7 и исполнительный механизм поперечной подачи 8 делает стабилизацию режущей головки 1 на заданный размер по отношению к металлическому изделию 5.

Настроенный на заданную толщину диэлектрического покрытия, датчик подает сигнал об изменении расстояния от металла до датчика.

Таким образом, повышение точности обеспечения заданной толщины в процессе обработки диэлектрического покрытия на

нежестких изделиях при использовании вихретокового метода активного контроля достигнуто в результате расположения режущей части фрезы над зоной наибольшей плотности вихревых токов. Для реализации этого условия кольцевой датчик установлен соосно с режущим инструментом, корпус которого выполнен из немагнитного материала, а диаметр фрезы подобран таким образом, чтобы он находился в зависимости от конструкции и расположения датчика активного контроля толщины покрытия согласно формуле (3).

Выводы

1. Разработан новый метод технологии с активным контролем на базе вихретокового неразрушающего способа контроля.
2. Метод позволяет обеспечить высокую точность и производительность обработки резанием диэлектрических покрытий на нежестких крупногабаритных быстродвижущихся объектах.
3. Определена зависимость эффективного использования способа от диаметра режущего инструмента и от конструктивных параметров вихретокового датчика активного контроля.
4. Применение предложенного метода позволит получать поверхности сложной формы, в том числе и фасонные с достаточной точностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корсаков В.С. Точность механической обработки. М.: Машгиз, 1961. - 380 с.
2. Богуславский Л.А. Достижение требуемой точности обработки средствами активного контроля СТИН № 7, 1997 г. с.14-19.
3. Неразрушающий контроль качества изделий электромагнитными методами/ Герасимов В.Г., Останин Ю.А., Покровский А.Д. и др. – М.: Энергия, 1978. – 216 с., ил.
4. Самойлович Г.С. Неразрушающий контроль металлов и изделий. Справочник. - М.: Машиностроение, 1976. - 456 с., ил.
5. Патент України 23701. Пристрій для обробки діелектричних покриттів металевих виробів/ В.О. Маруніч, Г.Ю. Яріз. Бюл.№8-2007.

УДК 532.72.001.572

В.Д.Вернигора

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МАССООТДАЧИ ПРОЦЕССА ОТДЕЛЕНИЯ МАСЕЛ И ОСТАТКОВ СОЖ ОТ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ

Введение. Не возобновляемые природные ресурсы ограничены. Поэтому при современном уровне развития техники большое значение имеет комплексное использование минерального сырья и вовлечение в народное хозяйство новых его видов. Комплексному использованию сырья и разработке безотходных экологически чистых технологий посвящены исследования многих авторов [1-3].

Одним из этих путей является широкое использование порошковых материалов из металлических отходов, образующихся на машиностроительных предприятиях.

Получение порошков из шлифовальных шламов быстрорежущих, инструментальных высокохромистых, подшипниковых сталей включает селективный сбор шламов, их очистку от смазочно-охлаждающей жидкости, сепарацию абразивных частиц, восстановительный отжиг и прессование по специальной технологии, спекание. На примере шлифовальных шламов особенно явно демонстрируется ресурсосберегающий и природоохранный потенциал порошковых технологий: шламы, вывозимые на свалки в объеме до 1 млн. тонн благодаря порошковой технологии вовлекаются в металлооборот. Устраняется ущерб, наносимый природной среде. Для получения металлического порошка из шламов абразивной обработки металлов автором разработан новый способ. Использование этого способа обеспечивает повышение эффективности переработки металлосодержащих шламовых отходов независимо от степени их загрязненности смазочными маслами, СОЖ и т.п.

Постановка задачи исследований. Целью работы является теоретическое определение коэффициентов массоотдачи процесса отделения масел и остатков СОЖ от твердых частиц шлама абразивной обработки металлов, которые необходимы для

определения габаритных размеров моющего жёлоба и получения твердых частиц необходимой чистоты.

Методика исследований. В процессе мойки шлама абразивной обработки металлов в движущемся моющем потоке происходит перенос вещества (масла, СОЖ) с поверхности раздела фаз в глубину моющего раствора. Перенос вещества в направлении, где концентрация его меньше под действием беспорядочного теплового движения молекул, называется диффузией. Механизм диффузии в жидкостях состоит в том, что отдельные молекулы вырываются из данного окружения молекулами жидкости и скачками переходят в среду других частиц жидкости (рисунок 1).

Массопередача на границе твердое тело – жидкость математически описывается следующим образом.

Количество вещества, перенесенного со стороны твердого тела, в соответствии с законом Фика может быть определено по формуле:

$$dG = -D \frac{\partial C}{\partial x} \cdot dF \cdot d\tau, \quad (1)$$

где G - масса вещества, проходящего через поверхность F , кг;

F - площадь межфазовой поверхности, м²;

τ - время мойки шлама, сек;

$\frac{\partial C}{\partial x}$ - градиент концентрации, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \cdot \text{м}}$;

D - коэффициент диффузии, м²/с.

Знак минус в правой части уравнения (1) показывает, что в направлении перемещения вещества концентрация убывает.

Точно такое же количество загрязнений переносится от поверхности раздела фаз в жидкую фазу, которое можно охарактеризовать, используя уравнение массоотдачи, предложенное А.Н. Щукаревым [4]:

$$G = \beta(C_H - C) \cdot F \cdot \tau, \text{ кг}, \quad (2)$$

где β - коэффициент массоотдачи, м/с;

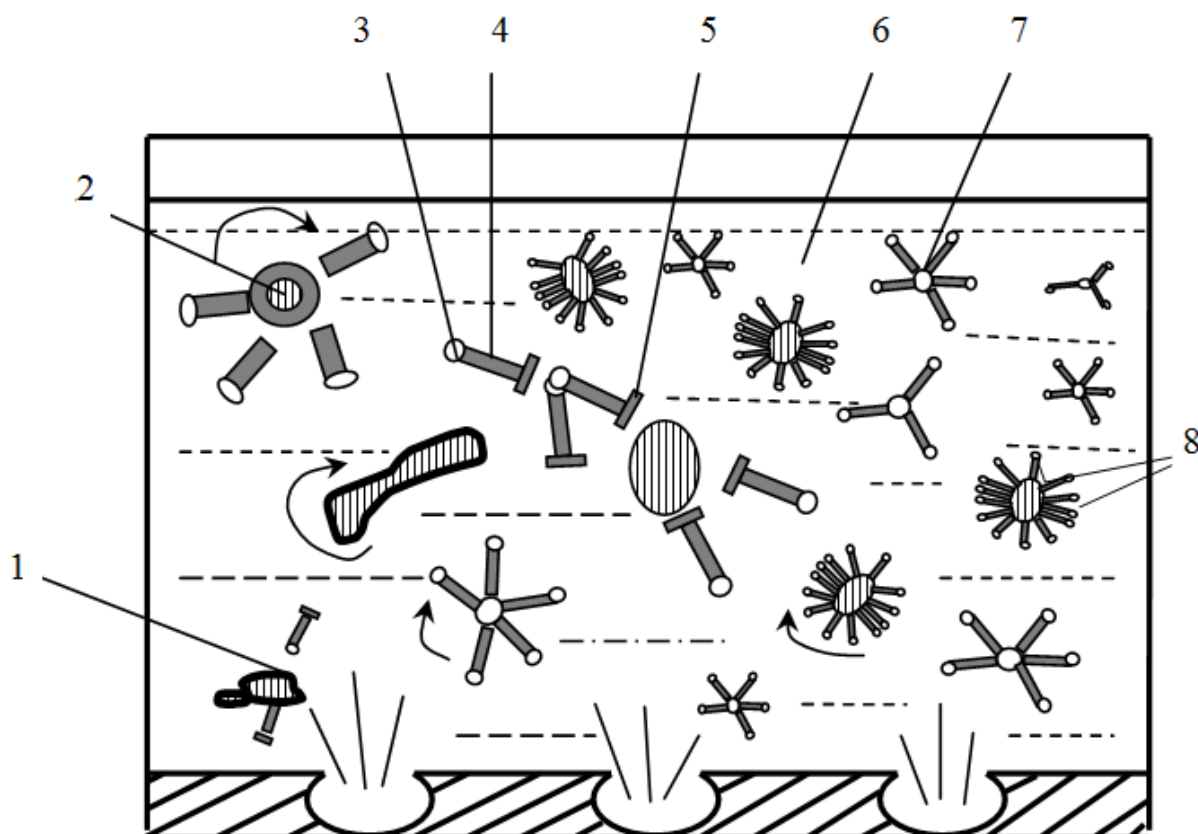
G - масса вещества, что переходит от твердого тела в жидкую в единицу времени, кг;

τ - время, сек;

C_H - концентрация насыщенного моющего раствора на границе раздела фаз, кг/м³;

C - фактическая концентрация вещества в центре потока на данный момент времени, кг/м³;

F - площадь межфазной поверхности, м^2 .



- 1 – загрязнение;
- 2 – твердая частица;
- 3 – гидрофобная часть молекулы ПАВ (радикал);
- 4 – гидрофильная часть молекулы ПАВ;
- 5 – перевод части загрязнения в раствор;
- 6 – моющий раствор;
- 7 – частица загрязнения;
- 8 – адсорбция молекул ПАВ на очищенной твердой частице.

Рисунок 1 - Схема процесса отделения масел и остатков СОЖ от твердых частиц

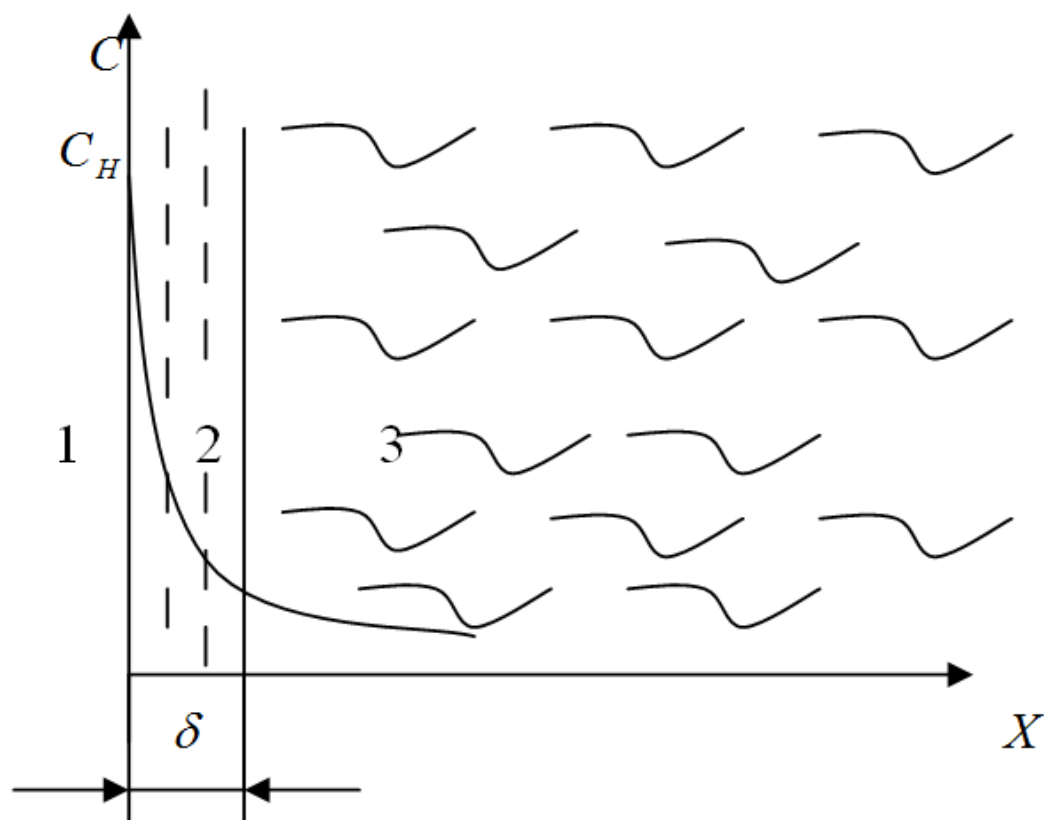
Приравнивая правые части уравнений (1) и (2) получим следующую зависимость:

$$\beta(C_H - C) = -D \frac{\partial C}{\partial x}. \quad (3)$$

Данное уравнение характеризует массообмен на границе „Твердое тело – жидкость”.

Пленочная теория массоотдачи состоит в том, что при движении одной фазы относительно другой на границе раздела фаз со стороны каждой фазы (кроме твердой фазы) образуется диффузионный

пограничный слой. Перенос вещества через этот слой происходит в виде молекулярной диффузии, скорость которой значительно меньше скорости конвективной диффузии, имеющей место в остальном потоке жидкости. Следовательно, уменьшение концентрации в жидкой фазе будет происходить в пограничном слое (рисунок 2).



- 1-твердая фаза;
- 2-диффузионный слой;
- 3-основной поток.

Рисунок 2 – Распределение концентраций в пограничном слое со стороны жидкой фазы

Тогда величину массоотдачи можно выразить молекулярной диффузией:

$$\beta = \frac{D}{\delta}, \quad (4)$$

где δ - толщина пограничного слоя, м.

Согласно классическим представлениям физико-химической гидродинамики вблизи поверхности твердого тела, находящегося в движущемся потоке жидкости, в пределах пограничного слоя происходит резкое изменение скорости потока – от больших значений на внешней границе этого слоя (т.е. в объеме жидкости) до нуля у поверхности твердого тела [4].

Основываясь на распространённой гипотезе Прандтля, можно считать, что в области δ движение жидкости носит ламинарный характер, оно вызвано молекулярной диффузией.

Что касается величины толщины пограничного слоя δ , то она зависит от размера твердой частицы d и числа Рейнольдса Re [5]:

$$\delta = \frac{d}{\sqrt{Re}}, \text{ м.} \quad (5)$$

Критерий Рейнольдса Re характеризует режим движения жидкости и является мерой отношения сил инерции и сил вязкости в потоке. Критерий Re можно определить по формуле [6]:

$$Re = \frac{v \cdot R}{\nu}, \quad (6)$$

где v - скорость движения жидкости, м/с;

R - характерный (определяющий) линейный размер потока жидкости, гидравлический радиус, м;

ν - кинематическая вязкость жидкости, м²/с.

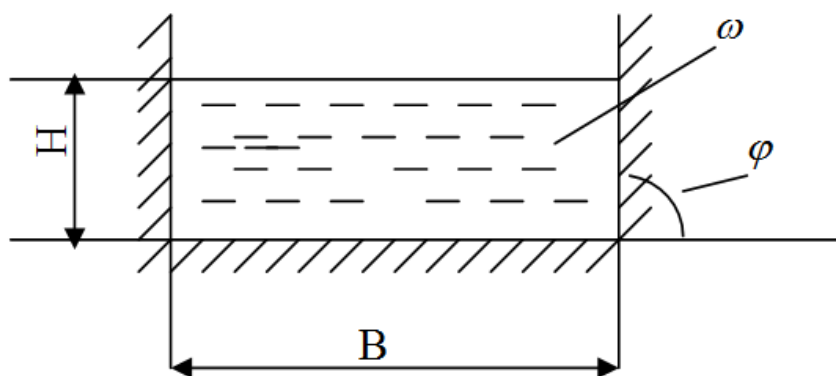
В нашем случае для осуществления процессов мойки и транспортирования шлама в потоке моющего раствора используется открытый жёлоб с прямоугольным поперечным сечением (рисунок 3).

Гидравлический радиус R определяем по формуле:

$$R = \frac{\omega}{\chi}, \text{ м,} \quad (7)$$

где ω - площадь живого сечения потока моющего раствора в жёлобе с прямоугольным сечением, м²;

χ - смоченный периметр, м.



B - ширина моющего жёлоба, м;

H - глубина наполнения моющим раствором жёлоба, м;

ω - площадь живого сечения потока жидкости, м².

Рисунок 2 – Моющий жёлоб с прямоугольным поперечным сечением

Площадь живого сечения для жёлоба с прямоугольным сечением, согласно рисунку 2, определяется по формуле:

$$\omega = B \cdot H, \text{ м}^2. \quad (8)$$

А смоченный периметр χ открытого жёлоба с прямоугольным сечением определяется по формуле:

$$\chi = B + 2H. \quad (9)$$

Тогда, подставив уравнения (7), (8), (9) в зависимость (6), получим формулу для определения числа Рейнольдса Re для потока моющего раствора с использованием открытого жёлоба с прямоугольным сечением:

$$Re = \frac{v \cdot \omega}{\chi \cdot \nu} = \frac{v \cdot H \cdot B}{(B + 2H) \cdot \nu}. \quad (10)$$

Исходя из того, что аналитическое решение системы дифференциальных уравнений, что характеризуют процесс перенесения массы с поверхности твердого тела в моющий раствор затруднительно, то решение данной задачи можно осуществить, используя теорию подобия диффузионных процессов.

Критерий подобия Нуссельта, определяемый из соотношения (3), характеризует интенсивность процесса массоотдачи [4]:

$$Nu' = \frac{\beta \cdot \delta}{D}, \quad (11)$$

где β - коэффициент массоотдачи, м/с;

δ - толщина пограничного слоя, м;

D - коэффициент диффузии, м²/с.

Методами теории подобия может быть получена основная форма зависимости между критериями подобия для различных видов массоотдачи.

Критериальное уравнение стационарного процесса при вынужденном движении потока жидкости имеет следующий вид [4]:

$$Nu' = f(Re, Pr). \quad (12)$$

Эта зависимость обычно представляется в виде степенной функции:

$$Nu' = A Re^n Pr^m. \quad (13)$$

Диффузионный поток Прандтля характеризует взаимосвязь концентрационных и скоростных полей в потоке жидкости и определяется по формуле:

$$Pr = \frac{\nu}{D}. \quad (14)$$

Конкретные значения коэффициентов A, B, m, n - устанавливаются на основании экспериментов. Так как, исследуемая температура моющего раствора изменяется в пределах от 20 до 45 °С, число Прандтля можно принять равным $Pr \Rightarrow 1$.

Критерий Nu' будет зависеть только от величины критерия Re :

$$Nu' = m Re^n. \quad (15)$$

Прологарифмируем уравнение (15) и получим следующее соотношение:

$$\lg Nu' = \lg m + n \lg Re. \quad (16)$$

Введем обозначения: $\lg Nu' = y$, $\lg Re = x$, $\lg 0 = A$, тогда:

$$y = A + nx. \quad (17)$$

Это выражение является уравнением прямой линии. Показателем степени является величина $\operatorname{tg} \varphi$ - угол наклона прямой к оси абсцисс.

$$n = \operatorname{tg} \varphi = \frac{a}{b}. \quad (18)$$

Постоянную величину m определяем из уравнения (15):

$$m = \frac{Nu'}{Re^n}. \quad (19)$$

Тогда коэффициент массоотдачи можно определить из соотношения:

$$\beta = \frac{Nu' \cdot D}{\delta} = \frac{m \cdot Re^n \cdot D}{\delta} = \frac{m \cdot Re^n \cdot 4G}{(C_H - C) \cdot \pi d^2 \cdot \tau}, \text{ м/с.} \quad (20)$$

Выводы. Разработана методика определения коэффициента массоотдачи процесса отделения масел и остатков СОЖ от твердых частиц происходящего в открытом желобе с прямоугольным сечением.

Получена математическая зависимость, позволяющая определить коэффициенты массоотдачи, что позволяет определить время мойки шлама, габаритные размеры моечного желоба установки по переработке металлосодержащих шламов для получения необходимой чистоты металлических частиц и частиц абразива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Куделя А.Д. Комплексное использование минеральных ресурсов железорудных горно-обогатительных комбинатов. УССР. – Киев: Наук. думка, 1984 – 495 с.
2. Падалко О.В., Левицкий Ю.В. Получение порошков из отходов машиностроительных и металлургических производств. // Итоги науки и техники. Порошковая металлургия. – М.: ВИНТИ, 1989 – Т.3. – 3-66 с.

3. Степаненко А.В. Получение стального порошка из шламов подшипникового производства. / Порошковая металлургия. М.: 1984. №11, - с 97 – 101.
4. Стабников В.Н., Попов В.Д., Редько Ф.А., Лысянский В.М. Процессы и аппараты пищевых производств.–М.: «Пищевая промышленность». -1966. - 625 с.
5. Белецкий В.С., Пожидаев С.Д., Кхелуфи А., Сергеев П.В. Перспективы освоения солевых углей Украины. –Донецк: ДонГТУ, УКЦентр, 1998.-96 с.
6. Чугаев Р.Р. Гидравлика. «Энергия», -Л., 1971. -552 с.

УДК 620.17

Х.А. Аскеров, А.Д. Ахмедов

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
МАЛОПЕРЛИТНОЙ СТРОИТЕЛЬНОЙ СТАЛИ 09Г2ФБ ПОСЛЕ
ТЕРМИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ**

Термическое упрочнение строительных сталей имеет чрезвычайно важное прикладное значение. Наличие фундаментальных работ по термическому упрочнению низколегированных сталей позволило принципиально решить эту проблему в промышленности. Вместе с тем длительное время технология термического упрочнения ставило своей задачей получение в прокате однородных или близких к ним структурных состояний в результате мартенситного и промежуточного превращений. Это удалось осуществить на прокатных профилях малого сечения и простой формы. Рост размеров сечений и усложнение их формы при существующих мощностях термического упрочнения делает эту задачу трудно выполнимой.

Сравнительно низкая прокаливаемость стали и технологические особенности термоупрочнения неизбежно приводят к значительной неоднородности структуры и свойств по сечению проката.

Поверхностные слои, подвергнутые наиболее интенсивному охлаждению, обладают более высокой твердостью и прочностью, а центральные – наоборот, более пластичны.

В тоже время современные достижения в разработке композитных сталей показывают, что материалы с заметно различающимися свойствами их структурных составляющих могут обладать весьма удачным сочетанием прочности и вязкости.

Даже тот незначительный опыт исследования и применения проката малоуглеродистой стали, имеющего макроструктурную неоднородность с более прочным поверхностным слоем, показывает, что нетрадиционные для такого проката особенности не препятствуют его эффективному использованию в конструкциях. Более того, структурная макронеоднородность в ряде случаев приводит к

повышению усталостной прочности и вязкости материала. Такое повышение свойств обусловлено как высокими свойствами отдельных слоев, так и слоистостью материала.

Логичным выходом из создавшегося положения является создание в низкоуглеродистых сталях при термическом упрочнении регламентированной макроструктурной неоднородности. Для этого необходимо преодолеть трудности при идентификации сложных, смешанных структур, образующихся в низколегированных сталях при их термическом упрочнении, и в осмыслении соответствующего им комплекса механических свойств. Еще в большей степени это относится к сталям, термически упрочненным в промышленных условиях.

С этих позиций в работе рассматривается структура и свойства строительной стали 09Г2ФБ при реализации эффекта термического упрочнения в промышленных условиях.

Исследования проводили на стали марки 09Г2ФБ промышленной выплавки. Термическая обработка проводилась по оптимальному режиму : нагрев слябов до температуры 1150°С 5-6 ч. : прокатка в черновой клетке до толщины 50 мм за 9 проходов; подстуживание проката на воздухе перед чистовой клетью до 820°С, окончательная прокатка в чистовой клетке на толщину 17,5 мм за 8 проходов : температура конца прокатки 740-720°С , ускоренное охлаждение проката со скоростью 40°С /с.

Такой режим термического упрочнения привел к формированию неоднородных структур по сечению (толщине) поката (рис. 1). Центральные слои имеют мелкозернистую структуру полигонизированного феррита и перлита (рис.2, в). По мере приближения к поверхности размер зерна феррита уменьшается и приобретает игольчатые очертания (рис.2, а, б).

Анализ поверхностных слоев показал, что формирующиеся в нем структуры могут быть классифицированы по мере приближения к поверхности, как феррито-перлитная повышенной дисперсности, игольчатого феррита, верхнего бейнита, нижнего бейнита и речного дислокационного мартенсита. Микрофотографии этих структур приведены на рис.3. Отмечаются следующие особенности, которые позволяют идентифицировать данные структуры : игольчатый феррит – отсутствие карбидных выделений и повышенная плотность

дислокаций в феррите (рис. 3 а, б, в); верхний бейнит – выделение карбидной фазы в виде пленки по границам реек (рис. 3 г); нижний бейнит – выделение карбидной фазы типа цементита под углом 55 градусов к рейкам и более крупные карбидные выделения на стыках зерен; реечный дислокационный мартенсит – выделение внутри реек карбидной фазы типа Fe_3C , ориентированной по трем кристаллографическим плоскостям.

Анализируя тонкую структуру центральных слоев, необходимо отметить некоторые особенности строения образующегося в конечной структуре пластинчатого перлита (рис. 3 д, е). Перлитная структура весьма дисперсна и не отличается высокой плотностью дислокаций. В феррите наблюдается увеличенная плотность дислокаций, образуются их нерегулярные сплетения, а местами и ячеистая субструктура (рис. 3д). Повышается доля ферритных зерен, содержащих внутри себя субзерна, ограниченные полигональными дислокационными стенками. По мере приближения к центру проката морфология и дисперсность структуры практически идентична структуре, получаемой в этой стали после контролируемой прокатки (рис. 3, з).

Получен следующий комплекс механических свойств: $\sigma_B = 800$ МПа, $\sigma_T = 720$ МПа, $\delta = 27\%$. Это значительно выше механических, полученных на материале той же плавки после контролируемой прокатки: $\sigma_B = 580$ МПа, $\sigma_T = 510$ МПа, $\delta = 25\%$. Структурная неоднородность, выраженная в повышении прочности поверхностного слоя, не оказывает влияния на показатели ударной вязкости, которые определялись на образцах, вырезанных с поверхностного и центральных слоев. Интересно отметить, что при нанесении надреза на поверхности проката ударная вязкость оказывалась во всех случаях выше, чем при надрезе перпендикулярно прокату.

Создание при термическом упрочнении регламентированной макронеоднородной структуры с более прочными поверхностными слоями позволяет значительно повысить прочность малоперлитной стали при сохранении вязкости проката. Высокая вязкость обусловлена морфологией и вязкостью поверхностных структур и благоприятным влиянием внутренних пластичных слоев, выступающих в качестве энергоемкого “гасителя” вязкой или хрупкой трещины.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Рекомендовать применение режимов термической обработки, приводящих к созданию в прокате регламентированной макронеоднородности.
2. Создание регламентированной макронеоднородности структуры с более прочными поверхностными слоями является эффективным методом повышения прочности проката для металлических конструкций.

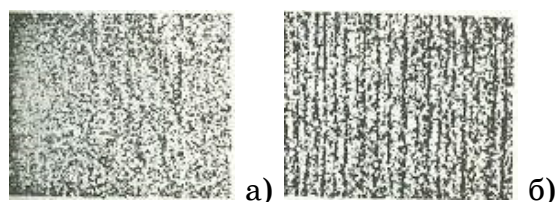


Рисунок 1 - x100: а) поверхность ; б) центр



Рисунок 2 - x500: а) поверхность ; б) 1/4 толщины от поверхности; в) центр

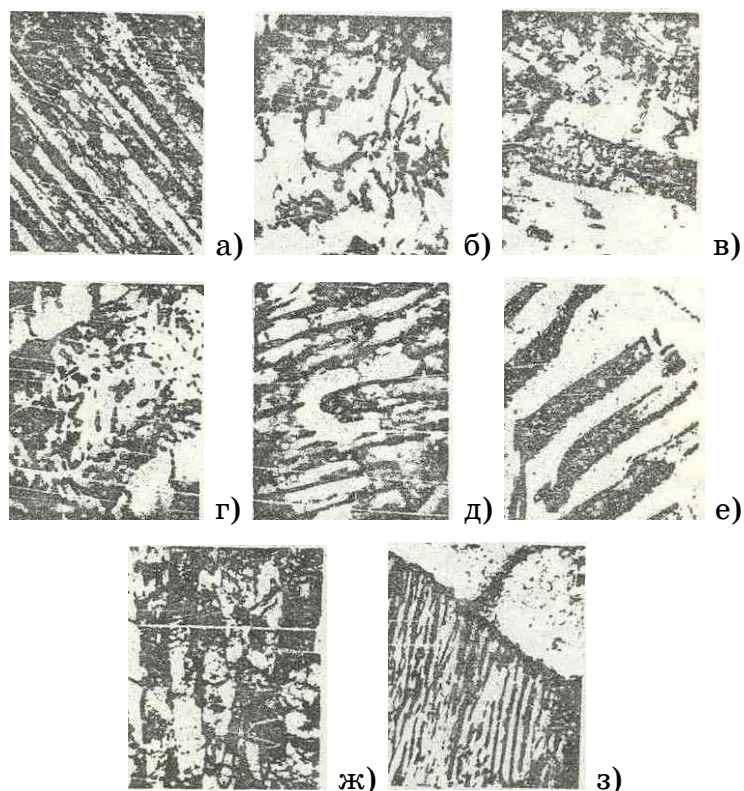


Рисунок 3 - Уменьшено 1/4: а) x 13000; б) x43000; в) x18000; г) x7000;
д) x28000; е) x68000; ж) x30000; з) x18000

ЛИТЕРАТУРА

1. Большаков В.И. , Монгайт И.А. Закалка с прокатного нагрева малоперлитной конструкционной стали, микролегированной ниобием и ванадием. Металловедение и термическая обработка металлов, 1983, №12, с 42-44.
2. Большаков В.И. , Стародубов К.Ф. , Тылкин М.А. Термическая обработка строительной стали повышенной прочности, М : Металлургия , 1977 с. 200.
3. Большаков В.И. , Смольянинова Н.А. , Антонов С.М. – Термическое упрочнение малоперлитных сталей с прокатного нагрева. В кн : Производство и применение термически упрочненного проката в строительстве, - Днепропетровск, 1989, с 24-28
4. И.Н.Голиков, М.И Гольдштейн, И.И. Мурзин. Ванадий в стали. М : Металлургия, 1968, с.290
5. А.Н. Лукьянскова, В.И.Большаков , Х.А.Аскеров. Определение рациональных режимов охлаждения термически упрочненного проката из низколегированной строительной стали – В кн. : Тезисы докладов научно-технического симпозиума. – М : МДНТП, 1989, с 79-81.
6. Большаков В.И. , Аскеров Х.А. Карбидообразование и упрочнение строительных сталей с ванадием . В кн : Перспективные задачи инженерной науки. , GAUDEAMUS, 2001, Выпуск 2, с.115.

УДК 620.17

Х.А. Аскеров

**НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАСТВОРИМОСТИ КАРБИДНОЙ
ФАЗЫ В СТРОИТЕЛЬНЫХ СТАЛЯХ 09Г2ФБ И 10Г2ФБ ПРИ
ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

Успехи теоретического металловедения и физики металлов в последнее время характеризовалось глубоким изучением кристаллического строения фазовых и структурных составляющих сталей и сплавов, природы, механизма и кинетики фазовых превращений и установлением многочисленных связей между структурной и механическими свойствами. [1,2].

Использование преимуществ сталей с малым содержанием перлита оказалось возможным благодаря тому, что предел текучести и временное сопротивление могут быть повышены (несмотря на низкое содержание углерода) до достаточно высокого уровня путем упрочнения малыми добавками карбонитридообразующих элементов (ниобия, ванадия, титана, азота). Дисперсионное упрочнение ведет к значительному повышению прочности, но одновременно снижается ударная вязкость. Однако в результате использования указанных элементов удалось совместить дисперсионное твердение с измельчением зерна. Эффективность влияния этих элементов зависит от растворимости их карбонитридов в аустените, что при последующем охлаждении определяет количество и дисперсность упрочняющей фазы [3].

Свойства сталей в значительной степени определяются составом, размером, формой и характером распределения карбидной фазы. Так как ванадий сильно влияет на карбидные превращения в стали, то он существенно влияет и на ее физико-механические свойства. Основным достоинством применения для легированных сталей, особенно строительных является их способность к упрочнению. Кроме ванадия для упрочнения малоуглеродистых сталей применяют небольшие добавки ниобия. Однако эффективность упрочнения стали ванадием значительно дешевле и менее дефицитен, чем ниобий. Одно

из наиболее ценных качеств ванадия как легирующего элемента в стали – его способность измельчать зерно [4]. Применительно к стали соединения ванадий с железом, углеродом, азотом и тройные : железо-углерод-ванадий, железо-азот-ванадий и железо-легирующий элемент-ванадий представляют интерес. Ванадий – сильный карбидообразующий и нитридообразующий элемент. Образуемые им карбиды и нитриды являются фазами внедрения. В литературе можно встретить ссылки на следующие карбиды в системе ванадий-углерод : V_5C (4,5% C) ; V_2C (10,54 % C) ; V_4C_3 (15,02% C) ; VC (19,08% C); V_2C_3 (26,12% C). Однако при исследовании стали наиболее часто упоминаются только карбиды VC и V_4C_3 .

При нагреве стали для термической обработки карбиды или нитриды ванадия могут растворяться в аустените или оставаться нерастворенными. От этого зависят многие свойства термической обработанной стали : закаливаемость, прокаливаемость, устойчивость против отпуска, износостойкость и др. Растворимость карбида ванадия в аустените в зависимости от температуры нагрева зависит от соотношения углерода и ванадия, т.е. количества карбида ванадия. При медленном нагреве стали со структурой феррита - карбидной смеси переход через критическую точку вызывает образование мелкого зерна аустенита.

Металлургической промышленностью освоен выпуск ряда марок сталей подвергаемых контролируемой прокатке на станах 3000 и 3600 металлургических комбинатов имени Ильича и «Азовсталь».

Химический состав и механические свойства листов из малоперлитных сталей, изготавливаемых с применением контролируемой прокатки показаны в таблицах [1,2].

Таблица I

Химический состав исследуемых сталей

МАРКА СТАЛИ	C	Mn	Si	S	P	Al	V	Nb
09Г2ФБ	0,09	1,70	0,35	0,010	0,02	0,05	0,09	0,05
10Г2ФБ	0,12	1,75	0,35	0,006	0,02	0,05	0,012	0,04

Таблица 2

Механические свойства листов из малоперлитных сталей

МАРКА СТАЛИ	σ_B Н/мм ²	σ_T Н/мм ²	δ %	KCU	KCV
				Дж/см ²	
09Г2ФБ	550	450	22	59	88
10Г2ФБ	588	460	22	64	88

Введение ванадия и ниобия в строительные стали прежде всего повышает их прочность и упругие свойства (отношение $\frac{\sigma_T}{\sigma_B}$), такое влияние этих элементов обусловлено дисперсионным твердением в результате выделения мелкодисперсных карбидов ванадия при γ - σ превращениях или при высокотемпературном отпуске закаленной стали. Получение в строительных сталях с ванадием и ниобием повышенной прочности после высокотемпературного отпуска – одно из основных преимуществ этих сталей. Отпуск при более высокой температуре дает возможность получить в стальных изделиях детали с минимальными остаточными внутренними напряжениями, что часто очень важно для надежности и высокой эксплуатационной стойкости стальных строительных конструкций.

Существенное влияние ванадия и ниобия на повышение устойчивости против отпуска связано с замедлением распада мартенсита – пересыщенного твердого α – раствора, задержкой выделения углерода из него и образованием высокодисперсных карбидов ванадия и ниобия, вызывающих дисперсионное твердение. Мартенсит, содержащий растворенные карбидообразующие элементы, сохраняет повышенное содержание углерода.

Чем выше карбидообразующая способность элемента, тем больше количество углерода задерживается в растворе α . При повышении температуры отпуска α раствор обедняется карбидообразующим элементом и из него выделяется избыточный углерод в виде второй порции карбида.

Закаленная сталь, в которой карбид ванадия при нагреве под закалку перешёл в твердый раствор, при отпуске разупрочняется меньше, чем сталь без ванадия. Чем больше карбида ванадия в стали и чем больше его переходит в твердый раствор, тем более устойчива сталь против отпуска. Если карбид ванадия не растворяется в аустените при нагреве под закалку, то задерживающее влияние ванадия на разупрочнение стали при отпуске не проявляется. Таким образом, повышенная устойчивость ванадиевой стали против отпуска определяется не абсолютным содержанием ванадия стали, а его количеством, растворяющимся в аустените. Изложенные особенности влияния этих элементов на свойства строительных сталей делают весьма перспективным легирование ванадием и ниобием.

Особый интерес вызывает малоперлитная сталь 09Г2ФБ, высокие прочностные свойства которой обеспечивается созданием мелкозеренной ферритной структуры в результате контролируемой прокатки [6].

Электронномикроскопические исследования микроструктуры позволили сделать количественную оценку, в результате которой получен средний размер субзерна феррита примерно 0,05 мкм. Плотность дислокаций в феррите составила $= 10 (10) \text{см}(-2)$ (рис.1).

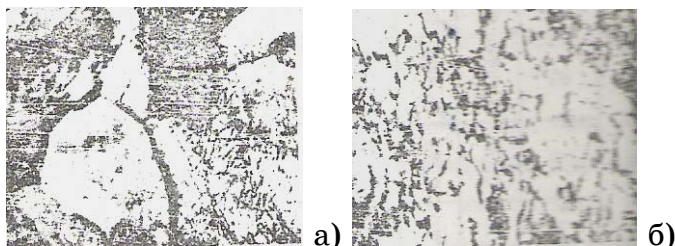


Рисунок 1 - Микроструктура стали 09Г2ФБ после контролируемой прокатки: а – х25000; б – х 50000

Повышая скорость охлаждения после контролируемой прокатки, то есть используя различные охлаждающие среды, в стали 09Г2ФБ наряду с игольчатым ферритом наблюдаются участки с карбидными выделениями, характерными для речного дислокационного мартенсита (рис.2).

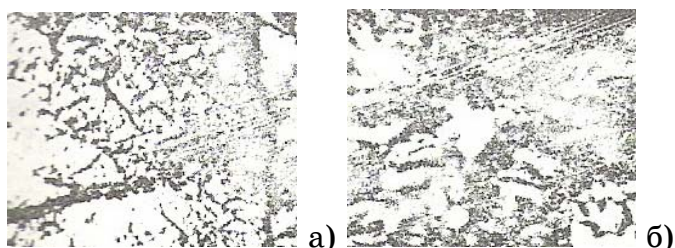


Рисунок 2 - Микроструктура стали 09Г2ФБ после контролируемой прокатки с последующим ускоренным охлаждением: а – дислокации в феррите; б – карбидные выделения X 50000

В ряде работ [7,8] установлено, что при снижении температуры аустенитизации с 1250 до 1050 ... ферритное зерно измельчается на 0,5 – 1 балл. Кроме того, для увеличения измельчения зерна аустенита деформация при горячей прокатке должна носить убывающий характер с преобладанием степени деформаций (до 50%) в аустенитной области. Дальнейшее измельчение зерна обеспечивается при снижении температуры контролируемой прокатки от 1000 до 700 .

Регулирование температурно-деформационного режима обработки позволяет контролировать выделение дисперсных фаз карбонитридов, что способствует измельчению зерна феррита и получению развитой субструктуры с повышенной плотностью дислокаций [9]. Повышение прочности и сопротивления разрушению в игольчатом феррите, вероятно, можно объяснить тем, что прочность сплава регулируется размером субструктурных единиц, которые зависят от температуры превращения.

Таким образом, достижения в области создания сталей с высоким комплексом механических свойств позволяет при строительстве стальных конструкций снизить металлоёмкость. С этой точки зрения наиболее приемлемыми являются малоперлитные мелкозернистые стали с добавками ниобия и ванадия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пикеринг Ф.Б. Физическое металловедение и разработка сталей. М., 1982.184с
2. Ю.И.Матросов, Н.И. Карчевская и др. Карбонитриды ниобия и ванадия в малоперлитных сталях. Известия АН СССР : Металлы. 1975. №3. с. 151-155.
3. Большаков В.И. , Монгайт И.А. Закалка с прокатного нагрева малоперлитной стали с ниобием и ванадием. // Металловедение и термическая обработка металлов. М. 1983, №2 с.42-44.
4. Большаков В.И. , Аскеров Х.А. Карбидообразование и упрочнение строительных сталей с ванадием. //Перспективные задачи инженерной науки.GAUDEMUS, 2001, Днепропетровск, с 115.
5. И.Н. Голиков, М.И.Гольдштейн, И.И.Мурзин. Ванадий в стали. М. Металлургия, 1968 с.291.
6. Большаков В.И. , Монгайт И.А. Исследование тонкой структуры закаленной стали с ниобием и ванадием после контролируемой прокатки. – Известия вузов. Черная металлургия, 1983, №7, с. 102-106.
7. Большаков В.И. Разработка теоретических основ и внедрение процессов субструктурного упрочнения строительных сталей с целью повышения их эксплуатационных свойств. – Диссертация на соискание уч.степени доктора техн.наук, - Днепропетровск 1985, - 450 с.
8. Большаков В.И., Стародубов К.Ф., Тылкин М.А. Термическая обработка строительной стали повышенной прочности, - М: Металлургия, 1977.-200 с.
9. Бернштейн М.Л., Займовский В.А., Капуткина Л.М. Термомеханическая обработка стали.–М : Металлургия, 1983.-460

УДК 620.18

В.Т. Калинин, Л.А. Шапран, Л.Х. Иванова, А.А. Кондрат

**ЛИКВАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В МОДИФИЦИРОВАННЫХ Fe-C
РАСПЛАВАХ ПРИ ЛИТЬЕ РОЛИКОВ И ВАЛКОВ**

Обработка жидких расплавов тонкодисперсными и, особенно, нанодисперсными модификаторами (НДМ) в брикетированном или порошкообразном виде при литье биметаллических роликов или прокатных валков позволяет качественно изменить технологию модифицирования: радикально сократить требуемое количество модификатора, резко повысить эффективность и полноту протекания процесса.

НДМ на основе чистых металлов, карбидов или силицидов получают методом плазмохимического синтеза на специальных высокочастотных установках. Наиболее распространенным НДМ являются TiN, TiC, TiCN, SiC, Mg₂Si.

Важным фактором, определяющим эффективность модифицирования, помимо способа ввода НДМ в расплав является уровень их седиментационной кинетической устойчивости – способности удерживаться во взвешенном состоянии, не всплывая, а распределяясь определенным образом по высоте слоя жидкого металла в ковше.

Седиментационная устойчивость является результатом действия двух сил: силы всплывания и силы диффузии под действием броуновского движения, проявляемой тем сильнее, чем меньше размер частиц. Если рассматривать устойчивость системы, в которой нанодисперсная фаза относительно равномерно распределяется по объему (например, после заливки металла в ковш и некоторой выдержки), то первое время всегда преобладает седиментационная устойчивость. Однако при увеличении выдержки равномерное распределение частиц в системе нарушается, и массоперенос будет продолжаться до тех пор, пока диффузионный поток не станет равным седиментационному, и концентрация частиц по высоте слоя расплава будет не одинаковой.

Для анализа этих явлений был произведен термодинамический расчет величины седиментационной устойчивости НДМ в объеме ковша после модифицирования, который сравнивали с величиной противонаправленного ей диффузионного потока. В соответствии с первым законом Фика:

$$D_m = -D \cdot \left(\frac{dc}{dx} \right) \cdot S \cdot dt, \quad (1)$$

где m – количество продиффундировавшего вещества;

D – коэффициент диффузии, зависящий от свойств диффундирующих частиц и среды;

dc/dx – градиент концентрации;

S – площадь, через которую идет диффузия;

t – продолжительность диффузии.

Удельный диффузионный поток, характеризующий количество вещества, переносимого в результате диффузии за единицу времени через сечение, равное единице площади, выражается из (1):

$$i_d = \frac{1}{S} \left(\frac{dm}{dt} \right) = -D \cdot \frac{dc}{dx}, \quad (2)$$

где dm/dt – градиент массы, т. е. диффузионный поток в общем случае является функцией от x и t , так как от этих величин зависит градиент концентрации dc/dx .

Удельный седиментационный поток, учитывая, что для одной частицы, оседающей или всплывающей с постоянной скоростью, сила трения равна движущей силе, можно представить уравнением:

$$i_c = U \cdot c = \frac{m \cdot g}{f} \cdot c, \quad (3)$$

где U – скорость седиментации;

c – концентрация;

m – эффективная масса частицы;

g – ускорение силы тяжести;

f – коэффициент трения между частицей и дисперсионной средой.

Согласно уравнения А. Эйнштейна коэффициент диффузии равен:

$$D = \frac{R \cdot T}{N_A} \cdot \frac{1}{f} = \frac{K \cdot T}{f}. \quad (4)$$

Для частиц по форме близким к сферическим, $f = 6 \pi \eta r$. Поэтому

$$D = \frac{R \cdot T}{N_A \cdot 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r} = \frac{K \cdot T}{6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r}, \quad (5)$$

где η – вязкость среды;

r – радиус частицы;

R – универсальная газовая постоянная;

T – абсолютная температура;

N_A – число Авогадро;

K – постоянная Больцмана.

Разделив уравнение (3) на (2) и приняв во внимание уравнение (4) получим:

$$\frac{i_c}{i_D} = -\frac{m \cdot g \cdot c}{f} \cdot \frac{1}{D \cdot \frac{dc}{dx}} = -\frac{m \cdot g \cdot c \cdot f}{K \cdot T \cdot f \cdot \frac{dc}{dx}} = -\frac{m \cdot g \cdot c}{K \cdot T \cdot \frac{dc}{dx}} = -\frac{V \cdot (\rho - d) \cdot g}{K \cdot T} \cdot \frac{c}{\frac{dc}{dx}}, \quad (6)$$

где V – объем частицы;

ρ – плотность дисперсной среды (расплава);

d – плотность дисперсной (дисперсионной) фазы.

При $i_c / i_D \gg 1$ можно принимать во внимание только седиментацию; при $i_c / i_D \ll 1$ только диффузию, а при $i_c / i_D \approx 1$, т. е. когда $i_c \approx i_D$, необходимо учитывать оба процесса. В последнем случае в системе устанавливается равномерное распределение дисперсной фазы по высоте.

Из уравнения (6) также следует, что если рассматривать устойчивость системы, в которой дисперсная фаза равномерно распределяется по объему (например, в результате предварительного перемешивания), то в начальном периоде всегда преобладает седиментация, так как вначале $dc/dx=0$. Однако со временем равномерное распределение вещества в системе нарушается, и производная dc/dx приобретает все возрастающие значения. Массоперенос будет продолжаться до тех пор, пока поток i_D не станет равным i_c , т. е. пока не будет соблюдено условие $i_c / i_D = 1$ и в системе установится равновесие. Учитывая, что градиент концентрации изменяется по высоте и, заменяя x на h , можно написать уравнение (6) в виде:

$$-\frac{m \cdot g}{K \cdot T} \cdot \frac{c}{\frac{dc}{dh}} = 1, \quad (7)$$

Это уравнение можно написать в виде:

$$-\frac{dc}{c} \cdot \frac{m \cdot g}{K \cdot T} \cdot dh \quad (8)$$

Интегрируя от c_0 до c_h и соответственно от 0 до h , получим:

$$\lg \frac{c_0}{c_h} = \frac{m \cdot g \cdot h}{K \cdot T} = \frac{m \cdot N_A \cdot g \cdot h}{R \cdot T}, \quad (9)$$

или

$$\frac{c_0}{c_h} = e^{\left(\frac{mgh}{RT}\right)}, \quad (10)$$

Преобразовывая уравнение (10) в гипсометрическую формулу Лапласа-Перрена, получают:

$$\frac{n_1}{n_2} = e^{\frac{N_A \cdot V}{R \cdot T \cdot (\rho - d) \cdot g \cdot h}}, \quad (11)$$

где $\frac{n_1}{n_2}$ – относительное изменение числа частиц в единице

объема в двух слоях жидкости, отстоящих на расстоянии h (слой 2 выше слоя 1).

Используя метод Н. П. Пескова [3], можно применить в качестве количественной оценки кинематической устойчивости слоя металла в ковше, в котором концентрация модификатора убывает в 1,2 раза, то есть на 20%. Обозначив $\frac{n_1}{n_2} = 1,2$, можно рассчитывать h по следующей

формуле:

$$h = \frac{2,3 \cdot \lg 1,2 \cdot R \cdot T}{N_A \cdot V \cdot Q \cdot (\rho - d) \cdot g}, \quad (12)$$

где h – высота слоя металла в ковше, в котором концентрация модификатора убывает на 20% между верхним и нижним слоями;

R – универсальная газовая постоянная, равная 8,31 Дж/моль·К;

N_A – постоянная Авогадро, равная $6,022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹;

V – объем частицы, м³;

T – температура, К;

Q – объемная доля частиц в расплаве;

ρ – плотность Fe-C расплава, кг/м³;

d – плотность частицы, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Влияние размеров частиц SiC и TiCN на значение h приведено на рисунке 1.

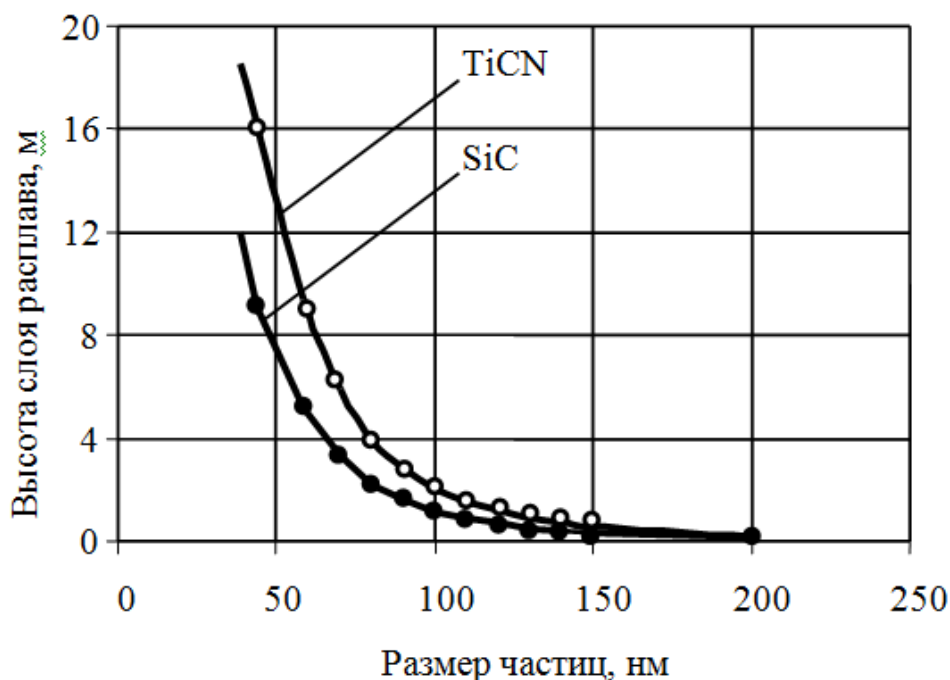


Рисунок 1 - Влияние размера частиц модификаторов на минимальную высоту слоя расплава

Из рис. 1 следует, что минимальная высота слоя расплава, в котором частицы модификаторов размером 80...120 нм ликвируют в пределах 20% в объеме ковша, равна 1,5...2,5 м. Для ковшей массой 1,5...5,0 т, используемых в литейных цехах, высота слоя металла равна 1,0...2,5 м. Поэтому в таких ковшах нанодисперсные модификаторы на основе SiC и TiCN будут практически равномерно распределяться в объеме расплава, а не всплывать на поверхность и выноситься в атмосферу.

Значение высоты слоя расплава h определяется результатом действия двух противоположенных сил: силы всплывания и силы диффузии под действием броуновского движения и проявляемой тем сильнее, чем меньше размер частиц. Определяющим фактором седиментационной устойчивости системы является степень дисперсности модификатора.

Другим важным фактором при модифицировании является длительность модифицирующего эффекта. Особенно это касается графитизирующих модификаторов (SiC, FeSi), которые имеют ограниченное время действия при обработке чугуна [4].

Расчетные данные, представленные на рис. 1, подтверждаются результатами химического анализа проб модифицированного НДМ на основе TiCN электропечного чугуна, отобранных с различных уровней по высоте расплава при сливе его из 10-тонного разливочного ковша в

литейные формы. Содержание титана в пробах, отобранных при сливе чугуна из ковша, приведено в таблице 1.

Таблица 1

Содержание титана в пробах модифицированного НДМ чугуна

Расход TiCN, % мас.	Место отбора пробы из ковша	Содержание титана в пробах, %				Разбег средних значений, %
		1	2	3	Среднее	
0,20	Верх	0,112	0,109	0,113	0,111	0,016...0,019
	1/3	0,095	0,093	0,097	0,095	
	2/3	0,095	0,094	0,096	0,095	
	Низ	0,092	0,089	0,096	0,092	
0,25	Верх	0,117	0,113	0,122	0,117	0,012...0,020
	1/3	0,103	0,115	0,098	0,105	
	2/3	0,095	0,103	0,094	0,097	
	Низ	0,096	0,095	0,099	0,097	

Из таблицы 1 видно, что отклонение в содержании титана по высоте расплава в ковше не превышает 0,02%, что является вполне допустимым. Несколько повышенное содержание титана в верхних слоях расплава в ковше связано с всплыванием крупных частиц TiCN, встречающихся в модификаторе. Полученные результаты показали, что НДМ обладают достаточно высокой седиментационной устойчивостью, практически равномерно распределяясь по высоте расплава в ковше при ковшовом модифицировании.

Таким образом, в результате выполненных исследований разработана оценка уровня седиментационной устойчивости НДМ при обработке чугуна и показано, что НДМ являются перспективными добавками для повышения качественных характеристик чугунных отливок, по сравнению с традиционными модификаторами, применяющимися в производстве чугунного литья. Эффективность модифицирования при обработке НДМ плазмохимического синтеза возрастает до 50 раз при значительном измельчении графитных включений. Применение новых материалов совместимо с применяющимся в последние годы оборудованием с компьютерным управлением ввода и дозировки тонкомодифицирующих присадок непосредственно в расплав в автоматизированных системах заливки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калинин В.Т., Хрычиков В.Е., Кривошеев В.А., Баначенков В.Г. Разработка и внедрение высокоэффективных модификаторов для

- повышения качества литых деталей металлургического оборудования // Теория и практика металлургии. – 2004. – №6. – С.74-77.
2. Патент Украины № 71808. Модификатор для обработки чугуна МКВ С22С35/00/ В.П. Розбейко, В.Т. Калінін, А.П. Розбейко. – № 2003122572; Заявл. 26.12.03; Опубл. 15.12.04, Бюл. №12. – 3 с.
 3. Хмельницкий Р.А. Физическая и коллоидная химия. – М.: Высшая школа, 1988. – 400 с.
 4. Гиршович Н.Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках. – М.: Машиностроение, 1966. – 562 с.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОХВИЛЬОВОГО СУШІННЯ КОЛОЇДНИХ КАПІЛЯРНО-ПОРИСТИХ МАТЕРІАЛІВ

Постановка проблеми. Для сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів характерна часткова усушка при втраті еластичних властивостей. Типовим представником цієї групи є деревина, яка містить як вологу набрякання, так і капілярно зв'язану вологу. Процес сушіння деревини ускладнений необхідністю одержання певної якості матеріалу (без тріщин, короблення і зниження фізико-механічних характеристик), що вимагає використання м'яких режимів проведення процесу [1]. Традиційні конвективні способи дозволяють домогтися необхідної якості сушіння коштовних твердих порід деревини за тривалий час, у той час як умови ринку диктують скорочення тривалості виробничого циклу [2]. Скоротити тривалість процесу при збереженні належної якості деревини дозволяє сушіння матеріалу при наявності позитивного градієнта температури, отримати який можна застосовуючи вакуумні методи. Однак основною проблемою використання вакуумних технологій є труднощі підведення тепла в умовах зниженого тиску. Відомі конвективні способи підведення тепла у вакуумі не дозволяють досягти рівномірної вологості пиломатеріалу по перетину штабеля. Контактні методи відомі своєю працемісткістю процесу і незадовільною якістю, унаслідок розвитку в процесі сушіння трьох різних зон вологовмісту по перетину пиломатеріалу, що є неприпустимим, особливо для твердих порід деревини. Тому найбільш перспективними в області вакуумного сушіння деревини є способи при мікрохвильовому теплопідведенні [3 - 5]. Вакуумне сушіння пиломатеріалів з використанням мікрохвильової енергії можна здійснити чергуванням стадій нагрівання деревини і вакуумування, а також веденням процесу при стаціонарному зниженому тиску з підвищеною швидкістю потоку теплоносія.

Постановка задачі. Розглянемо нестационарний процес теплообміну при сушінні колоїдних капілярно-пористих матеріалів в умовах фазового перетворення «рідина – пара», що виникає під дією мікрохильового нагрівання. Такий процес будемо визначати системою нелінійних диференціальних рівнянь у частинних похідних, яка складається з рівнянь Максвелла і рівнянь теплопровідності наступного виду:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H} &= \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial \tau}, \quad \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial \tau}, \quad \operatorname{div} \vec{D} = 0, \quad \operatorname{div} \vec{B} = 0, \\ \vec{D} &= \varepsilon(t) \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu(t) \vec{H}, \quad \vec{j} = \sigma(t) \vec{E}, \\ \frac{\partial (c_i \rho_i t_i)}{\partial \tau} + \vec{v}_i \vec{\nabla}_i t_i &= \operatorname{div} (\lambda_i \vec{\nabla}_i t_i) + q(t_i, \vec{E}), \end{aligned}$$

де \vec{E} , \vec{H} – вектори напруженості електричного та магнітного полів відповідно, \vec{D} , \vec{B} – вектори електричної та магнітної індукції відповідно, \vec{j} – щільність струмові провідності, $\varepsilon_i = \varepsilon' - i\varepsilon'' = \varepsilon' - i\sigma/\omega$, μ – абсолютні діелектрична і магнітна проникності матеріалу відповідно, σ – провідність матеріалу, ω – кругова частота, c_i , ρ_i , λ_i – коефіцієнт теплоємності, щільність і коефіцієнт теплопровідності матеріалу, що залежать від температури i -ої фази, \vec{v}_i – вектор швидкості переміщення i -го матеріалу, $\vec{\nabla}$ – оператор Гамільтона, $q = 0,5\omega\varepsilon' \operatorname{tg} \delta |\vec{E}|^2$ – питома поглинена потужність, t_i – температура i -го матеріалу, $\operatorname{tg} \delta = \varepsilon''/\varepsilon'$ – тангенс кута діелектричних втрат матеріалу.

Наведена система рівнянь доповнюється початковими та граничними умовами, а також умовою на межі розділу фаз «рідина – пар». Слід зазначити, що розв'язок наведеної системи рівнянь пов'язаний з труднощами не тільки обчислювального характеру, а й принциповими. Таке твердження ґрунтується на наступному: умови на межі розділу фаз є нелінійними, сформульована модель є багатомірною відносно просторових змінних, електрофізичні параметри матеріалів залежать від температури і є наближеними, алгоритми розв'язку таких задач вимагають обґрунтування та використання специфічних комп'ютерних технологій. Тому слід розглянути спрощену модель процесу, реалізацію якої можна провести методами комп'ютерного моделювання.

Виклад основного матеріалу. Побудуємо математичну модель процесу сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів під дією

енергії мікрохвильового електромагнітного поля, скориставшись наступною системою рівнянь тепло- і масообміну для пористих матеріалів [6]:

Рівняння руху і нерозривності в'язкого нестискаемого потоку:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial \tau} + (\vec{V}, \text{grad}) \vec{V} = \vec{g} - \frac{1}{\rho} \text{grad} P + \nu \nabla^2 \vec{V}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \text{div}(\rho, \vec{V}) = 0. \quad (2)$$

Рівняння конвективно-дифузійного перенесення пари рідини в сушильному потоці, що рухається:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} + (\vec{V}, \text{grad} c) = D \nabla^2 c. \quad (3)$$

Рівняння, що описує поле температури в потоці теплоносія

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + (\vec{V}, \text{grad} T) = a \nabla^2 T. \quad (4)$$

Необхідно враховувати, що при взаємодії енергії мікрохвильового поля з вологим пористим матеріалом відбувається процес розігріву і висушування матеріалу з утворенням сухої зони. При цьому перенесення вологи в сухій зоні відбувається в основному у вигляді пари. Тепло – і масоперенесення здійснюється тільки молекулярним шляхом: теплопровідністю і дифузією. Незначна величина градієнтів температур, що мають місце при утворенні сухої зони, дозволяє розглядати процес у квазіізотермічних умовах. Інтенсивність процесу визначається і лімітується не теплопідведенням у зоні фазових переходів, а масопереносом у сухій зоні і потужністю джерела мікрохвильової енергії. Це дозволяє в системі рівнянь тепло- і масоперенесення для пористих матеріалів використовувати тільки нестационарне одномірне рівняння конвективно-дифузійного перенесення пари рідини в сушильному потоці і рівняння зв'язку між температурним і однорідним електричним полем, при нестационарному процесі взаємодії електромагнітної хвилі з колоїдним капілярно-пористим матеріалом, приймаючи як рухаючу силу градієнт парціального тиску водяної пари. Становить практичний інтерес дослідження двох випадків у визначенні парціального тиску водяної пари: коли можна зневажити дифузійним опором між поверхнею твердих фракцій і парогазовим середовищем, і коли це зробити не можна при постійній потужності внутрішнього джерела тепла.

Розглянемо колоїдний капілярно-пористий матеріал з початковим вологовмістом V . Заповнення пір рідкою фазою вважаємо рівномірним рівним l . Припустимо, що процес утворення сухої зони відбувається без врахування дифузійного опору, є квазіізотермічним, протікає при температурі рівній T . Парціальний тиск водяної пари P над твердою фазою, дорівнює парціальному тискові P_k насиченої водяної пари. Тоді, для визначення полів парціальних тисків газу в матеріалі і закону руху границі розподілу фаз «суха область – пар», може бути використана наступна система рівнянь [7]:

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = k^2 \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} - \frac{ea_m \delta}{c} S, \quad (\tau > 0, 0 < z < \xi(\tau)), \quad (5)$$

$$P(0, z) = P_k, \quad (6)$$

$$P(\tau, 0) = P_p,$$

$$P(\tau, \xi(\tau)) = P_k, \quad (7)$$

$$\left. \frac{k^2}{RT} \frac{\partial P}{\partial z} \right|_{z=\xi} = \gamma \mathcal{W} \frac{d\xi}{d\tau},$$

де k^2 – коефіцієнт дифузії водяної пари в матеріалі, e – коефіцієнт фазового перетворення рідини в пару, \bar{R} – газова постійна.

Введемо нову шукану функцію, що перетворить неоднорідні граничні умови (7) до однорідних:

$$\theta(\tau, z) = P(\tau, z) - P_p - (P_k - P_p) \frac{z}{\xi}.$$

Щодо функції $\theta(\tau, z)$ задача (5) – (7) перетвориться до виду:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = k^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \frac{(P_k - P_p) \dot{\xi} z}{\xi^2} - \frac{ea_m \delta S}{c}, \quad (\tau > 0, 0 < z < \xi(\tau)), \quad (8)$$

$$\theta(0, z) = (P_k - P_p) \left(1 - \frac{z}{\xi} \right), \quad (9)$$

$$\theta(\tau, 0) = \theta(\tau, \xi) = 0, \quad (10)$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial z} \right|_{z=\xi} + \frac{P_k - P_p}{\xi} = \frac{\gamma RT}{k^2} \frac{d\xi}{d\tau}, \quad \xi(0) = \xi_0. \quad (11)$$

Інтегральне перетворення Фур'є і формула звертання для сформульованої задачі мають вигляд:

$$\alpha_n(\tau) = \int_0^{\xi} \theta(z, \tau) \sin \frac{n\pi}{\xi} z dz,$$

$$\theta(z, \tau) = \frac{2}{\xi} \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n(\tau) \sin \frac{n\pi}{\xi} z,$$

де $\alpha_n(\tau)$ і $\xi(\tau)$ є рішеннями задачі Коші для системи звичайних диференціальних рівнянь першого порядку:

$$\begin{aligned} \frac{d\alpha_n}{d\tau} + \left(\frac{n\pi}{\xi}\right)^2 \alpha_n &= \frac{\dot{\xi}}{\xi} \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^{n+m} \beta_{nm} \alpha_m + \frac{(-1)^{n+1} (P_K - P_P)}{\xi} + \frac{\xi e a_m \delta S}{n\pi c} [(-1)^n - 1], \\ \frac{d\xi}{d\tau} &= \frac{k^2}{\gamma WRT} \left[\frac{P_K - P_P}{\xi} + \frac{2\pi}{\xi^2} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \alpha_n(\tau) \right], \\ \alpha_n(0) &= \frac{\xi(0)(P_K - P_P)}{n\pi}, \quad \xi(0) = \xi_0, \\ \beta_{nm} &= \frac{2nm}{m^2 - n^2}, \quad m \neq n; \quad \alpha_{nm} = \frac{1}{2}, \quad n = m. \end{aligned} \quad (12)$$

Величина інтенсивності утворення сухої зони може бути визначена у виді:

$$J = \frac{k^2}{RT} \frac{\partial P}{\partial z} \Big|_{z=0}, \quad (13)$$

де

$$P(z, \tau) = P_p(z, \tau) + (P_K(z, \tau) - P_p(z, \tau)) \frac{z}{\xi(\tau)} + \frac{2}{\xi(\tau)} \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n(\tau) \sin \frac{n\pi}{\xi(\tau)} z. \quad (14)$$

Підставляючи рівняння (14) у співвідношення (13), одержимо:

$$J = \frac{k^2}{RT} \left[\frac{P_K - P_P}{\xi(\tau)} + \frac{2\pi}{\xi^2(\tau)} \sum_{n=1}^{\infty} n \alpha_n(\tau) \right]. \quad (15)$$

Кількість вилученої вологи з одиниці поверхні одержимо у виді:

$$m = \frac{k^2}{RT} \int_0^{\tau} \left[\frac{P_K - P_P}{\xi(\tau)} + \frac{2\pi}{\xi^2(\tau)} \sum_{n=1}^{\infty} n \alpha_n(\tau) \right] d\tau. \quad (16)$$

Розглянемо утворення сухої зони при наявності дифузійного опору. У цьому випадку гранична умова першого роду при $z=0$ замінюється вираженням:

$$k^2 \frac{\partial P}{\partial z} \Big|_{z=0} = \beta(P_p - P_c). \quad (17)$$

У безрозмірній формі задача приймає наступний вид [8]:

$$\frac{\partial \psi}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + J, \quad \tau > 0, \quad 1 < y < H(\tau), \quad (18)$$

$$\psi(1, y) = 1, \quad (19)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} \Big|_{y=1} = \psi_p, \quad \psi(\tau, H) = 1, \quad \frac{\partial \psi}{\partial y} \Big|_{y=H} = k_0' \frac{dH}{d\tau}, \quad (20)$$

де $\psi = (P - P_c)/(P_K - P_c)$, $y = (z + \Delta)/\Delta$, $H = (\xi + \Delta)/\Delta$, $\tau = (k^2 \tau + \Delta)/\Delta^2$, $k_0' = \gamma WRT/(P_K - P_p)$ – тиск, координата, товщина сухої зони, час, число Косовича відповідно; Δ – ефективна товщина ізоляції, P_c –

парціальний тиск водяної пари, $J = \frac{\Delta^2 e a_m \delta S}{k^2 (P_c - P_k) c}$ – безрозмірна величина тепловиділення.

Щодо нової функції $\varphi(y, \tau) = \psi(y, \tau) - 1 - \psi_p(y - H)$ крайова задача (18) – (20) приймає вид:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \varphi_p, \quad \tau > 1, \quad 1 < y < H(\tau), \quad (21)$$

$$\varphi(y, 1) = \psi_p(H - y), \quad (22)$$

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right|_{y=1} = \psi(\tau, H) = 0, \quad (23)$$

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right|_{y=H} + \psi_p = k_0 \frac{dH}{d\tau}, \quad H(1) \neq 1. \quad (24)$$

Як і першому випадку, поля парціальних тисків визначимо у виді:

$$\psi(\tau, y) = 1 - \psi_p(\tau, y)(y - H) + \frac{2}{H(\tau) - 1} \sum_{n=1}^{\infty} U_n(\tau) \cos \frac{\pi(2n-1)}{2(H(\tau)-1)}(y-1), \quad (25)$$

де $U_n(\tau)$ і $H(\tau)$ є рішеннями задачі Коші для системи диференціальних рівнянь першого порядку наступного виду:

$$\frac{dU_n}{d\tau} + \left[\frac{\pi(2n-1)}{2(H-1)} \right]^2 U_n = \frac{H}{2(n-1)} \sum \Omega_{nm} U_m - \frac{2\psi_p H(n-1)}{\pi(2n-1)},$$

$$k_0 \frac{dH}{d\tau} = \frac{\pi}{(H-1)^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n-1)(-1)^n U_n(\tau), \quad (26)$$

$$H(1) = H_0,$$

$$U_n(0) = \frac{4\psi_p [H_0 - 1]^2 [1 + \pi(2n-1)]}{\pi^2 (2n-1)^2}, \quad (27)$$

$$\Omega_{nm} = \frac{(-1)^{n+m+1} (2n-1)(2m-1)}{(m+n-1)(m-n)}, \quad n \neq m; \quad \Omega_{nm} = 1, \quad n = m.$$

Виразення для інтенсивності утворення сухої зони має вигляд:

$$J = \frac{k^2}{RT} \left[\frac{\pi(P_p - P_k)\Delta}{\xi} \sum_{n=1}^{\infty} (2n-1) U_n \left(\frac{k^2 \tau + \Delta^2}{\Delta^2} \right) + \frac{P_p - P_k}{\Delta} \right]. \quad (28)$$

Висновки. У роботі побудована математична модель мікрохвильового сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів. Вирішено задачу для двох випадків, що представляють практичний інтерес у визначенні парціального тиску водяної пари: коли можна зневажити дифузійним опором між поверхнею твердих фракцій і парогазовим середовищем і коли це зробити не можна при постійній потужності внутрішнього джерела тепла.

ЛІТЕРАТУРА

1. Архангельский Ю.С., Девяткин И.И. Сверхвысокочастотные нагревательные установки для интенсификации технологических процессов. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1983. – 140 с.
2. Явчуновский В.Я. Микроволновая и комбинированная сушка. Физические основы технологии и оборудования. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1992. – 233 с.
3. Архангельский Ю.С., Тригорлый С.В. СВЧ электротермические установки лучевого типа. Саратов: Изд-во. Саратов. гос. техн. ун-та, 2000. – 122с.
4. Торговников Г.И. О перспективах использования СВЧ энергии для обработки древесины и древесных материалов // Деревообрабатывающая промышленность. – 1989. – №5. – С. 13 – 16.
5. Афанасьев А.М., Подгорный В.В., Сипливый К.Н., Яцышен В.В. Математическое моделирование взаимодействия СВЧ излучения с влагосодержащими плоскими слоистыми средами // ИВУЗ «Электромеханика». – 2001. – №2. – С. 14 – 21.
6. Лыков А.В. Теплообмен. – М.: Энергия, 1971. – 560 с.
7. Яковенко В.О. Моделювання процесу надвисокочастотного сушіння пористих діелектричних матеріалів // Вісник АМСУ. – 2007. – № 2 (34). – С. 107 – 111.
8. Яковенко В.О. Моделювання теплових процесів при спалюванні вуглю під дією енергії надвисоких частот // Системні технології, системне моделювання технологічних процесів. – 2007. – № 5 (52). – С. 65 – 71.

СИСТЕМНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ

УДК 519-86

Є.О. Матрос, П.І. Бідюк

СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ РОЗДРІБНОМУ КРЕДИТУВАННІ ФІЗИЧНИХ ОСІБ

Вступ

За останні роки роздрібне кредитування фізичних осіб стало одним із ключових напрямків діяльності банківських установ України. Розширюється продуктова лінійка банків, здійснюється стандартизація бізнес-процесів, динамічно зростає кількість роздрібних клієнтів та обсяги виданих кредитів. Разом з тим зменшуються вимоги банків до клієнтів, скорочується час на прийняття рішення. Все це приводить до зростання втрат внаслідок реалізації ризиків. Основними ризиками роздрібного кредитування є кредитні ризики (індивідуальний та портфельний кредитний ризик) та операційні ризики (внутрішнє та зовнішнє шахрайство, помилки персоналу) [1].

Для реалізації ефективного кредитування, яке враховує як активне зростання кредитного портфелю так і мінімізацію ризиків [2, 3], банкам необхідно впроваджувати сучасні інформаційні системи.

Розглянемо цикл кредитування [3, 4], який складається з наступних етапів:

1. отримання інформації від клієнту та введення в систему всіх необхідних параметрів позичальника та кредиту;
2. здійснення оцінки кредитоспроможності клієнта;
3. видача кредиту;
4. супровід та моніторинг сплати кредиту;
5. здійснення заходів стягнення в разі наявності прострочок;
6. аналіз кредитного портфелю;
7. постійне оновлення моделей оцінки кредитоспроможності.

Аналіз останніх досліджень

На даному етапі розвитку банківських інформаційних систем існують наступні розрізнені програмні засоби, які супроводжують певні етапи кредитування [5, 6, 7, 8, 9]:

- Автоматизована банківська система Операційний день банку (АВС ОДБ) – основна інформаційна платформа банку. Це система транзакційного типу (OLTP) в якій здійснюються транзакції по рахункам. Фактично, ОДБ АВС є бухгалтерською програмою, яка дозволяє ввести виданий кредит на певний рахунок, нарахувати відсотки, проконтролювати факт погашення кредиту. Лідерами серед виробників є міжнародні та локальні компанії – SAP, BankMaster, Midas, Temenos, Профікс, Lime systems, SC, RS.
- Система обробки кредитних заявок (application processing system – APS) – це клас програмних комплексів, за допомогою яких здійснюється прийняття рішення про кредитування. Практично, APS є засобом реалізації кредитних процесів і правил прийняття кредитних рішень. Лідерами серед виробників таких програмних комплексів є Experian, Fair Isaak, Credit Info, Scorto. Мінусом цього типу продуктів є те, що вони побудовані по принципу конструктора, тобто впровадження такого комплексу фактично означає повноцінне конструювання системи видачі кредитів.
- Система стягнення простроченої заборгованості (collection system) – це продукт, який дозволяє автоматизувати процес стягнення простроченої заборгованості. Лідерами серед виробників таких продуктів є Experian, Fair Isaak, Credit Info. З недавнього часу подібні продукти пропонують і локальні виробники.
- Система побудови скорингових моделей (scoring generator system) – це продукт, який дозволяє побудувати скорингову модель. Лідером в даній сфері є SAS. Також такі продукти пропонують Cognos, KXEN, EGAR (Росія), Scorto (Україна). Для побудови скорингових моделей використовуються також такі статистичні пакети, як SPSS, MathLab, Statistica.
- Система звітності (MIS – management information system) є частиною сховища даних (Data warehouse) [9]. Такі системи пропонують SAS, Oracle, IBM, SAP. Мінусом таких систем є те, що вони також побудовані по принципу конструктора, а отже створення робочої MIS означає повноцінне конструювання від

вибору джерел інформації, очистки даних до створення шаблонів звітів.

Жоден з перелічених класів систем не покриває весь цикл роздрібного кредитування. Створення ефективної СППР шляхом інтеграції всіх перелічених класів систем є доволі складною задачею, яка вимагатиме значних часових та фінансових затрат, а в результаті не весь необхідний функціонал буде автоматизовано. Тобто на даний момент не існує програмного комплексу який системно вирішує задачу супроводження роздрібного кредитування.

Постановка задачі

Задачею даної роботи є розробка структури системи підтримки прийняття рішень для повного супроводження всіх циклів роздрібного кредитування. Необхідно описати основні блоки СППР та їх взаємодію. В статті будуть наведені інформаційні потоки та докладно описано функції кожного з блоків на окремих етапах циклу кредитування.

СППР для супроводження роздрібного кредитування

Пропонується наступна структура СППР (рис. 1).

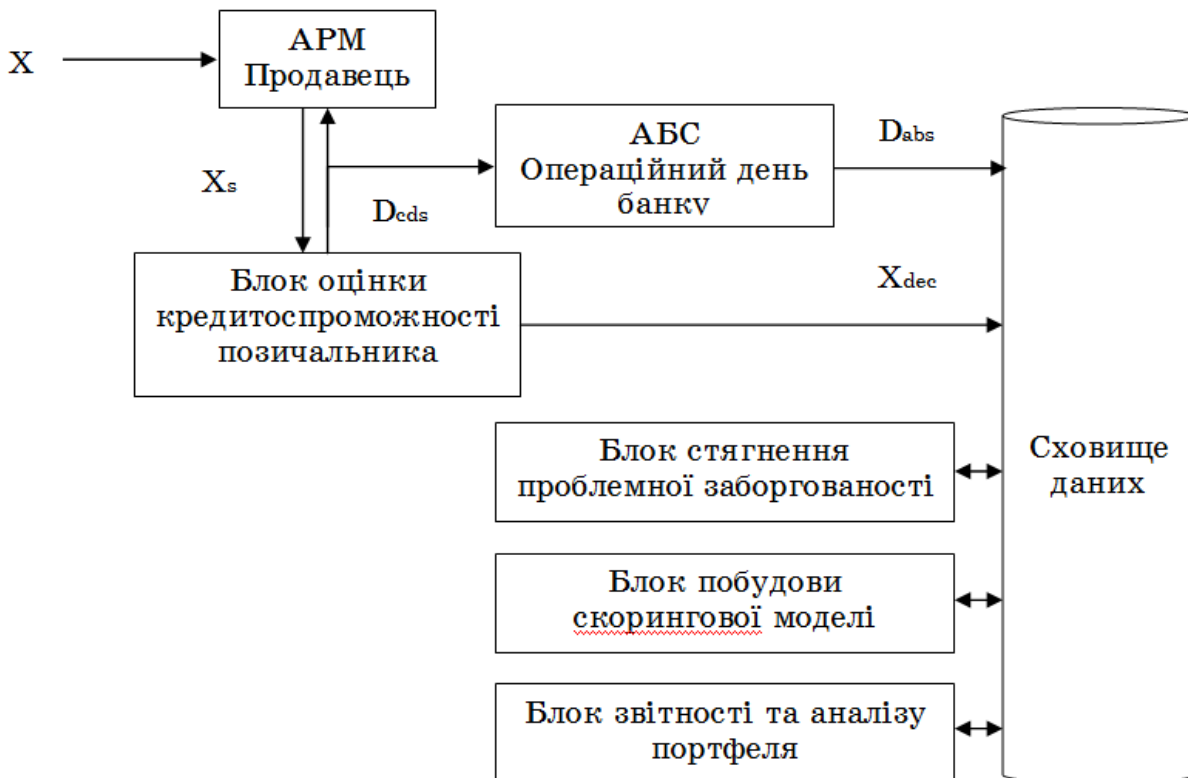


Рисунок 1 - Структура СППР

Основні блоки СППР:

1. блок оцінки кредитоспроможності позичальника;
2. сховище даних;
3. блок стягнення проблемної заборгованості;
4. блок побудови скорингової моделі;
5. блок звітності та аналізу портфеля.

Розглянемо кожний блок запропонованої СППР.

Блок оцінки кредитоспроможності позичальника

Структуру блоку наведено на рисунку 2.

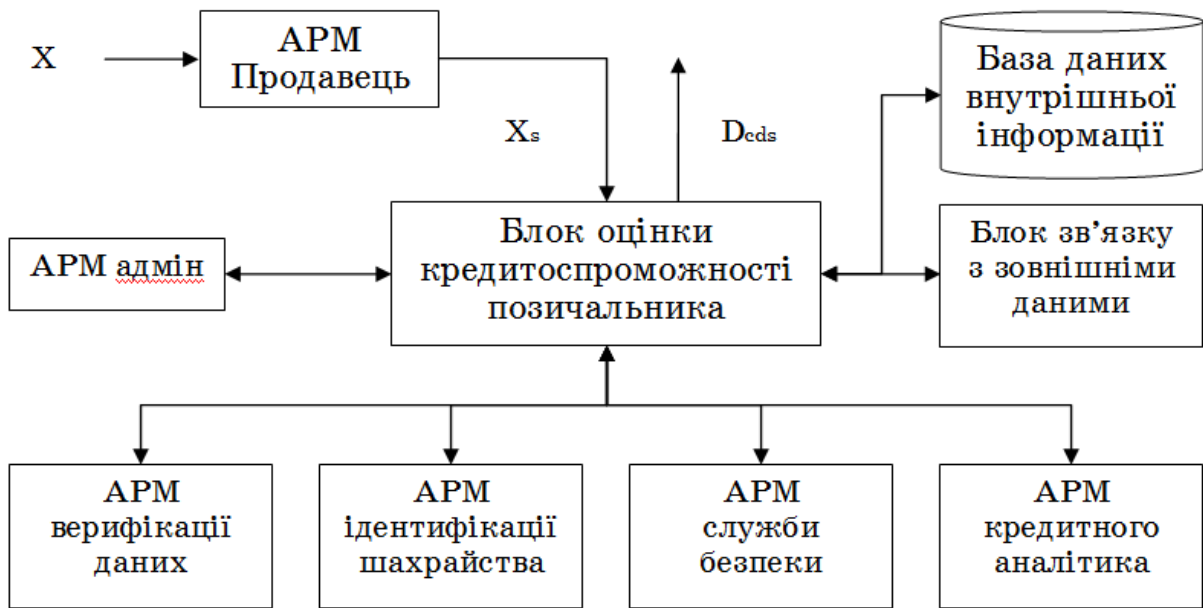


Рисунок 2 - Структура блоку оцінки кредитоспроможності

Вектор X – вектор даних позичальника та параметрів кредиту. Дана інформація вводиться в АРМ Продавець. З метою мінімізації операційних ризиків та спрощення подальшого аналізу кредитної заявки на етапі вводу інформації необхідно максимально формалізувати введення даних та перевіряти логічність введеної інформації за допомогою певних правил. Продавець кредиту також вводить додаткову інформацію про поведінку клієнта.

Вектор X_s поступає в блок оцінки кредитоспроможності позичальника, який підтримує прийняття рішення щодо можливості видачі кредиту.

Оцінка кредитоспроможності складається з наступних етапів:

1. правила кредитної політики;
2. верифікація даних;
3. ідентифікація шахрайства;

4. перевірка даних службою безпеки;
5. скорингова оцінка позичальника;
6. оцінка платоспроможності;

Правила кредитної політики – це певні правила, які пропускають лише цільових клієнтів, тобто клієнтів на яких орієнтовано даний продукт. Прикладами правил є мінімальний та максимальний розмір кредиту, мінімальний та максимальний вік, мінімальний строк проживання в регіоні, рівень доходу, наявність майна, тощо.

Ці правила виконуються системою автоматично. CPR – множина правил кредитної політики розмірністю $SIZE_{CPR}$. Кожний елемент CPR_i характеризується:

- $CPR_product$ – продукт для якого діє правило;
- CPR_rule – правило;
- CPR_value – параметр правила.

В таблиці 1 наведено приклад CPR_i для експрес-кредиту в магазині та кредитної картки Платинум.

Таблиця 1

Приклад параметрів правил для експрес-кредиту та кредитної картки Платинум

i	$CPR_product$	CPR_rule	CPR_value
1	Експрес-кредит	Максимальний розмір кредиту	10 000 грн.
1	Платинум	Максимальний розмір кредиту	50 000 грн.
2	Експрес-кредит	Мінімальний вік, років	18
2	Платинум	Мінімальний вік, років	21
3	Експрес-кредит	Мінімальний строк проживання в регіоні, місяців	3
3	Платинум	Мінімальний строк проживання в регіоні, місяців	12
4	Експрес-кредит	Мінімальний рівень доходу	900 грн.
4	Платинум	Мінімальний рівень доходу	8 000 грн.

Для виконання окремих CPR_i використовується інформація з Бази даних внутрішньої інформації та інформація з Блоку зв'язку з зовнішніми даними. Результат перевірки по кожному правилу CPR_i приймає значення *true* або *false*. В результаті перевірки позичальника по правилам CPR формується вектор результатів CPR_result . Якщо даний вектор позитивний, тобто всі елементи вектору = *true*, кредитна заявка переходить на наступний етап.

Верифікація даних – це перевірка правдивості наданої інформації. В основному здійснюється шляхом телефонних дзвінків (дзвінок на роботу, дзвінок на домашній телефон, тощо) та отримання інформації з бюро кредитних історій. Перевірка здійснюється вручну верифікаторами даних за допомогою АРМ Верифікації даних. Вектор X_{s_dc} складається з окремих елементів вектору X_s , які необхідні для здійснення верифікації. DC – множина правил верифікації даних розмірністю $SIZE_{DC}$. Результатами перевірки по кожному DC_i є значення із списку варіантів результатів. Верифікатор даних на основі вектору X_{s_dc} здійснює перевірку по правилу DC_i , та вводить результат перевірки. Після введення результату по кожному правилу, СППР на основі дерева рішень приймає проміжне рішення $DC_{i,result}$:

- позитивне, продовжити перевірку далі;
- нейтральне, продовжити перевірку далі;
- негативне, продовжити перевірку далі;
- негативне, зупинити перевірку;

Остаточне рішення DC_result приймається системою при досягненні кінцевої вершини. Якщо DC_result є позитивним, кредитна заявка переходить на наступний етап.

Правила ідентифікації шахрайства – це певні логічні правила які дозволяють виявити підозрілі кредитні заявки. Вектор X_{s_cfd} складається з окремих елементів вектору X_s , які необхідні для здійснення ідентифікації. Матриця X_{res} складається з усіх попередніх кредитних заявок, по яким приймалось рішення. CFD – множина правил ідентифікації шахрайства. Правила CFD працюють за принципом пошуку збігів даних в X_{s_cfd} та X_{res} . Множина CFD складається з двох підмножин $CFDind$ – індивідуальні правила, які використовуються для перевірки окремих заявок та $CFDport$ – портфельні правила, які знаходять певні закономірності на рівні окремих субпортфелів кредитів.

Приклади $CFDind$:

- позичальник в віці 22 років отримує дуже високі доходи;
- телефон позичальника вже надавався іншим позичальником;

- телефон роботодавця клієнта такий самий як телефон роботодавця іншого клієнта, але назви роботодавців різні.

Приклади *CFDport*:

- в одному відділенні з певного часу видається значно більше кредитів, чим в інших відділеннях;
- в одному відділенні велика кількість клієнтів, які працюють в одному місці.

Система перевіряє кожну заявку по правилам *CFDind* та з певною періодичністю перевіряє портфель по правилам *CFDport*. В разі, якщо спрацьовує правило *CFD*, АРМ Ідентифікації шахрайства інформує працівника банку про надходження підозрілої заявки. Працівник банку детально розглядає заявку і приймає рішення *CFD_result*. Якщо правила *CFD* не спрацювали або *CFD_result* є позитивним, кредитна заявка переходить на наступний етап.

Служба безпеки перевіряє заявку за допомогою АРМ служби безпеки. Вектор X_{s_ss} складається з окремих елементів вектору X_s , які необхідні для здійснення ідентифікації. Служба безпеки приймає рішення використовуючи внутрішню та зовнішню інформацію про злочинну діяльність окремих осіб, список загублених або вкрадених паспортів, список фіктивних підприємств, тощо. Враховуючи різноплановість та рівень надійності інформації, в даному блоці відсутня формалізація правил і служба безпеки просто вводить кінцеве рішення *SS_result*. Якщо *SS_result* є позитивним, кредитна заявка переходить на наступний етап.

Скорингова оцінка [1, 3, 5, 8] – це оцінка ймовірності дефолту позичальника на основі скорингової моделі S . Змінними скорингової моделі є вектор соціо-демографічних параметрів позичальника (вік, стать, рівень освіти, сімейний стан, наявність та кількість дітей, місце проживання, строк проживання у данному регіоні, позиція позичальника, строк роботи на підприємстві, кількість працівників на підприємстві, напрям діяльності підприємства, наявність інших кредитів, кредитна історія, наявність майна, тощо) $X_{s_scoring}$, який складається з окремих елементів вектору X_s .

Скорингова модель будується на основі експертного підходу або з використанням методів аналізу даних (data mining) [10]. При експертному підході модель формується на основі досвіду експертів,

при використанні методів аналізу даних модель будується на основі вибірки кредитів. Для експрес-кредитів в магазинах, кредитних карток та кредитів на авто використовуються статистичні моделі. Для іпотечних кредитів використовується експертна модель.

В результаті оцінки розраховується скоринговий бал позичальника $Score = S(X_{s_scoring})$. Якщо $Score > CutOff$, то заявка переходить на наступний етап оцінки.

Кредитний аналітик за допомогою АРМ Кредитного аналітика отримує інформацію про всі дані позичальника X_s та результати скорингової оцінки $Score$. На основі даної інформації кредитний аналітик приймає остаточне рішення $Decision$. Для окремих продуктів або випадків рішення $Decision$ може прийматися автоматично без участі кредитного аналітика.

Блок оцінки кредитоспроможності зберігає всі кредитні заявки та результати перевірки на кожному з етапів. Після прийняття остаточного рішення вектор D_{cds} , який включає в себе $Decision$ та параметри угоди, передається в АРМ Продавця та АБС ОДБ. В разі позитивного рішення, на основі D_{cds} в АБС ОДБ автоматично формується продукт. Формування продукту включає наступні дії – відкриття картки клієнта (CIF) та кредитного рахунку в АБС ОДБ, перерахування коштів на кредитний рахунок, автоматичну генерацію та роздрукування кредитного договору.

Блок стягнення проблемної заборгованості

За допомогою Блоку стягнення проблемної заборгованості банк здійснює заходи щодо стягнення простроченої заборгованості. АБС ОДБ по кожному виданому кредиту контролює місячні виплати по кредиту. В разі наявності прострочок інформація автоматично передається в Блок стягнення проблемної заборгованості. Процес стягнення проблемної заборгованості складається з наступних кроків – нагадування за допомогою СМС, телефонні нагадування, надсилання листів, зустріч з клієнтом, судовий процес. Після кожного кроку зберігаються результати та вказуються строки в які клієнт погодився сплатити заборгованість. Далі необхідно проконтролювати чи була сплачена заборгованість в обіцяні строки. Всі ці дії виконуються за допомогою АРМ Колектора.

Блок звітності та аналізу портфеля

Основною функцією блоку звітності та аналізу портфелю є формування звітів, необхідних для інформування ризик-менеджменту про наявні проблеми. Всі джерела даних для формування звітів в запропонованій схемі (рис.1) є програмними комплексами типу OLTP, а отже призначені для обробки транзакцій [9]. В разі побудови складних звітів швидкість виконання транзакцій значно зменшиться так як ресурси системи будуть використовуватися для формування звітів. Деякі звіти містять інформацію, яка знаходиться в різних джерелах інформації, а отже для формування таких звітів необхідно об'єднувати інформацію з різних джерел. Для вирішення цих проблем пропонується створення сховища даних (data warehouse), в якому дублюються всі необхідні дані із перелічених джерел інформації. Блок звітності та аналізу портфеля отримуватиме інформацію для формування звітів з сховища даних.

Блок побудови скорингових моделей

Блок побудови скорингових моделей [1, 3, 5] використовується для побудови скорингових моделей за допомогою методів аналізу даних. Функціонал блоку:

- виділення вибірки позичальників;
- аналіз вибірки позичальників, вибір значущих змінних;
- поділ вибірки на навчальну та тестову;
- побудова моделі з використанням методів вбудованої бібліотеки;
- аналіз адекватності моделі на основі критеріїв адекватності;
- можливість збереження, редагування та експорту моделі.

Висновки

Роздрібне кредитування – це перспективний напрям бізнесу, який висуває високі вимоги до ІТ інфраструктури. Одним із основних принципів ефективного роздрібного кредитування є наявність сучасної цілісної СППР, яка повністю покриває цикл кредитування від розгляду кредитної заявки до стягнення проблемної заборгованості. В статті запропоновано модель такої СППР, наведено основні складові частини, описано їх функціональні можливості та взаємодію підсистем між собою. Запропонована модель включає блоки, які на даний момент є новітніми як для українських так і для

міжнародних банків – блок ідентифікації шахрайства, блок побудови скорингових моделей.

В подальших дослідженнях будуть детально описані блок побудови скорингових моделей та блок звітності та аналізу портфелю.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бідюк П.І., Матрос Є.О. Моделі оцінки ризиків кредитування фізичних осіб // Кібернетика та обчислювальна техніка. – 2007. – №153. – ст. 87-95.
2. Джеймс К. Ван Хорн, Джон М. Вахович. Основи фінансового менеджменту. – М.:Вільямс, 2001. – 991 с.
3. Енциклопедія фінансового ризик-менеджменту. Під редакцією О. О. Лобанова та А. В. Чугунова. – М.: Альпіна Паблішер, 2003. – 845 с.
4. Kiss F. Credit scoring processes from a knowledge Management perspective // Hungary Periodica Polytechnica. – 2003. – vol. 11, №1. – P. 95–110.
5. Матрос Є.О. Скорингові моделі оцінки кредитоспроможності позичальників фізичних осіб // VIII-та Міжнародна науково-практична конференція студентів та молодих аспірантів. – Київ, вересень 2006, с. 89.
6. Ігнатов А. А. Скорингові системи в російській практиці // Банківські технології. – М, 2005. – № 5. – С. 53-57 .
7. Строев А. А. Рішення SAS для кредитного скорингу в банках // Банківські технології. – М, 2004. – № 4. – С. 95-96.
8. Jorion P. Financial Risk Management HandBook. – New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003. – 422 с.
9. Ерік Спірлі. Корпоративні сховища даних. Планування, розробка та реалізація. – М.:Вільямс, 2001. – 400 с.
10. Nong Y. The Handbook Of Data Mining. – New Jersey: Arizona State University Publishers, 2003 – 1201 p.

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Введение

Запросы современных приложений к вычислительной мощности сред выполнения часто требуют объединения рабочих станций для повышения общей производительности. Создание высокопроизводительных систем подразумевает объединение разнородных вычислительных ресурсов в однородную логическую систему. В качестве примеров можно привести среду Grid-вычислений LHC Computing Grid [1] и систему доставки контента Limelight Networks [2].

При росте размера системы большинство известных централизованных решений в области управления ресурсами оказываются неприменимыми. Следовательно, большую практическую ценность представляют исследования в области децентрализованных вычислительных систем. Передовым направлением таких исследований являются разработки децентрализованных версий различных алгоритмов и протоколов, их качественное описание и возможные сравнения статистических характеристик.

Имитационное моделирование является популярным средством прогнозирования характеристик поведения децентрализованных систем. Такая популярность связана с тем, что затраты на реализацию системы моделирования существенно меньше цены полномасштабного эксперимента на реальной системе. Также отметим, что статистические данные, полученные имитационным моделированием, часто бывают более значимыми, нежели полученные из абстрактной математической модели.

Целью настоящей работы является выделение типичных задач, связанных с разработкой системы моделирования децентрализованных вычислительных сред и описание авторских решений

некоторых из этих задач. Дополнительно в работе приводится обзор предметной области децентрализованных вычислительных сред и анализ актуальных в настоящий момент программных продуктов-аналогов.

Общие принципы

Так как в децентрализованной системе нет возможности получить информацию о структуре всей вычислительной сети в целом, каждый узел использует для решения специфических прикладных задач децентрализованные протоколы обнаружения других компонент системы. Первые версии таких протоколов были упрощенными и не предполагали определенной логической организации узлов. Поиск в такой системе приводил к экспоненциальному росту передач сообщений при линейном росте количества узлов сети, так как на каждом узле было несколько вариантов возможной ретрансляции поискового запроса.

Следовательно, актуальность приобрели способы улучшения масштабируемости механизмов поиска. Для этого используются определенные адресные пространства, задающие отношения порядка на множестве ключей. Такие пространства позволяют задать направленность поиска в контексте отдельного узла, улучшить сходимость децентрализованного поиска и ограничить размер маршрутных таблиц узла.

Если рассмотреть маршрутную таблицу узла как список ссылок на другие узлы, мы получим ориентированный граф. В этом орграфе роль вершин играют узлы, а ребра соответствуют записям (ссылкам) в маршрутной таблице. По сути, такой граф является сложной сетью логических связей и взаимодействий узлов, часто используемой при оценке и оптимизации работы децентрализованной системы в целом.

Характеристики работы системы тесно связаны со свойствами оверлейной сети. Например, количество ретрансляций поискового запроса связано с распределением длин путей в оверлейной сети, а размер маршрутной таблицы соответствует степени вершины оверлейной сети. В эффективной системе средние значения ранее упомянутых величин ограничены сверху логарифмическими выражениями от количества узлов [3]. Чаще всего есть возможность установить характер таких зависимостей аналитическими методами,

но исследователи часто подтверждают аналитическую гипотезу с помощью имитационного моделирования.

Так как децентрализованные системы часто используют ненадежные компоненты, оверлейная сеть подвергается значительным «возмущениям» в связи со сбоями узлов или соединений. Потому большой интерес представляет вычисление определенной меры затрат, необходимых на нормализацию сети, и измерение вероятности сохранения связности сети в зависимости от вероятности сбоев узлов.

В большинстве случаев такие измерения имеют обобщенный статистический характер, где влияние детальных характеристик сетевого и транспортного уровня сказывается достаточно мало. Отметим, что при необходимости учесть такие характеристики возможно использовать данные о топологии сети Интернет [4]. Кроме того, теория сложных сетей в настоящий момент предлагает модели, позволяющие генерировать достоверные топологии глобальных вычислительных сетей.

В настоящий момент известны исследования алгоритмов адаптации оверлейной сети к структуре физической сети, стратегий управления нагрузкой и улучшения статистических характеристик структуры оверлейной сети. Таким образом, имитационное моделирование является важным средством исследования децентрализованных стратегий и протоколов, применимым для широкой области практических задач.

Требования к системе моделирования

Основное требование к любой системе моделирования – максимальное приближение к реальной среде выполнения. В случае децентрализованных систем это требование связано с возможностью использования большинства компонент системы моделирования в реальной децентрализованной системе. В качестве примера приведем систему моделирования OverlayWeaver [5], в которой исследуемый алгоритм построения оверлейной сети можно выполнить в реальной системе без изменений. Для этого все программными компоненты системы моделирования, абстрагирующие определенные детали среды выполнения просто заменяются реальными компонентами.

Многие сценарии использования существующих систем предполагают одновременное выполнение децентрализованного

протокола на тысячах узлов. Естественно, что в такой ситуации необходимо оценивать характеристики масштабируемости системы моделирования. Следовательно, актуальность приобретает разработка возможных методов параллельной обработки моделируемых сценариев.

Отметим также, что имитация распределенной системы большого масштаба требует оценок реалистичности используемых моделей физической сети с точки зрения ее статистических характеристик, таких как характер распределений степеней связности, длин маршрутов, кластеризация. Потому актуальны интеграции системы моделирования со средствами анализа сложных сетей и возможность использования заданных топологий аппаратного уровня сетевой среды, на-пример – структуры сети Интернет на уровне автономных систем [4].

Прикладные задачи в децентрализованной системе опираются на распределенные службы: маршрутизацию поисковых запросов, хеширование (т.е. поиск данных по ключу), доставку групповых сообщений. Качество работы этих служб зависит от характеристик структуры оверлейной сети. Следовательно, эффективная реализация этих служб является самостоятельной исследовательской задачей, опосредованно влияющей на характеристики работы задач прикладного уровня.

Отметим, что работа указанных выше базовых алгоритмов требует значимой доли вычислительных ресурсов. Например, алгоритмы обнаружения структуры физического уровня сети используют ICMP-сообщения, объем которых может составлять до 10% от общего объема передаваемой системой информации [6]. Таким образом, повторное использование не только обеспечивает простоту миграции моделируемого алгоритма в реальную среду выполнения, но и позволяет достичь большей эффективности в случае работы нескольких децентрализованных приложений в одной сети.

Также отметим следующее важное требование к архитектуре системы моделирования: открытость для изменения существующих и интеграции новых реализаций компонент системы: протоколов, алгоритмов, аспектов моделирования с низким риском непредвиденных влияний на поведение системы в целом.

Необходимость поуровневой декомпозиции

Для выполнения вышеизложенных требований используется типичная техника улучшения внутреннего качества программного продукта – поуровневая декомпозиция. При ее применении службы, поддерживаемые децентрализованной системой, разделяются на уровни. Каждый уровень непосредственно использует возможности, предоставляемые нижним уровнем, реализуя собственные службы, абстрагированные от деталей реализации нижележащих (некоторые из которых используются опосредованно).

Таким образом, поуровневая декомпозиция помогает выделить те службы, которые значительно зависят от физического окружения, и в системе моделирования будут соответствовать имитирующим компонентам, равно как и те, которые можно использовать в реальной системе без изменений. Такая декомпозиция является основным способом обеспечения возможности и эффективности повторного использования компонент системы моделирования и децентрализованной системы в целом и открытости программного продукта для изменений.

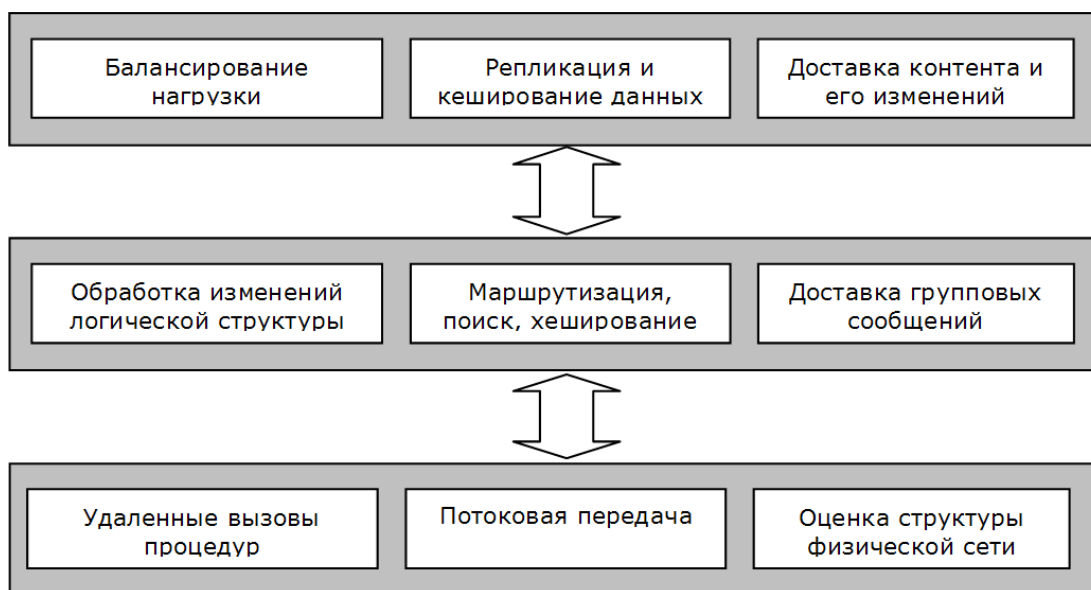


Рис. 1: Поуровневая декомпозиция служб.

Пример поуровневой декомпозиции отображен на рис. 1, на котором также дополнительно показаны типичные высокоуровневые службы, не несущие прикладной специфики. Отметим, что только службы нижнего уровня зависят от физического окружения, остальные возможно использовать повторно.

Следовательно, поуровневая декомпозиция позволяет реализовать многие требования к системе моделирования: открытость для изменений, близость к реальной среде выполнения, возможность повторного использования.

Стандарт Common API

Common API — предполагаемый публичный стандарт базовых операций, используемых для поддержки структуры оверлейной сети [8]. Такой стандарт позволяет обеспечить независимость одновременных исследований протоколов, сервисов и приложений, использующих оверлейные сети, дает возможность непосредственного экспериментального сравнения посредством эксперимента и облегчает разработку компонент сторонними производителями.

Основными механизмами, которые предлагают разработчики Common API, являются интерфейсы Routing и RoutingState, реализующие задачи маршрутизации на уровне всей сети и отдельного узла соответственно (см. рис. 2). Заметим, что концепции адресации и генерации ключей слабо детализированы (Address, Key, NodeHandle). Очевидна некоторая незаконченность и изначальная неэффективность предложений по реализации удаленных вызовов процедур, так как каждое сообщение моделируется с помощью отдельного объекта, реализующего маркерный интерфейс Msg.

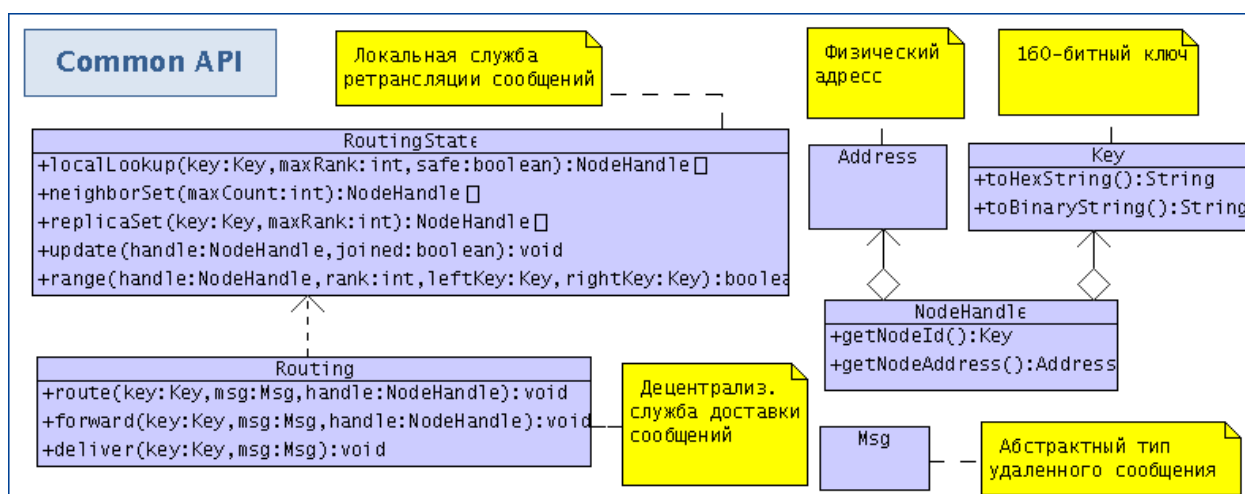


Рисунок 2 - Ключевые компоненты Common API.

Из-за ограничений в объеме материала не будут рассмотрены детали реализации этого стандарта в системах моделирования OverlayWeaver [5] и PlanetSim [7]. Отметим только значительное смещение сущностей в среде PlanetSim, которая приводит к большой

сложности модификации и расширения данной системы. Упомянутая ранее среда OverlayWeaver не реализует Common API, однако в ней представлены многие аналогичные элементы.

Архитектура авторской системы

Предлагаемая автором система моделирования содержит спецификацию Common API, которая в последствии расширяется уточненными службами и типами данных. На рис. 3 представлены службы базового уровня. Одной из основных является служба StorageService, который задает примитивы локального сохранения данных. Отметим, что служба RoutingService в авторской реализации наследует RoutingState, и позволяет обрабатывать большее количество событий.

Отдельно отметим службу RpcService, которая для заданной службы генерирует прокси-объект, обеспечивающий поддержку удаленных вызовов на других узлах. Прокси-объект – объект, генерируемый интроспективными средствами программной среды, позволяющий в обобщенном виде определять способ реализации вызовов определенного интерфейса. В нашем случае вызовы методов этого объекта интерпретируются системой моделирования и отображаются в вызовы соответствующих методов заданной удаленной службы.

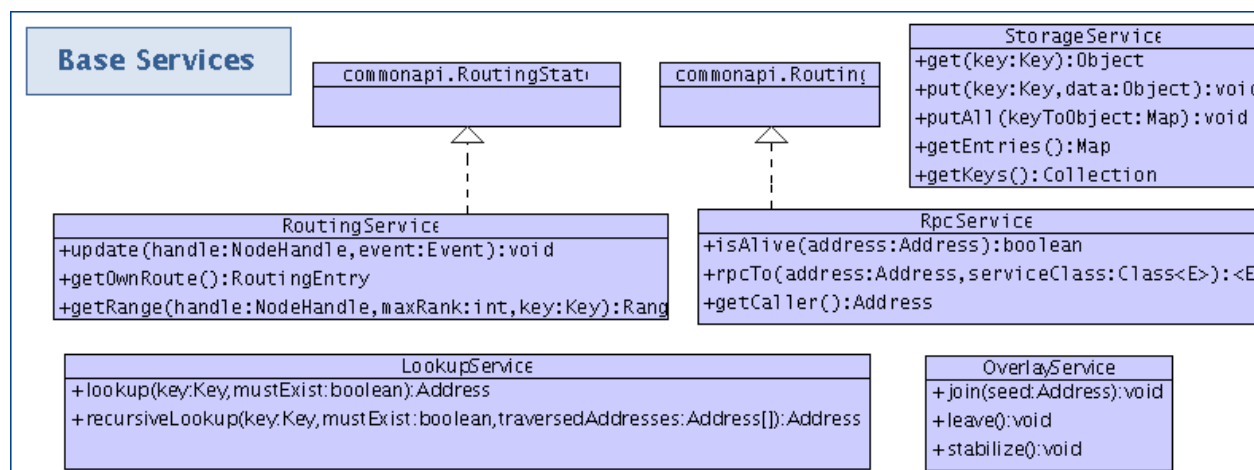


Рисунок 3 - Службы базового уровня

Таким образом, удаленный вызов процедуры в авторской среде моделирования представляет собой вызов метода, а не отдельный объект. Это позволяет сохранить чистоту объектно-ориентированной декомпозиции системы, снизить запросы к подсистеме управления памятью и выделить службу удаленных вызовов, реализация которой

может быть легко изменена при переходе к реальной среде выполнения.

Опишем кратко децентрализованные службы, заданные в предлагаемой автором системе моделирования (см. рис. 3). Служба децентрализованного поиска LookupService позволяет отображать пространство ключей в адреса таким образом, чтобы соответствующий адрес соответствовал узлу, хранящему данный ключ, либо первому из узлов, ответственных за сохранение сегмента пространства ключей, содержащего искомый ключ. Таким образом, эта служба является реализацией службы децентрализованного хеширования.

Служба OverlayService задает базовые события, которые должен обрабатывать узел оверлейной сети. В случае реализации конкретного протокола, задаются дополнительные методы, которые могут вызываться удаленно другими узлами, участвующими в сети. Например, в случае реализации протокола P-Grid [9], могут быть заданы специфичные методы сбалансированных разделений и слияний сегментов пространства ключей, заданные этим протоколом.

Способы имитации дискретных событий

Для обеспечения максимальной правдоподобности необходимо реализовать многопоточную обработку запросов в контексте одного узла, так как в реальных системах параллельный доступ к данным оказывает значительное влияние на архитектуру и поведение системы. Однако, в случае имитации одновременного выполнения нет необходимости запускать для каждого узла определенное количество потоков: как было показано в [10], такая реализация ограничивает размер моделируемой системы (около 1200 узлов). Для достижения необходимого параллелизма достаточно использовать небольшое количество потоков в контексте глобальной очереди событий.

Каждый узел содержит определенное количество данных – чаще всего эти данные содержат информацию о соседних узлах: IP-адрес, позицию соседнего узла в общей логической структуре, задержку передачи сообщений и пр. Так как система моделирования предоставляет базовые механизмы для управления этими данными, необходимо обеспечить безопасность использования таких механизмов в многопоточном контексте.

Система использует несколько потоков, выполняющих задания из одной глобальной очереди событий, что позволяет выполнять

имитационное моделирование в многопоточном режиме, не перегружая ресурсы системы.

Задание сценариев, сбор статистики

Для воспроизводимого и управляемого выполнения моделирования необходимо обеспечить возможность задания сценариев выполнения. Сценарии представляют собой определенную последовательность событий, разделенную на фазы инициализации системы и сбора статистики. Система в настоящий момент поддерживает следующие события: добавление/удаление/сбой узла оверлейной сети, добавление/удаление/запрос элемента данных, и децентрализованный поиск элементов данных.

При этом, события могут быть сгруппированы в последовательности и циклы. Сбой одной из операций цикла приводит к прекращению последовательности, что, обеспечивает однородность собираемой статистики по составным событиям. Для задания сценариев используется язык XML, что обеспечивает некоторую универсальность и удобство программной обработки. Отметим, что в сценариях используются подстановки значений параметров (т.е. ссылки на значения, изменяющиеся в определенном диапазоне), что позволяет разделить описание исследуемого пространства параметров от самих сценариев (см. рис. 4, выделения).

```

<testbench>
  <initEvent>
    <sequence>
      <join nodeCount="{nodeCount}"/>
      <loop loopCount="{nodeMappings.static.min}">
        <putMapEntry entryCount="{nodeCount}"/>
      </loop>
      <stabilizeAll/>
    </sequence>
  </initEvent>
  <runEvent>
    <loop loopCount="{loop.static.max}">
      <loop loopCount="{nodeCount}">
        <lookupMapEntry/>
      </loop>
    </loop>
  </runEvent>
</testbench>

```

Рисунок 4 - Пример задания тестового сценария, в котором добавляется варьируемое количество узлов, фиксированное количество элементов данных (в расчете на узел) и производится фиксированное количество случайных поисковых запросов

Пространство параметров также задается посредством документа XML, в котором последовательно описаны параметры и их возможные значения. Такой подход позволяет легко произвести моделирование некоторого тестового сценария для различных наборов параметров, что обеспечивает легкость обнаружения зависимостей между характеристиками системы.

Также система поддерживает сбор статистических данных о структуре логической сети и работе базовых сервисов: модельное время, количество ретрансляций и успешность поисковых запросов, дисперсия количества хранимых элементов данных, степень кластеризации, диаметр оверлейной сети.

Кроме этого, система позволяет провести экспорт данных о логической структуре сети в формате GraphML, что дает возможность в дальнейшем провести анализ этой структуры с помощью известных средств анализа сложных сетей [11], и определить характер влияния показателей эффективности оверлейной сети на конкретные показатели работы системы.

Выводы

В настоящей работе представлены основные детали архитектуры авторской системы имитационного моделирования, типичные требования к системам такого типа и некоторые способы их реализации. Практическая новизна реализации состоит в использовании интроспективных средств языка программирования для реализации службы передачи сообщений. Это позволяет достичь большей производительности и открытости прикладной системы для расширения.

В дальнейшем система может быть расширена за счет реализации служб третьего уровня: управления нагрузкой, репликацией, потоковой передачей. Также большой интерес представляет расширение генерируемых показателей структуры оверлейной сети, например – коэффициентов расширения, ассортативности и подобных им.

Показанное автором решение поуровневой декомпозиции системы представляет практический интерес. Отметим возможность сбора статистических данных на всех уровнях реализации, что позволяет проводить анализ эффективности их работы и оценивать степень зависимости уровней. Принципиальным преимуществом системы

можно считать интеграцию со средствами исследования сложных сетей, которое в настоящий момент слабо представлено в системах-аналогах.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Bird I. et al*, LHC computing grid: technical design report // Technical Report CERN-LHCC-2005-024. – CERN European Laboratory for Particle Physics, Geneva. – June 2005. – 153 p.
2. *Pathan A.-M.K., Buyya R.*, A taxonomy and survey of content delivery networks // Technical Report, GRIDS-TR-2007-4. – Grid Computing and Distributed Systems Laboratory, The University of Melbourne, Australia. – 12 Feb. 2007. – 44 p.
3. *Stoica I., Morris R., Liben-Nowell D. et al*, Chord: a scalable peer-to-peer lookup protocol for internet applications. // IEEE/ACM Transactions on Networking. – Feb. 2003. – IEEE Press, Piscataway: – Vol. 11, No 1. – pp. 17 – 32. – ISSN 1063-6692.
4. *Mahadevan P., Krioukov D., Fomenkov M. et al*, The internet AS-level topology: three data sources and one definitive metric // SIGCOMM Comput. Commun. Rev. – Vol. 36, No. 1. – ACM. New York. – 2006. – pp. 17-26.
5. *Shudo K., Tanaka Y., Sekiguchi S.*, Overlay Weaver: An overlay construction toolkit // Comput. Commun. – Vol. 31, No. 2. – ACM, New York. – 2008. – pp. 402-412.
6. *Nakao A., Peterson L., Bavier A.*, A routing underlay for overlay networks // SIGCOMM '03: Proc. of the 2003 conf. on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer comm. – ACM, New York. – 2004. – pp. 11-18.
7. *Ahullo J.P., Lopez P.G.*, PlanetSim: an extensible framework for overlay network and services simulations // Simutools '08: Proc. of the 1st intern. conf. on Simulation tools and techniques for communications, networks and systems. – ICST, Brussels. – 2008. – ISBN 978-963-9799-20-2. – 8 p.
8. *Dabek F., Zhao B., Druschel P., Kubiatowicz J., Stoica I.*, Towards a common API for Structured Peer-to-Peer Overlays. // In Proc. of IPTPS'03 Workshop. – Berkeley, CA. – Feb. 2003. – 6 p.
9. *Aberer K., Cudr'e-Mauroux Ph., Datta A. et al*, P-Grid: a self-organizing structured P2P system // SIGMOD Rec. – ACM Press, New York – 2003. – Vol. 32, No. 3. – pp. 29-33.
10. *Naicken S., Livingston B., Basu A. et al*, The state of peer-to-peer simulators and simulations // SIGCOMM Comput. Commun. Rev. – ACM Press, New York. – Vol. 37, No 2. – April 2007. – pp. 95-98.
11. *Juenger, M., Mutzel, P. (Eds.), Batagelj, V., Mrvar, A.*, Pajek - analysis and visualization of large networks. // Graph Drawing Software. – Springer, Berlin. – pp. 77-103.

ЦИФРОВОЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ В ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ

Введение

Технические требования к приборам нового поколения для радиационного мониторинга изложены в международных стандартах IEC 62327 от 31.05.02 «Radiation protection instrumentation Hand-held Instruments for the Detection and Identification of Radioactive Isotopes and for the Measurement of Dose Rate» и ISO/DIS 22188 “Monitoring for inadvertent movement and illicit trafficking of radioactive material”. Они разработаны для полевых приборов, основное назначение которых – обнаружение, локализация и идентификация радионуклидов. Стандарты регламентируют, в частности, требования к детекторам, спектрометрическому тракту, программному обеспечению (ПО) для идентификации, библиотеке радионуклидов, средствам управления и индикации, определяют основные характеристики приборов и методы их испытаний.

Для создания таких приборов наиболее оптимально использовать цифровые сигнальные процессоры (ЦСП). Их высокая производительность и широкий набор встроенных периферийных устройств дает возможность реализовать необходимые функции спектрометрического тракта на программном уровне и тем самым уменьшить аппаратные за-траты.

Программная реализация некоторых функций спектрометрического тракта

В работе [1] представлен один из вариантов реализации спектрометра ионизирующих излучений на базе ЦСП – TMS320F2812, в котором реализована функция оцифровки формы сцинтилляционного импульса. Учитывая такую возможность аппаратуры, было разработано программное обеспечение, работающее по алгоритму представленному на рис. 1.

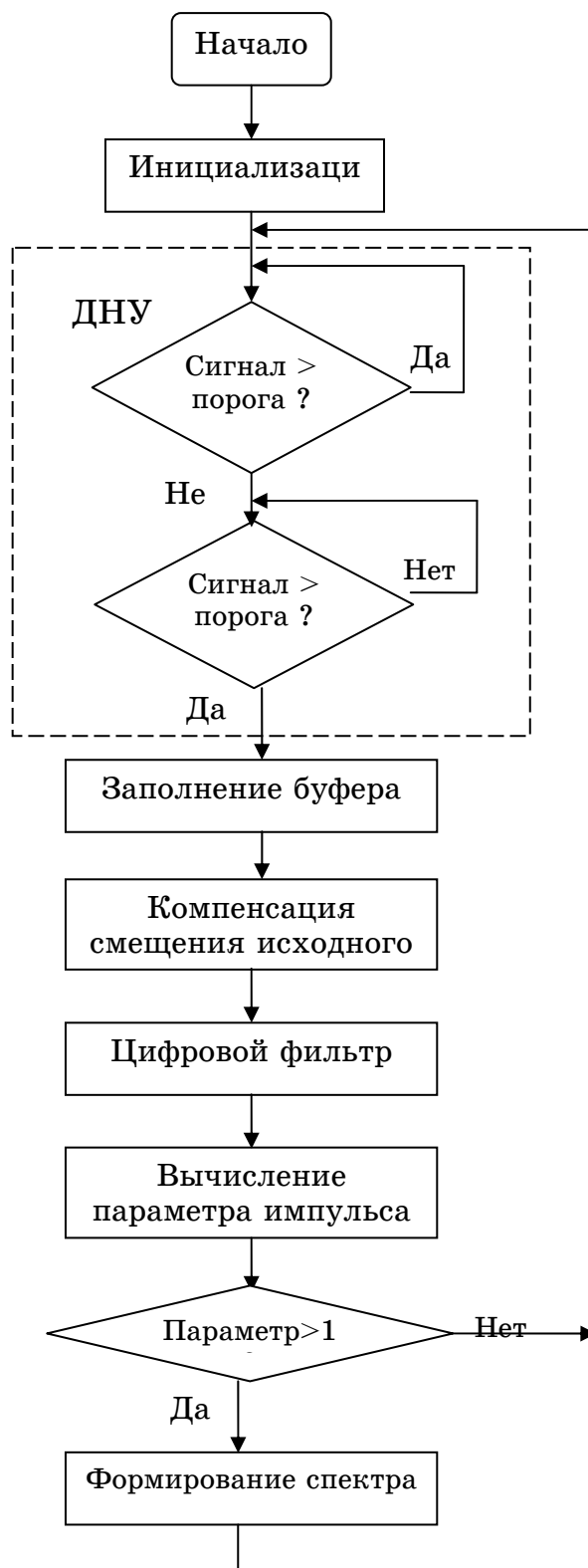


Рисунок 1 – Алгоритм обработки спектрометрической информации

При включении спектрометра производится инициализация аппаратных средств ЦСП и встроенный АЦП конфигурируется таким образом, что происходит непрерывная оцифровка входного сигнала с

частотой выборок 8,3 МГц, причем восемь последовательных выборок заносятся в соответствующие регистры результатов. Такая организация работы АЦП позволяет оцифровать форму сцинтилляционного импульса и, как минимум, четыре выборки, соответствующие исходному уровню перед началом импульса. Далее происходит дискриминация сигнала по нижнему уровню (ДНУ), выполняемая в два этапа. На первом этапе из обработки исключаются импульсы, начало которых не совпало по времени с началом оцифровки. А на втором этапе отслеживается начало импульса, который необходимо обработать. Затем результаты оцифровки заносятся в буфер размером 72 ячейки, организованный в области памяти данных цифрового сигнального процессора TMS320F2812. Оцифрованный таким образом сцинтилляционный импульс показан на рис. 2. Далее выполняется компенсация смещения исходного уровня путем вычитания из всех выборок среднего значения первых четырех выборок [2] и обнуления отрицательных значений. После этого сигнал обрабатывается полосовым цифровым фильтром первого порядка. На рис. 3 показан этот же импульс после компенсации смещения исходного уровня и фильтрации. Параметры фильтра выбраны таким образом, чтобы получить биполярный сигнал.

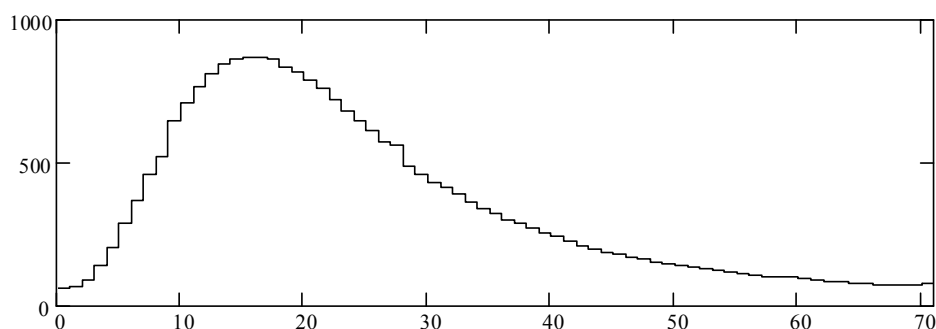


Рисунок 2 – Оцифрованный сцинтилляционный импульс

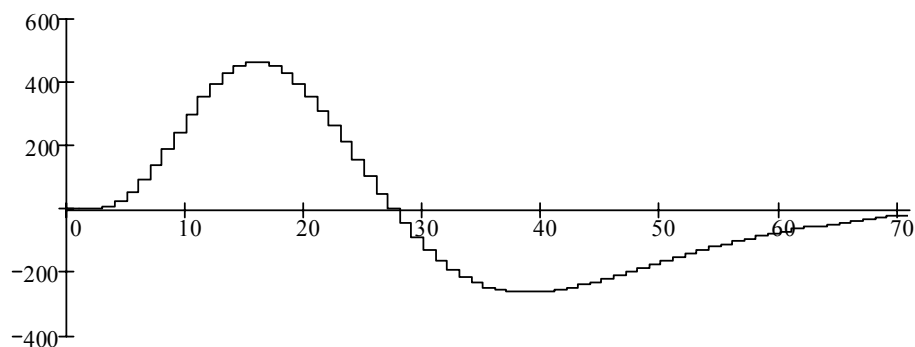


Рисунок 3 – Импульс после компенсации смещения исходного уровня и фильтрации

Затем рассчитывается параметр импульса, используя следующие выражения:

$$\begin{aligned} \text{If}(Y_t < 0) & \quad Y_{n_t} = 1 \\ \text{Else} & \quad Y_{n_t} = 0 \\ \text{If}(Y_t > 0) & \quad Y_{d_t} = 1 \\ \text{Else} & \quad Y_{d_t} = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$P = \frac{\sum_t Y_{n_t}}{\sum_t Y_{d_t}}$$

где:

Y_t – выборка АЦП;

t – номер выборки;

Y_{n_t} и Y_{d_t} – дельта-функции отрицательной и положительной части импульса соответственно (определенные согласно выражениям 1).

Для приведенного выше импульса $P = 1,692$.

Исследования показали, что для наложенных импульсов параметр $P \leq 1$, поэтому в алгоритм работы спектрометра введен программный режектор наложенных импульсов. То есть, спектр энергетического распределения формируется из импульсов, имеющих значение параметра $P > 1$. Режекция наложенных импульсов улучшает относительное энергетическое разрешение спектрометра при больших входных нагрузках. На рис. 4 приведен пример наложенных импульсов, на рис. 5 – результат фильтрации. В этом случае параметр $P = 0,556$.

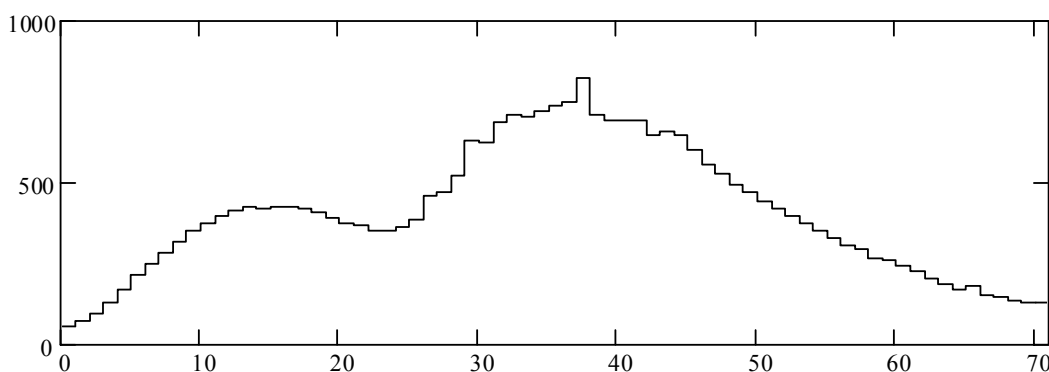


Рисунок 4 – Наложённые импульсы

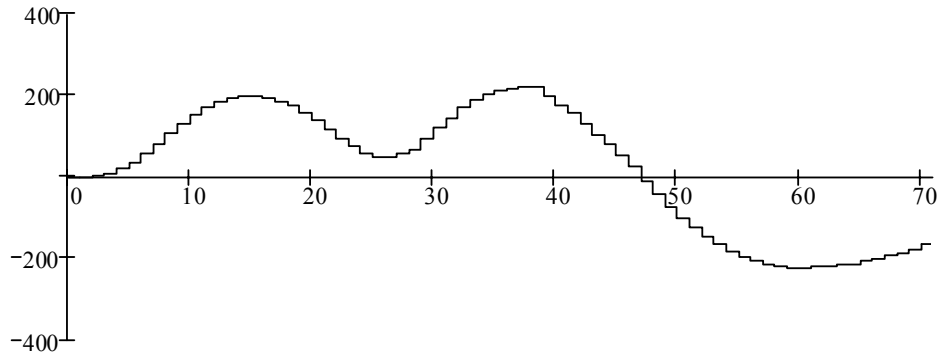


Рисунок 5 – Наложенные импульсы после фильтрации

Выводы

Предложенный алгоритм работы спектрометра на базе ЦСП – TMS320F2812 и его практическая реализация позволяют отказаться от аппаратного решения необходимых узлов спектрометрического тракта, таких как:

- дискриминатор нижнего уровня;
- стабилизатор исходного уровня;
- режектор наложенных импульсов.

Уменьшение аппаратных затрат дает не только экономический эффект, но и уменьшает энергопотребление устройства, что может значительно улучшить массогабаритные показатели приборов для полевого применения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мороз Н.Г. Использование цифрового сигнального процессора в ра-диометрических приборах - Деп. в ГНТБ Украины, №86 – Ук2006.
2. Kohji Kamada, Uhji Enokido, Seiji Ogawa Neutron-gamma discrimination employing pattern recognition of the signal from liquid scintillator. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 426 – 1999 (633 – 637).

О ПРИБЛИЖЕНИИ ОПЕРАТОРАМИ ДЖЕКSONА И КОРОВКИНА

Введение

Данная работа посвящена установлению асимптотически точных оценок приближения классов функций при помощи операторов Джексона и Коровкина.

Постановка задачи

Рассмотрим классы функций W_∞^r , вместо $\chi_{0,1}(L_n, \delta)_\infty$ будем писать $\chi(L_n, \delta)$

где

$$\chi_{r,k}(L_n, \delta)_p = \sup_{\substack{f \in L_p^r \\ f \neq \text{const}}} \frac{\|f - L_n(f)\|_p}{\omega_k(f^{(r)}, \delta)_p}$$

или

$$\chi_{r,k}(L_n, \delta)_p = \sup_{f \in W_p^{r,k}(s)} \|f - L_n(f)\|_p.$$

Первую точную константу типа Джексона вычислил Н.П. Корнейчук. Он показал, что

$$1 - \frac{1}{2n} \leq \chi_{0,1}\left(T_n, \frac{\pi}{n}\right)_\infty < 1$$

Н.И. Черных доказал соотношение:

$$\chi_{0,1}\left(T_n, \frac{\pi}{n}\right)_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Основное содержание.

Пусть

$$E = (P, M_n) = \sup_{f \in P} E(f; M_n) = \sup_{f \in P} \|f - L_n(f)\|$$

где $L_n(f)$ – некоторый оператор, отображающий пространство X в множестве M_n .

Обозначим через

$$\chi_{r,k}(L_n, \delta)_p = \sup_{\substack{\{f \in L_p^r\} \\ \{f \neq \text{const}\}}} \frac{\|f - L_n(f)\|_p}{\omega_k(f^{(r)}, \delta)_p}$$

Оператор Коровкина определяется как

$$K_n(f; t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t+u) \cdot K_n(u) du$$

$$K_n(u) = \frac{1}{2} + \sum_{k=1}^{n-1} \rho_k^n \cos kt$$

где

$$\rho_k^n = \frac{n+1-k}{n+1} \cos \frac{k\pi}{n+1} + \frac{\text{ctg} \frac{\pi}{n+1} \cdot \sin \frac{k\pi}{n+1}}{n+1}$$

Имеет место следующее утверждение.

Лемма 1. Пусть $L_n(f; t)$ положительный тригонометрический оператор,

$$\chi_{0,1}(L_n, \alpha_n) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} E\left(\frac{t}{\alpha n} + 1\right) \cdot l_n(t) dt.$$

Докажем следующую теорему.

Теорема 1. При любом $\gamma > 0$ и $n \rightarrow \infty$ справедливо соотношение:

$$\chi\left(D_n, \frac{\gamma}{n}\right) = 1 + \frac{3}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} Q\left(\frac{k\gamma}{4}\right) + o\left(\frac{1}{n}\right)$$

где

$$Q(z) = \int_z^{\infty} \frac{\sin^4 t}{t^4} dt$$

Доказательство. В силу леммы 1.

$$\chi\left(D_n, \frac{\gamma}{n}\right) = 1 + \frac{3}{\pi N(2N^2 + 1)} \int_0^{\pi} E\left(\frac{nt}{\gamma}\right) \frac{\sin^4 Nt/2}{\sin^4 t/2} dt \quad \left(N = E\left(\frac{n}{2}\right) + 1\right).$$

Отсюда получаем:

$$\chi\left(D_n, \frac{\gamma}{n}\right) \leq 1 + \frac{6}{\pi N(2N^2 + 1)} \int_0^{\pi/2} E\left(\frac{2nt}{\gamma}\right) \frac{\sin^4 Nt}{t^4} dt + \frac{14,4n}{\pi N(2N^2 + 1)\gamma} \times$$

$$\times \int_{\frac{\gamma}{2n}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin^4 Nt}{t} dt + \frac{4,4n}{\pi \gamma N(2N^2 + 1)} \int_{\frac{\gamma}{2n}}^{\frac{\pi}{2}} t \cdot \sin^4 Nt dt = 1 + \alpha_n + \beta_n + \sigma_n$$

и

$$\chi\left(D_n, \frac{\gamma}{n}\right) \geq 1 + \alpha_n$$

Ясно, что

$$\sigma_n = o\left(\frac{1}{n^2}\right)$$

и

$$\beta_n = \frac{14,4n}{\pi\gamma N(2N^2+1)} \int_{\gamma/2n}^{\pi/2} \frac{\sin^4 Nt}{t} dt = O\left(\frac{\ln n}{n^2}\right)$$

Таким образом

$$\chi\left(D_n, \frac{\gamma}{n}\right) = 1 + \alpha_n + O\left(\frac{\ln n}{n^2}\right)$$

для $n = 2N$

$$\begin{aligned} \alpha_n &= \frac{6}{\pi N(2N^2+1)} \int_0^{\pi/2} E\left(\frac{2nt}{\gamma}\right) \frac{\sin^4 Nt}{t^4} dt = \frac{6}{\pi N(2N^2+1)} \int_0^{\infty} E\left(\frac{4Nt}{\gamma}\right) \frac{\sin^4 Nt}{t^4} dt - \\ &- \frac{6}{\pi N(2N^2+1)} \int_{\pi/2}^{\infty} E\left(\frac{4Nt}{\gamma}\right) \frac{\sin^4 Nt}{t^4} dt = \frac{6N^2}{\pi(2N^2+1)} \int_0^{\infty} E\left(\frac{4t}{\gamma}\right) \frac{\sin^4 t}{t^4} dt - \\ &- \frac{6N^2}{\pi(2N^2+1)} \int_{\pi/2}^{\infty} E\left(\frac{4t}{\gamma}\right) \frac{\sin^4 t}{t^4} dt = \frac{3}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} Q\left(\frac{k\gamma}{4}\right) + O\left(\frac{1}{n^2}\right) \end{aligned}$$

Для $n = 2N - 1$

$$\begin{aligned} \alpha_n &= \frac{6}{\pi N(2N^2+1)} \int_0^{\pi/2} E\left(\frac{2nt}{\gamma}\right) \frac{\sin^4 Nt}{t^4} dt = \\ &= \frac{6}{\pi N(2N^2+1)} \int_0^{\pi/2} E\left(\frac{4(N-0,5)t}{\gamma}\right) \frac{\sin^4(N-0,5)t}{t^4} dt + O\left(\frac{1}{n}\right) = \\ &= \frac{6(N-0,5)^3}{\pi N(2N^2+1)} \int_0^{\infty} E\left(\frac{4t}{\gamma}\right) \frac{\sin^4 t}{t^4} dt + O\left(\frac{1}{n}\right) = \frac{3}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} Q\left(\frac{k\gamma}{4}\right) + O\left(\frac{1}{n}\right) \end{aligned}$$

Сопоставляя эти соотношения, получим утверждение теоремы:

Следствие. Имеет место соотношение

$$\sup_{n=1,2,3,\dots} \chi\left(D_n, \frac{1}{n}\right) = 7 - \frac{21}{2\pi} = 3,6577\dots$$

Доказательство. Так как $\chi\left(D_{2k}, \frac{1}{2k}\right) > \chi\left(D_{2n-1}, \frac{1}{2n-1}\right)$, то будем

рассматривать только $\chi\left(D_{2k}, \frac{1}{2k}\right)$.

Непосредственный просчет дает

$$\chi\left(D_2, \frac{1}{2}\right) = 7 - \frac{21}{2\pi} = 3,6577$$

и

$$\chi\left(D_{2k}, \frac{1}{2k}\right) < 3,65 \quad (k = 2, 3, \dots, 7)$$

При $k \geq 8$ имеют место следующие оценки для α_n , β_n и σ_n . Из этого следует, что

$$\alpha_{2k} = \frac{6}{\pi k(2k^2 + 1)} \int_0^{\pi/2} E(4kt) \frac{\sin^4 kt}{t^4} dt = \frac{6I_1}{\pi k(2k^2 + 1)}$$

и

$$I_1 < 4k^3 \int_{\pi/4}^{\infty} \frac{\sin^4 t}{t^3} dt.$$

Так как

$$\sin^4 t = \frac{3}{8} - \frac{1}{2} \cos 2t + \frac{1}{8} \cos 4t,$$

то

$$I_1 < 4k^3 \left(3 - 2 \int_{\pi/2}^{\infty} \frac{\cos t}{t^3} dt + 2 \int_1^{\infty} \frac{\cos t}{t^3} dt \right).$$

Кроме того

$$\int_a^{\infty} \frac{\cos t}{t^3} dt = \frac{\cos a}{2a^2} - \frac{\sin a}{2f} - \frac{1}{2} Ci a,$$

где

$$Ci a = \int_a^{\infty} \frac{\cos t}{t} dt.$$

Отсюда получаем

$$I_1 < 4N^3 \left(3 - 4 \cos \frac{1}{2} + 2 \sin \frac{1}{2} + \cos 1 - \sin 1 + Ci \frac{1}{2} - Ci 1 \right) < 2,65N^3$$

Следовательно,

$$\alpha_{2N} = \frac{6}{\pi N(2N^2 + 1)} I_1 < 2,5308$$

Для β_{2N} имеем

$$\beta_{2N} = \frac{28,8}{\pi(2N^2 + 1)} \int_{\pi/4N}^{\pi/2} \frac{\sin^4 Nt}{t} dt \stackrel{\text{def}}{=} \frac{28,8I}{\pi(2N^2 + 1)}$$

Используя соотношение, получим

$$\begin{aligned} I_2 &= \frac{3}{8} \ln 2N\pi - \frac{1}{2} \int_{\pi/2}^{N\pi} \frac{\cos t}{t} dt + \frac{1}{8} \int_1^{2N\pi} \frac{\cos t}{t} dt = \\ &= \frac{1}{8} \left(3 \cdot \ln 2N\pi - 4Ci \frac{1}{2} + Ci1 + 4CiN\pi - Ci2N\pi \right). \end{aligned}$$

Оценивая $CiN\pi$ и $Ci2N\pi$, учитывая, что $N \geq 8$, получим

$$I_2 < \frac{1}{8} (3 \ln 2k\pi - 0,9)$$

и

$$\beta_{2k} = \frac{28,8}{\pi(2k^2 + 1)} I_2 < \frac{28,2(3 \ln 2k\pi - 0,9)}{8\pi(2k^2 + 1)} < 0,1$$

Наконец

$$\sigma_{2k} = \frac{6 \cdot 1,44}{\pi(2k^2 + 1)} \int_{\frac{\pi}{4N}}^{\frac{\pi}{2}} t \cdot \sin^4 kt \, dt = \frac{6 \cdot 1,44}{\pi(2k^2 + 1)} \cdot I_3$$

Далее получим

$$I_3 = \frac{1}{k^2} \left(\frac{3}{8} \int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{k\pi}{2}} t \, dt - \frac{1}{2} \int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{k\pi}{2}} t \cos 2t \, dt + \frac{1}{8} \int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{k\pi}{2}} t \cos 4t \, dt \right) < \frac{1}{k^2} \left(\frac{3k^2\pi^2}{64} + 0,3 \right) = \frac{3\pi^2}{64} + \frac{0,3}{k^2},$$

Таким образом:

$$\sigma_{2k} = \frac{8,64}{\pi(2k^2 + 1)} I_3 < \frac{8,64}{\pi(2k^2 + 1)} \left(\frac{3\pi^2}{64} + \frac{0,3}{k^2} \right) < 0,01, \quad (k \geq 8)$$

отсюда следует, что для $k \geq 8$

$$\chi \left(D_{2k}, \frac{1}{2k} \right) \leq 1 + \alpha_{2k} + \beta_{2k} + \sigma_{2k} < 3,65,$$

что и завершает доказательство.

Выводы

В работе рассмотрены вопросы приближения операторами Джексона и Коровкина. Получены соотношения для $\gamma > 0$ и при $n \rightarrow \infty$

$$\chi \left(D_n, \frac{\gamma}{n} \right) = 1 + \frac{3}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} Q \left(\frac{k\gamma}{4} \right) + o \left(\frac{1}{n} \right)$$

где $D_n(f)$ – оператор Джексона

и

$$\chi \left(K_n, \frac{\pi}{n} \right) = 1,34 + O \left(\frac{\ln n}{(n+1)^2} \right)$$

где K_n – оператор Коровкина.

ЛИТЕРАТУРА

1. Давидчик А.Н. Приближение непрерывных функции линейными положительными операторами. – В сб.: Исследования по современным проблемам суммирования и приближения функций и их приложения. Днепропетровск, 1975, Вып. 6, С. 48–51.
2. Давидчик А.Н., Лигун А.А. К теореме Джексона. – Мат. заметки, 1974, Т.16, Вып.5, С. 681–690.
3. Коровкин П.П. Асимптотические свойства положительных методов суммирования рядов Фурье. – УМН, 1960, Т. 15, №1 (91), С. 207–212.

УДК (083.74)

И.Н. Кобзева, Г.Л. Логунова, В.А. Бигвава

**ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ НАЦИОНАЛЬНЫХ СТАНДАРТОВ ПО
ПРОТИВОМИННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В РАМКАХ
ФОРМИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ГУМАНИТАРНОГО
РАЗМИНИРОВАНИЯ В УКРАИНЕ**

Гуманитарное разминирование (термин введен ООН), как одна из основных составляющих противоминной деятельности, охватывает целый спектр услуг, направленных на устранение опасностей и рисков, связанных с минами, не взорвавшимися боеприпасами (НВБ) и взрывоопасными предметами (ВОП).

Ратификация Украиной Конвенции о запрещении применения, накопления запасов, производства и передачи противопехотных мин и об их уничтожении [1] в условиях динамичных изменений в стране открывает хорошие перспективы выхода на решение назревшей проблемы противоминной деятельности, имеющей политические, социально-экономические, экологические и другие аспекты. В этой связи в практической плоскости актуализируется вопрос о разработке Национальной комплексной программы противоминной деятельности. Она должна носить системный характер и включать меры по дальнейшей имплементации соответствующих международных стандартов в национальное законодательство, способствовать вхождению Украины в профильные мировые и региональные структуры, привлечению на условиях гарантии безопасности гражданских специалистов к проектам противоминной деятельности, выходу украинских компаний на международные рынки гуманитарного разминирования.

В организации и обеспечении системы противоминной деятельности в Украине и, прежде всего, гуманитарного разминирования, одной из важнейших проблем является создание нормативно-технического обеспечения деятельности, связанной с

разминированием, на основе международных стандартов противоминной деятельности (IMAS).

IMAS представляют собой систему международных стандартов и устанавливают руководящие принципы, которые определяют методы действий, различных вовлеченных организаций и агентств при реализации задач противоминной деятельности. Эти стандарты разработаны ООН, в том числе, с целью содействия разработке национальных стандартов деятельности, связанной с разминированием.

При создании системы гуманитарного разминирования в Украине в этой области необходимо выделить следующие проблемы, основные аспекты которых должны быть отражены в национальных стандартах деятельности, связанной с разминированием:

- разработка программы противоминной деятельности;
- создание системы аккредитации организаций и операций по разминированию;
- создание системы управления и координации в области противоминной деятельности
- определение организаций-исполнителей
- обеспечение оборудованием и техническими средствами
- испытания и оценка оборудования для гуманитарного разминирования;
- организация системы подготовки в соответствии с требованиями к квалификации персонала в области гуманитарного разминирования;
- разработка постоянно действующих инструкций (SOPs) в соответствии с требованиями IMAS;
- обеспечение безопасности персонала;
- создание системы информационного обеспечения противоминной деятельности;
- организация системы отчетной документации по противоминной деятельности.

Рассмотрим основные проблемы создания системы гуманитарного разминирования в Украине, которые в настоящее время находятся на разных стадиях развития.

Разработка программы противоминной деятельности в Украине

Согласно статьям 6 и 7 Конвенции о запрещении применения, накопления запасов, производства и передачи противопехотных мин и об их уничтожении [1], одним из условий получения международной помощи в осуществлении противоминной деятельности является наличие государственной программы противоминной деятельности.

В соответствии с IMAS 08.10 при разработке национальной программы противоминной деятельности необходимо провести “общую оценку деятельности по разминированию” с целью:

а) оценки масштабов проблемы, связанной с наземными минами, и ее воздействия на страну в целом и отдельные населенные пункты;

б) обследования всех зарегистрированных и/или предполагаемых мест наличия мин или неразорвавшихся боеприпасов, количества и видов взрывоопасных предметов;

в) сбора информации общего характера, такой как ситуация в сфере безопасности, климат, дороги, инфраструктура и местные объекты жизнедеятельности, например больницы, в целях содействия планированию будущих мероприятий по информированию о минной опасности и проектов по разминированию.

Существует распоряжение Кабинета Министров Украины от 8 февраля 2006 года №64-р “Про утворення міжвідомчої робочої групи з розроблення проекту Державної програми протимінної діяльності”; но на сегодняшний день официальная государственная программа по противоминной деятельности и разминированию территорий отсутствует.

Создание нормативно-правовой и нормативно-технической базы должно стать одним из первых пунктов программы по противоминной деятельности.

Система аккредитации организаций и операций по разминированию

Система аккредитации является процедурой, посредством которой организация по вопросам противоминной деятельности официально признается компетентной и способной планировать и осуществлять противоминную деятельность безопасным, эффективным и результативным образом и управлять такой деятельностью.

Для создания и внедрения системы аккредитации устанавливаются следующие руководящие принципы:

- заявитель на аккредитацию должен обладать определенной квалификацией;
- аккредитация предоставляется организации по разминированию только до тех пор, пока она соответствует стандартам IMAS или национальным стандартам;
- аккредитация операций предоставляется только аккредитованным организациям по разминированию и их подразделениям.

Орган по аккредитации должен иметь документацию, где определяются его обязанности, методы, применяемые в процессе аккредитации и область его деятельности.

При аккредитации необходимо рассмотреть следующие вопросы, связанные с:

- 1) организационной структурой подразделения (подразделений), включая их систему материально-технического снабжения;
- 2) профессиональной квалификацией (квалификацией, подтвержденной официальными свидетельствами, и опытом его оперативного и вспомогательного персонала);
- 3) оснащенностью оборудованием (рабочими характеристиками и состоянием оборудования);
- 4) постоянно действующими инструкциями (SOPs);
- 5) процедурами и методами в области безопасности и гигиены труда (БГТ) на рабочих местах;
- 6) предыдущей аккредитацией, которая демонстрирует эффективность оперативного потенциала подразделения.

Система управления и координации в области противоминной деятельности

В соответствии с международными стандартами IMAS 01.10-IMAS 14.20 ответственность за все стадии и аспекты программы противоминной деятельности в пределах национальных границ, включая разработку национальных стандартов деятельности, связанной с разминированием, постоянно действующих инструкций и директив, несет Национальный орган по вопросам противоминной деятельности.

В соответствии с IMAS 01.10 руководство противоминной деятельностью в государстве осуществляет центр противоминных

операций (ЦПМО), который осуществляет национальную программу противоминной деятельности и выполняет следующие функции:

1) координирует или планирует все противоминные мероприятия в пределах своей сферы ответственности;

2) оказывает консультативную техническую помощь национальному органу по вопросам противоминной деятельности (НОПМД);

3) ведет документацию и базы данных, касающиеся противоминной деятельности;

4) осуществляет аккредитацию в области противоминной деятельности;

5) производит расследование несчастных случаев и инцидентов, имеющих отношение к противоминной деятельности.

Определение организаций исполнителей

Согласно IMAS 07.10 деятельность по разминированию могут осуществлять международные, национальные, коммерческие, неправительственные организации и военные.

Национальные организации должны действовать в соответствии с национальными стандартами и SOP; а также иметь лицензию на проведение противоминной деятельности.

Обеспечение оборудованием и техническими средствами

Вопросы приборно-технического обеспечения противоминной деятельности определяются следующими основными стандартами IMAS:

IMAS 03.10 - Руководство по закупкам противоминного оборудования.

IMAS 03.20 - Процесс закупок оборудования.

IMAS 03.30 - Руководство по вопросам проведения исследований в области разработки противоминной технологии.

IMAS 03.40 - Испытания и оценка противоминного оборудования.

IMAS 09.10 - Требования в области очистки территории от мин.

IMAS 09.20 - Инспекция разминированных территорий, руководящие принципы применения методов отбора проб.

IMAS 09.30 - Обезвреживание взрывоопасных предметов.

IMAS 09.50 - Оборудование разминирования.

Следует выделить ряд требований, которые должны быть учтены при разработке национальных стандартов противоминной деятельности в области приборно-технического обеспечения:

- должны быть установлены руководящие принципы процессов материально-технического обеспечения и обоснованы требования к технологиям и оборудованию, применяемым для противоминной деятельности;
- определен процесс оснащения оборудованием для противоминной деятельности на всех его стадиях, включая анализ и изучение потребностей в оборудовании, технико-экономическое обоснование, разработку, испытания и оценку, утверждение, сертификацию, а также приведены примеры основной документации, которая поддерживает процесс приобретения;
- раскрыты принципы и основы процессов исследования в области оборудования и технологий для противоминной деятельности.
- обеспечено руководство для проверки качества очистки территории от мин и НВБ методом выборочного контроля;
- регламентированы действия по обезвреживанию взрывоопасных боеприпасов, которые включают обнаружение, идентификацию, полевую оценку, приведение в безопасное состояние, утилизацию и ликвидацию неразорвавшихся боеприпасов.

Испытания и оценка оборудования для гуманитарного разминирования

Международная Программа Испытаний и Оценки для Гуманитарного Разминирования (International Test and Evaluation Programme for Humanitarian Demining IТЕР). IТЕР поддерживается ООН и представляет собой глобальную сеть испытаний и оценок, предоставляющую возможности для выполнения научно обоснованных испытаний и оценки эффективности и соответствия всех типов систем оборудования и методов целям гуманитарного разминирования.

IТЕР программа - первый пример движения к разработке международных научно-исследовательских (R&D) стандартов для деятельности, связанной с разминированием. Она поддерживается европейским органом стандартов CEN (Европейским комитетом по стандартизации) и его рабочей группой (WG) 126. Эти технические

стандарты не должны ограничивать передовое оборудование обнаружения, предполагается их широкое применение в пределах R&D деятельности, связанной с разминированием, и в перспективе - включение в IMAS.

Организация системы подготовки в соответствии с требованиями к квалификации персонала в области гуманитарного разминирования

Требования к квалификации персонала, выполняющего операции по разминированию, устанавливаются стандартом CWA 15564:2005 - EOD competency standards (Стандарты квалификации по обезвреживанию взрывоопасных предметов). Соглашения рабочей группы (CEN Workshop Agreements - CWA), которые являются добровольными стандартами преимущественного применения, выпущены Европейским Комитетом по Стандартизации (European Committee for Standardization CEN) в сотрудничестве с ООН и GICHD (Женевский Международный Центр Гуманитарного разминирования).

CWA 15564 определяет три уровня квалификации персонала, в зависимости от сложности решаемых задач, а также формирует требования, которым должен соответствовать персонал определенной квалификации.

Разработка постоянно действующих инструкций (SOPs) в соответствии с требованиями IMAS

Национальные постоянно действующие инструкции определяют предпочтительный, или установленный в настоящее время, метод проведения эксплуатационной задачи, или деятельности.

Постоянно действующие инструкции (SOPs) - подробные процедуры, установленные каждой организацией, осуществляющей деятельность, связанную с разминированием, для ее собственной программы разминирования. Общие требования к составу SOPs содержатся в TN 07.30 / 01 (Документация по Аккредитации). Они предусматривают требования к квалификации и обязанностям персонала, состав используемых инструментов, приспособлений и защитного снаряжения для выполнения различных операций, порядок действий при выполнении обнаружения, раскопок закопанных мин, извлечения, уничтожения ВОП. Кроме того, SOPs должны содержать указания по методам обследования заминированных районов, в том числе с использованием

миноискателей и минно-розыскных собак, представления их результатов, отчетности, а также транспортированию и хранению взрывчатых веществ. Обязательными являются требования безопасности. Медицинское сопровождение операций, отчетность по несчастным случаям, требования к контролю качества и порядок передачи очищенной территории также должны быть отражены в SOP.

SOPs содержат список всех инструкций и национальных стандартов, на основании которых они разработаны.

Обеспечение безопасности персонала

Основным принципом управления противоминной деятельностью является требование обеспечения безопасных условий труда.

Вопросы безопасности персонала рассматриваются в стандартах IMAS 10.10 - 10.60 и охватывают:

- 1) IMAS 10.10 БГТ – Общие требования.
- 2) IMAS 10.20 БГТ – Безопасность на участке, где производится разминирование.
- 3) IMAS 10.30 БГТ – Личное защитное снаряжение (ЛЗС).
- 4) IMAS 10.40 БГТ - Медицинская помощь организациям по разминированию.
- 5) IMAS 10.50 БГТ – Хранение, транспортирование взрывчатых веществ и обращение с ними.
- 6) IMAS 10.60 БГТ - Уведомление об инцидентах при разминировании и их расследование.

Перечисленные выше стандарты IMAS или соответствующие национальные стандарты противоминной деятельности должны определять базовый уровень, который должен быть достигнут по вопросам, связанным с безопасностью и гигиеной труда.

Создание системы информационного обеспечения противоминной деятельности

Для эффективного управления противоминными программами требуется точная, надлежащая и своевременная информация. Система управления информацией в области противоминной деятельности (СУИПМД) является программным обеспечением по управлению данными для применения в противоминных центрах на

национальном и местном уровнях. В рамках этой системы реляционная база данных сочетается с применением географической информационной системы (ГИС). Эта система была разработана в целях создания механизма для своевременного сбора, обработки и распространения соответствующей информации на „полевом” уровне и на уровне руководящих структур.

Организация системы отчётной документации по противоминной деятельности

Согласно статье 7 Конвенции о запрещении мин [1] каждая страна-участница должна подготовить ежегодный доклад-отчет, охватывая предыдущий календарный год, и предоставлять его Генеральному секретарю Организации Объединенных Наций не позднее 30 апреля каждого года. Также с целью дополнения этих докладов был создан Доклад “Всемирный минный мониторинг” (Landmine Monitor) с учетом потребности в независимой отчетности и оценке. Landmine Monitor— инициатива МКЗНМ (Международная компания за запрет наземных мин) в сфере исследования и мониторинга, которая фактически осуществляет наблюдение за режимом выполнения Конвенции о запрещении мин [1]. МКЗНМ контролирует и представляет отчет в вопросах выполнения и соблюдения странами-участницами положений Договора о запрете мин. То есть, оценивается масштабность отклика международной общественности на гуманитарную проблему, вызванную наземными минами и взрывоопасными пережитками войны [6].

Одним из основных инструментов по стратегическому управлению выполнением Оттавской конвенции являются национальные стандарты противоминной деятельности.

Проблема создания национальных стандартов

В рамках создания системы гуманитарного разминирования необходимо рассмотреть проблему создания национальных стандартов противоминной деятельности.

В соответствии с Международными стандартами противоминной деятельности IMAS и в интересах государства Национальный орган по разминированию должен подготовить и издать национальные стандарты и обеспечить руководящие принципы по всем вопросам

противоминной деятельности, исходя из существующих в Украине проблем в данной области с учетом национальной специфики.

Стандарты IMAS были разработаны в соответствии с рекомендациями и процедурами, содержащимися в Системах ИСО по контролю качества (ИСО 9001:2000) и в Системах ИСО по управлению рисками (Руководство ИСО 51). Элементы этих систем содержатся в большинстве стандартов IMAS, что превращает сами эти стандарты в комплексную систему управления рисками и качеством.

Основной целью разработки национальных стандартов противоминной деятельности является повышение уровня безопасности и эффективности противоминной деятельности путем предоставления руководящих указаний, установления принципов и, в некоторых случаях, определения национальных требований и технических соглашений. Стандарты должны стать инструментом, который сможет информировать участников противоминной деятельности о национальном нормативном обеспечении, а так же о существующих международных правилах, конвенциях и договорах, которые оказывают воздействие на противоминную деятельность, в частности, о тех актах, которые касаются основных прав человека, требований в отношении разминирования, маркировки опасных участков и общих вопросов безопасности.

Стандарты должны обеспечить содействие разработке постоянно действующих инструкций организаций разминирования (SOPs). При этом следует отметить, что методы и требования в части противоминной деятельности определяются именно в SOPs, национальных и отраслевых правилах, инструкциях и кодексах сложившихся правил.

Руководящие принципы разработки и применения национальных стандартов противоминной деятельности заключаются в следующем:

- обеспечение разработки и выполнения государственной программы противоминной деятельности;
- стандарты должны обеспечивать защиту тех, кто подвергается наибольшему риску;
- создание национального потенциала в области разработки, поддержания на надлежащем уровне и применения соответствующих стандартов противоминной деятельности;

- соответствие международным стандартам противоминной деятельности;
- соблюдение положений международных конвенций и договоров.

Национальные стандарты противоминной деятельности создаются на основе IMAS, но возможны отличия в наименованиях глав, составе стандарта. Кроме того, Национальные стандарты так же могут иметь отличия в связи с отображением в них противоминной деятельности конкретной страны. Национальные стандарты требуется периодически пересматривать, чтобы гарантировать их актуальность и согласованность с IMAS и национальным законодательством.

Проведенный нами научный анализ показал, что разрабатываемые национальные стандарты противоминной деятельности должны охватывать широкий круг проблем, а также разрабатываться в соответствии с IMAS и с учетом национальной специфики по следующим категориям: общие международные стандарты и директивы; менеджмент, аккредитация и мониторинг; оценка риска и обследование; обезвреживание мин и неразорвавшихся боеприпасов; безопасность и гигиена труда [5].

Принимая во внимание важность вопроса создания и развития нормативной базы в области противоминной деятельности, с нашей точки зрения, необходимо проведение целого комплекса работ, направленного на развитие национальной стандартизации и сертификации в области противоминной деятельности.

Национальные стандарты, определяющие требования по основным аспектам противоминной деятельности и являющиеся основой нормативной базы, важны для всех субъектов отношений в этой области, в первую очередь для тех организаций и предприятий, которые занимаются вопросами противоминной деятельности.

Как отмечено «Международной кампанией за запрещение противопехотных мин» в своем ежегодном информационно-аналитическом докладе “Всемирный минный мониторинг” (Landmine Monitor), у Украины на сегодняшний день отсутствует официальная государственная программа по противоминной деятельности и разминированию территорий [6]. В связи с не полностью сформированной нормативной базой, регламентирующей противоминную деятельность, можно выделить следующие проблемы,

требующие решения при разработке Национальных стандартов противоминной деятельности:

- отсутствие законодательной базы в области противоминной деятельности;
- отсутствие единого национального органа, уполномоченного развивать противоминную деятельность;
- отсутствие технологий очистки территорий от взрывоопасных предметов в соответствии со стандартами IMAS [7];
- иные факторы организационного характера.

Таким образом, задача национальных стандартов в области противоминной деятельности - это создание основы для взаимодействия между международными организациями, национальными органами и организациями по противоминной деятельности.

Представляется целесообразным параллельно с деятельностью по стандартизации в области противоминной деятельности проведение активной научно-исследовательской работы, результаты которой могут быть использованы при разработке эффективных SOPs.

Примером такой работы является исследование теоретических основ приборного, технологического и методического обеспечения гуманитарного разминирования, которое проводится в настоящее время в НИПКИ “Искра”, г. Луганск, Украина.

ЛИТЕРАТУРА

1. Конвенция о запрещении применения, накопления запасов, производства и передачи противопехотных мин и об их уничтожении (Convention on the Prohibition of the Use, Stockpiling, Production and transfer of the Anti-Personnel Mines and on their Destruction). Осло, 18 сентября 1997 года.
2. Международно-правовые аспекты гуманитарного разминирования применительно к Украине./ Власова А.А., НИПКИ “Искра”, - Луганск, 2006. – 11 с.: ил. - Библиогр.: 7 назв. - Рус. - Деп. в ГНТБ Украины. 16.10.06. №58- Ук 2006
3. О нормативно-правовом обеспечении деятельности связанной с гуманитарным разминированием в Украине./ Власова А.А., НИПКИ “Искра”, - Луганск, 2006. – 7 с.: ил. - Библиогр.: 7 назв. - Рус. - Деп. в ГНТБ Украины. 16.10.06. №57- Ук 2006
4. Проблема разработки нормативно – технического обеспечения противоминной деятельности / Логунова Г.Л.; Бигвава В.А.; НИПКИ «Искра». - Луганск, 2006. – 20 с.: ил. - Библиогр.: 5 назв. – Рус.. - Деп. в ГНТБ Украины. 30.10.06, №79 – Ук2006.
5. Некоторые проблемы создания нормативно-технической документации по противоминной деятельности в Украине / Кобзева

И.Н., Логунова Г.Л.; НИПКИ “Искра” – Луганск, 2007. – 10с.: ил. – Библиогр.: 9 назв. - Рус. - Деп. в ГНТБ Украины

6. Landmine Monitor Report. Ukrainian. 2006, <http://icborg/lm/2006/ukrai.ua.html>.
7. Бигвава В.А., Беликов А.С., “Мониторинг минной опасности – одна из составляющих безопасности жизнедеятельности населения Украины”, // матеріали II міжнародної науково – практичної конференції “Безпека життєдіяльності людини як умова сталого розвитку сучасного суспільства” / Придніпровська державна академія будівництва та архітектури / Дніпропетровськ – червень 2007г. – С.216-221.

УДК 004.032.26

И.П. Плисс, С.В. Попов, Т.В. Рыбальченко

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТРЕНД-СЕЗОННЫХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ
ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ С ПОМОЩЬЮ
ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ****Введение**

Задача оперативного, краткосрочного и долгосрочного прогнозирования потребления электрической энергии в настоящее время является предметом интенсивных исследований в электроэнергетике [1-3], а результаты ее решения лежат в основе процессов планирования и управления режимами энергосистем различного уровня. Сложный нелинейный стохастически-хаотический характер временных рядов, описывающих процессы энергопотребления, существенно снижает эффективность традиционных методов статистического анализа и вынуждает обратиться к более изощренным методам интеллектуального анализа данных и, прежде всего, к аппарату искусственных нейронных сетей [4-6].

Следует отметить, что искусственные нейронные сети достаточно широко используются в задачах прогнозирования энергопотребления [7-10], благодаря, прежде всего, своим универсальным аппроксимирующим свойствам. Вместе с тем, подавляющее большинство публикаций по данной проблематике связано с оперативным и краткосрочным прогнозированием, задача же долгосрочного прогнозирования (месяц – квартал – год) изучалась в меньшей степени, хотя, с теоретической точки зрения представляется более интересной, поскольку временные ряды с большими тактами квантования, кроме обычных стохастических компонент, содержат различного рода тренды и колебательные сезонные компоненты.

В общем случае задача прогнозирования нестационарных временных рядов с тренд-сезонной компонентой достаточно часто встречается на практике и, прежде всего, в экономических приложениях [11-17], при этом традиционно предполагается, что

анализируемая последовательность может быть представлена в виде модели

$$y(k) = \sum_{i=0}^p d_i k^i + \sum_{j=1}^m (a_j \cos \omega_j k + b_j \sin \omega_j k) + \xi(k) \quad (1)$$

или, используя оператор сдвига назад z^{-1} ,

$$(1 - z^{-1})^p \prod_{j=1}^m (1 - 2 \cos \omega_j z^{-1} + z^{-2}) y(k) = \xi(k).$$

Здесь p и m – порядок полиномиальной компоненты и количество гармоник в последовательности $y(k)$ соответственно, d_i, a_j, b_j – неизвестные параметры модели, подлежащие оцениванию, $0 < \omega_j = 2\pi f_j T_0 < \pi$ – неизвестные частоты периодических компонент, T_0 – период квантования, $k = 1, 2, \dots, N$ – дискретное время, $\xi(k)$ – стохастическая компонента типа «белого» шума с нулевым математическим ожиданием и ограниченным вторым моментом.

Идентификация параметров модели (1) d_i, a_j, b_j традиционно производится с помощью стандартного метода наименьших квадратов, при этом частоты ω_j полагают известными. Оценивание же частот значительно сложнее, поскольку они входят в описание (1) нелинейно. Если необходимо оценивать и эти параметры, то задача существенно усложняется, особенно, если параметры непредсказуемым образом меняются во времени. В данной работе решается задача оценивания всех нестационарных параметров и построения прогноза последовательности $y(k)$ по данным о ее предыстории.

1. Алгоритм решения задачи

Для решения задачи будем использовать многоэтапную [18-20] нейросетевую [21] модифицированную схему оценивания параметров полигармонических сигналов, которая для рассматриваемой здесь практической ситуации может быть представлена в виде последовательности этапов:

– исключение полиномиального тренда путем $(p+1)$ -кратного взятия разности исходной последовательности $y(k)$ либо вычитания

из $y(k)$ полинома $\sum_{i=0}^p \hat{d}_i k^i$, где \hat{d}_i – оценки, вычисляемые либо в

пакетном режиме с помощью метода наименьших квадратов, либо в процессе обучения искусственной нейронной сети;

- идентификация параметров полигармонической модели

$$\prod_{j=1}^m (1 - 2 \cos \omega_j z^{-1} + z^{-2}) \tilde{y}(k) = \tilde{\xi}(k) \quad (2)$$

либо с помощью метода наименьших квадратов, либо в процессе обучения нейронной сети (здесь $\tilde{y}(k)$ – исходный сигнал с исключенным полиномиальным трендом, $\tilde{\xi}(k)$ – преобразованное с учетом результатов предыдущего этапа стохастическое возмущение);

- нахождение оценок частот $\hat{\omega}_j$ колебательных компонент путем нахождения корней характеристического полинома m -й степени;

– нахождение оценок \hat{a}_j, \hat{b}_j в рамках модели (2) и пересчет их в оценки \hat{a}_j, \hat{b}_j для модели (1);

- дискретное интегрирование (дигрирование) сигнала $\tilde{y}(k)$ и восстановление исходного сигнала $y(k)$;

– построение прогноза $\hat{y}(k+1)$ с помощью специализированной искусственной нейронной сети.

Рассмотрим работу данной схемы для нескольких простых, но достаточно типичных ситуаций. Пусть в (1) $p=0$, то есть прогнозируемая последовательность $y(k)$ колеблется относительно некоторого неизвестного среднего уровня d_0 . Такая ситуация достаточно часто возникает при оперативном и краткосрочном прогнозировании с малыми тактами квантования. Исключить средний уровень можно путем взятия первой разности [11], то есть переходя к временному ряду $\tilde{y}(k)$ такому, что

$$\tilde{y}(k) = \sum_{j=1}^m (\tilde{a}_j \cos \omega_j k + \tilde{b}_j \sin \omega_j k) + \tilde{\xi}(k) \quad (3)$$

или

$$\prod_{j=1}^m (1 - 2 \cos \omega_j z^{-1} + z^{-2}) \tilde{y}(k) = \tilde{\xi}(k), \quad (4)$$

где $\tilde{y}(k) = y(k) - y(k-1)$, $\tilde{\xi}(k) = \xi(k) - \xi(k-1)$.

Между параметрами моделей (1) и (3) существует однозначная связь вида

$$\begin{cases} \tilde{a}_j = a_j(1 - \cos \omega_j) + b_j \sin \omega_j, \\ \tilde{b}_j = b_j(1 - \cos \omega_j) - a_j \sin \omega_j, \end{cases}$$

однако в силу того, что возмущение $\tilde{\xi}(k)$ не является «белым», дисперсия оценок $\hat{\tilde{a}}_j, \hat{\tilde{b}}_j$, полученных с помощью традиционного метода наименьших квадратов, существенно возрастает, что ведет, в свою очередь, к ухудшению качества получаемых прогнозов. В связи с этим следует, по возможности, избегать использования операции взятия разности, а просто вычитать из сигнала $y(k)$ средний уровень, полученный либо с помощью простой рекуррентной процедуры

$$\hat{d}_0(k) = \frac{1}{k} y(k) + \frac{k-1}{k} \hat{d}_0(k-1),$$

либо с помощью экспоненциального сглаживания нулевого порядка [12, 17]

$$\hat{d}_0(k) = \alpha y(k) + (1 - \alpha) \hat{d}_0(k-1),$$

где $0 < \alpha < 1$ – параметр сглаживания, выбираемый, как правило, из эмпирических соображений.

Для исключения полиномиального тренда p -го порядка исходный ряд $y(k)$ должен быть подвергнут операции взятия разности $p+1$ раз так, что дисперсия возмущения $\tilde{\xi}(k)$ может неконтролируемым образом расти. В связи с этим более целесообразно вычитать из $y(k)$ его экспоненциальное среднее p -го порядка, рассчитываемое с помощью достаточно простых рекуррентных соотношений [17]. Операцию же взятия разностей следует использовать в ситуациях с малым уровнем возмущений.

Далее рассмотрим случай, когда в ряде с исключенным полиномиальным трендом присутствует единственная гармоника частоты ω , то есть модель (4) имеет простейшую форму

$$(1 - 2 \cos \omega z^{-1} + z^{-2}) \tilde{y}(k) = \tilde{\xi}(k),$$

$$(1 - 2\beta z^{-1} + z^{-2}) \tilde{y}(k) = \tilde{\xi}(k),$$

$$\tilde{y}(k) = 2\beta \tilde{y}(k-1) - \tilde{y}(k-2) + \tilde{\xi}(k)$$

авторегрессии второго порядка.

Вводя квадратичный критерий идентификации (обучения в терминах нейронных сетей)

$$E_1^N = \sum_{k=1}^N \left(\tilde{y}(k) + \tilde{y}(k-2) - 2\hat{\beta}\tilde{y}(k-1) \right)^2$$

и минимизируя его по $\hat{\beta}$, несложно получить

$$\hat{\beta} = \frac{\sum_{k=3}^N (\tilde{y}(k) + \tilde{y}(k-2))\tilde{y}(k-1)}{2\sum_{k=3}^N \tilde{y}^2(k-1)}, \quad (5)$$

при этом, если $\tilde{y}(k)$ есть p -я разность $y(k)$, то суммирование в (5) начинается с $k = p + 3$.

Далее рассчитывается оценка частоты

$$\hat{\omega} = \arccos \hat{\beta}$$

отфильтрованного сигнала

$$\tilde{y}(k | N) = 2\hat{\beta}\tilde{y}(k-1) - \tilde{y}(k-2)$$

и одношаговый прогноз

$$\hat{\tilde{y}}(N+1) = 2\hat{\beta}\tilde{y}(N) - \tilde{y}(N-1).$$

Для нахождения оценок \hat{a} и \hat{b} вводится дополнительный критерий идентификации-обучения

$$\begin{aligned} E_2^N &= \sum_{k=3}^N \left(\tilde{y}(k) - \hat{a} \cos \hat{\omega}k - \hat{b} \sin \hat{\omega}k \right)^2 = \\ &= \sum_{k=3}^N \left(\tilde{y}(k) - \begin{pmatrix} \hat{a} \\ \hat{b} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \hat{\omega}k \\ \sin \hat{\omega}k \end{pmatrix} \right)^2, \end{aligned} \quad (6)$$

минимизация которого ведет к результату

$$\begin{pmatrix} \hat{a} \\ \hat{b} \end{pmatrix} = \left(\begin{array}{cc} \sum_{k=3}^N \cos^2 \hat{\omega}k & \sum_{k=3}^N \cos \hat{\omega}k \sin \hat{\omega}k \\ \sum_{k=3}^N \cos \hat{\omega}k \sin \hat{\omega}k & \sum_{k=3}^N \sin^2 \hat{\omega}k \end{array} \right)^{-1} \begin{pmatrix} \sum_{k=3}^N \cos \hat{\omega}k \cdot \tilde{y}(k) \\ \sum_{k=3}^N \sin \hat{\omega}k \cdot \tilde{y}(k) \end{pmatrix}. \quad (7)$$

При нейросетевой реализации, вместо использования оценок (7), удобнее минимизировать критерий (6) с помощью рекуррентной экспоненциально взвешенной процедуры обучения [22, 23], обеспечивающей компромисс между фильтрующими и следящими свойствами процесса оценивания. При этом, если ранее по N наблюдениям были получены оценки $\hat{\omega}(N), \hat{a}(N), \hat{b}(N)$, то с приходом $(N+1)$ -го наблюдения $\tilde{y}(N+1)$ производится шаг уточнения с помощью модифицированного алгоритма [21]

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{\beta}(N+1) = \hat{\beta}(N) + r_1^{-1}(N+1) \left(\tilde{y}(N+1) - \tilde{y}(N-1) - 2\hat{\beta}(N)\tilde{y}(N) \right) 2\tilde{y}(N), \\ r_1(N+1) = \alpha r_1(N) + 4\tilde{y}^2(N), 0 \leq \alpha \leq 1, \\ \hat{\omega}(N+1) = \arccos \hat{\beta}(N+1), \\ \begin{pmatrix} \hat{a}(N+1) \\ \hat{b}(N+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{a}(N) \\ \hat{b}(N) \end{pmatrix} + r_2^{-1}(N+1) \left(\tilde{y}(N+1) - \hat{a}(N) \cos \hat{\omega}(N+1)(N+1) - \right. \\ \left. - \hat{b}(N) \sin \hat{\omega}(N+1)(N+1) \right) \begin{pmatrix} \cos \hat{\omega}(N+1)(N+1) \\ \sin \hat{\omega}(N+1)(N+1) \end{pmatrix}, \\ r_2(N+1) = \alpha r_2(N) + 1. \end{array} \right. \quad (8)$$

Рассмотрим далее ситуацию, когда в моделях (3), (4) присутствует не одна, а m колебательных составляющих, например, суточная, недельная и сезонная компоненты. Для этого перепишем (4) в виде

$$\begin{aligned} \tilde{y}(k) &= \sum_{j=0}^{m-1} \beta_{j+1} \left(\tilde{y}(k+j-m) + \tilde{y}(k-j-m) \right) - \tilde{y}(k-2m) + \tilde{\xi}(k) = \\ &= 2\beta_1 \tilde{y}(k-m) + \beta_2 \left(\tilde{y}(k+1-m) + \tilde{y}(k-1-m) \right) + \beta_3 \left(\tilde{y}(k+2-m) + \tilde{y}(k-2-m) \right) + \\ &+ \dots + \beta_m \left(\tilde{y}(k-1) + \tilde{y}(k-2m+1) \right) - \tilde{y}(k-2m) + \tilde{\xi}(k) = \\ &= \beta^T Y(k) - \tilde{y}(k-2m) + \tilde{\xi}(k), \end{aligned}$$

где $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m)^T$ – вектор неизвестных параметров, подлежащих определению, $Y(k) = (2\tilde{y}(k-m), \tilde{y}(k+1-m) + \tilde{y}(k-1-m), \tilde{y}(k+2-m) + \tilde{y}(k-2-m), \dots, \tilde{y}(k-1) + \tilde{y}(k-2m+1))^T$ – $(m+1)$ -вектор предыстории.

Вводя далее критерий идентификации-обучения [24]

$$E_3^N = \sum_{k=2m+1}^N \left(\tilde{y}(k) + \tilde{y}(k-2m) - \hat{\beta}^T Y(k) \right)^2,$$

являющийся обобщением целевой функции E_1^N , можно получить вектор оценок $\hat{\beta}$ с помощью любого из алгоритмов обучения радиально-базисных нейронных сетей [4-6]. Далее вычисляется отфильтрованный полигармонический сигнал

$$\tilde{y}(k|N) = \hat{\beta}^T Y(k) - \tilde{y}(k-2m)$$

и, наконец, одношаговый прогноз

$$\hat{\tilde{y}}(N+1) = \hat{\beta}^T Y(N+1) - \tilde{y}(N-2m+1). \quad (9)$$

Неизвестные частоты ω_j связаны с параметрами β_j соотношением

$$\beta_1 + \sum_{j=1}^{m-1} \beta_{j+1} \cos j\omega = \cos m\omega$$

и с учетом того, что

$$\cos m\omega = \cos^m \omega - C_m^2 \cos^{m-2} \omega \sin^2 \omega + C_m^4 \cos^{m-4} \omega \sin^4 \omega + \dots$$

(здесь $C_m^j = \frac{m!}{j!(m-j)!}$), могут быть найдены путем отыскания m

корней степенного полинома аргумента $\cos \omega$.

Если процессу настройки вектора параметров $\hat{\beta}$ требуется обеспечить как фильтрующие, так и следящие свойства, можно воспользоваться обобщением алгоритма (8), который в этом случае приобретает вид

$$\begin{cases} \hat{\beta}(N+1) = \hat{\beta}(N) + \\ + r_1^{-1}(N+1) (\tilde{y}(N+1) - \tilde{y}(N-2m+1) - \hat{\beta}^T(N)Y(N+1))Y(N+1), \\ r_1(N+1) = \alpha r_1(N) + \|Y(N+1)\|^2 \end{cases} \quad (10)$$

и при $\alpha = 0$ совпадает с используемым в обучении искусственных нейронных сетей алгоритмом Качмажа-Уидроу-Хоффа.

Для построения прогноза в этом случае используется выражение (9), а нахождение оценок частот $\hat{\omega}$ связано с необходимостью решения на каждом шаге настройки уравнения

$$\hat{\beta}_1(N+1) + \sum_{j=1}^{m-1} \hat{\beta}_{j+1}(N+1) \cos j\hat{\omega}(N+1) = \cos m\hat{\omega}(N+1). \quad (11)$$

2. Архитектура искусственной нейронной сети

Развиваемый подход может быть достаточно просто реализован с помощью искусственной нейронной сети с прямой передачей информации, архитектура которой приведена на рис. 1.

Первый слой сети образован p элементами чистого запаздывания z^{-1} ($z^{-1}y(k) = y(k-1)$) так, что на его выходе формируется набор задержанных значений входного сигнала $y(k-1)$, $y(k-2)$, ..., $y(k-p)$. Второй скрытый слой – слой вычисления разностей предназначен для удаления из входного сигнала полиномиального

тренда p -й степени и образован элементами взятия разности с передаточной функцией

$$G_{DIF}(z) = 1 - z^{-1}.$$

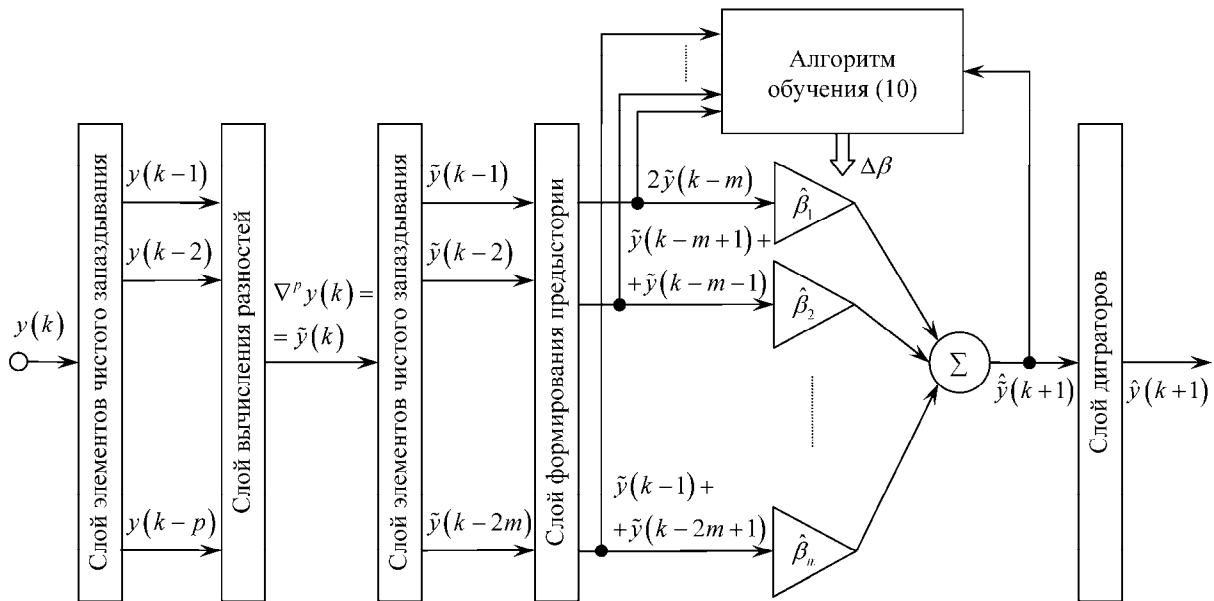


Рисунок 1 – Искусственная нейронная сеть для прогнозирования тренд-сезонных временных рядов

Схема такого элемента крайне проста и приведена на рис. 2.

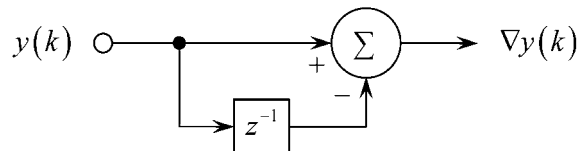


Рисунок 2 – Элемент взятия разности

Выходом этого слоя является p -я разность исходного ряда $\nabla^p y(k) = \tilde{y}(k)$, содержащая только гармонические компоненты и, возможно, случайное возмущение, присутствующее в модели (1).

Третий скрытый слой по структуре полностью аналогичен первому и содержит $2m$ элементов чистого запаздывания z^{-1} . На его выходе формируется набор задержанных значений $\tilde{y}(k-1)$, $\tilde{y}(k-2)$, ..., $\tilde{y}(k-2m)$.

Четвертый скрытый слой – слой формирования вектора предыстории $Y(k)$ – образован набором сумматоров, и на его выходе появляется набор $2\tilde{y}(k-m)$, $\tilde{y}(k-m+1) + \tilde{y}(k-m-1)$, ..., $\tilde{y}(k-1) + \tilde{y}(k-2m+1)$, который подается на пятый скрытый слой, образованный адаптивным линейным ассоциатором с настраиваемыми

синаптическими весами $\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_m$, уточнение которых производится с помощью алгоритма обучения (10). На выходе этого слоя формируется одношаговый прогноз полигармонической компоненты $\hat{y}(k+1)$.

И, наконец, выходной слой диграторов образован последовательно включенными элементами с передаточной функцией

$$G_{DIG}(z) = \frac{1}{1-z^{-1}},$$

с помощью которых формируется прогноз исходного ряда $\hat{y}(k+1)$. Схема элементарного дигратора приведена на рис. 3.

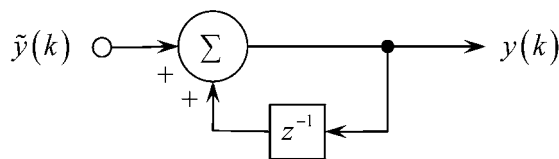


Рисунок 3 – Цифровой интегратор – дигратор

Рассматриваемая сеть предназначена для работы в последовательном режиме, обрабатывая информацию по мере ее поступления. Поэтому в ней не предусмотрен режим восстановления частот ω_j , требующий решения на каждом шаге уравнения (11).

Выводы

Рассмотрена и решена задача прогнозирования временных рядов, содержащих полиномиальный тренд и полигармоническую компоненту, возникающая в системах планирования и управления потреблением электрической энергии. Алгоритм решения предназначен для работы в последовательном режиме поступления данных, а его нейросетевая реализация позволяет повысить быстродействие за счет распараллеливания вычислений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шумилова Г.П., Готман Н.Э., Старцева Т.Б. Краткосрочное прогнозирование электрических нагрузок с использованием искусственных нейронных сетей // Электричество. – 1999. – N. 10. – С. 6-12.
2. Ткаченко Р.О., Павлюк О.М. Прогнозування споживання електричної енергії у Львівській області за допомогою штучних нейронних мереж // Вісник НУ «Львівська політехніка». Комп'ютерна інженерія та інформаційні технології. – 2002. – 450. – С. 76-80.
3. Бардачев Ю.Н., Гринавцев О.В., Литвиненко В.И., Фефелов А.А. Синтез и анализ работы нечетких нейронных сетей с помощью

- иммунных алгоритмов при прогнозировании электрической нагрузки // Моделивання та керування станом еколого-економічних систем регіону. – 2006. – 3. – С. 47-68.
4. Cichocki A., Unbehauen R. Neural Networks for Optimization and Signal Processing. – Stuttgart: Teubner, 1993. – 526 p.
 5. Pham D.T., Liu X. Neural Networks for Identification, Prediction and Control. – London: Springer, 1995. – 238 p.
 6. Scherer A. Neuronale Netze. Grundlagen und Anwendungen. – Braunschweig/Wiesbaden: Friedrich Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 1997. – 249 S.
 7. Piras A., Germond A., Buchenel B., Imhof K., Jaccard Y. Heterogeneous artificial neural network for short term electrical load forecasting // IEEE Trans. Power Systems. – 1996. – 11. – N. 2. – P. 397-402.
 8. Tzafestas S., Tzafestas E. Computational intelligence techniques for short-term electric load forecasting // Journal of Intelligent and Robotic Systems. – 2001. – 31. – P. 7-68.
 9. Ling S.H., Leung F.H.F., Lam H.K., Tam P.K.S. Short-term electric load forecasting based on a neural fuzzy network // IEEE Trans. Industrial Electronics. – 2003. – 50. – N. 6. – P. 1305-1316.
 10. Bodyanskiy Y., Popov S., Rybalchenko T. Multilayer neuro-fuzzy network for short term electric load forecasting // Lecture Notes in Computer Science – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. – 5010. – P. 339-348.
 11. Бокс Д., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. – М.: Мир, 1974. – 406 с.
 12. Чуев Ю.В., Михайлов Ю.Б., Кузьмин В.И. Прогнозирование количественных характеристик процессов. – М.: Советское радио, 1975. – 400 с.
 13. Кобринский Н.Е. Информационные фильтры в экономике. – М.: Статистика, 1978. – 287 с.
 14. Бриллинджер Д. Временные ряды. Обработка данных и теория. – М.: Мир, 1980. – 536 с.
 15. Кашьяп Р.Л., Рао А.Р. Построение динамических стохастических моделей по экспериментальным данным. – М.: Наука, 1983. – 384 с.
 16. Льюис К.Д. Методы прогнозирования экономических показателей. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 133 с.
 17. Montgomery D.C., Johnson L.A., Gardiner J.S. Forecasting and Time Series Analysis. – New York: McGraw-Hill, Inc., 1990. – 384 p.
 18. Ивахненко А.Г., Мюллер Й.А. Самоорганизация прогнозирующих моделей. – К.: Техніка, 1985. – 223 с.
 19. Юрачковский Ю.П., Попков Н.В. Оценивание параметров в алгоритмах МГУА моделирования полигармонических процессов и полей // Автоматика. – 1986. – N. 6. – С. 9-16.
 20. Shelekhova V.Y. Harmonic algorithm GMDH for large data volume // Systems Analysis Modelling Simulation. – 1995. – 20. – N. 1-2. – P. 117-126.

21. Бодянский Е., Воробьев С., Костюк О., Любчик Л. Фильтрация и прогнозирование тренд-сезонных временных рядов на основе искусственных нейронных сетей // Радиоэлектроника и информатика. – 1998. – № 3. – С. 76-83.
22. Бодянский Е.В., Плисс И.П., Соловьева Т.В. Многошаговые оптимальные упредители многомерных нестационарных стохастических процессов // Доклады АН УССР. – 1986. – Сер. А. – № 12. – С. 47-49.
23. Бодянский Е.В., Плисс И.П., Соловьева Т.В. Синтез квазипрямых адаптивных регуляторов // Доклады АН УССР. – 1987. – Сер. А. – № 1. – С. 59-61.
24. Бодянский Е.В., Воробьев С.А., Плисс И.П. Адаптивная диагностика динамического объекта с периодическим выходным сигналом // Праці 3-ї Української конференції з автоматичного керування “Автоматика-96”. – Севастополь, 1996. – 1. – С. 58-59.

СОДЕРЖАНИЕ

Системне моделювання технологічних процесів

П.П. Белоножко

Представление деформируемых упругих элементов космических аппаратов системами твердых тел3

М.Н. Бойко, Д.А. Ковалев, Н.Д. Ванюкова

Комплексное исследование влияния основности, температуры обжига, глиноземистого и магнезиального индексов на качество окатышей 17

А.А. Фоков

Передаточные функции распределенного упругого периферийного элемента в составе ка в задаче определения параметров его механического эквивалента 27

Л.Х.Иванова, Е.В.Колотило, И.В.Ивонин

Системный подход к разработке технологии литья валков из комплексномодифицированных чугунов..... 37

Л.Х.Иванова, Е.В.Колотило

Системный подход к разработке технологии литья чугунных валков с использованием шлаков 44

А. П. Иванова, П.И. Штыцко

Совершенствование приводного механизма рабочей клетки станов ХПТ 50

А.К. Керимов

Гидравлика тонкослойного отстойника 57

В.А. Марунич, А.Ю. Яриз

Исследование и разработка технологии обработки с активным контролем диэлектрических покрытий нежестких металлических изделий 62

В.Д.Вернигора

Определение коэффициента массоотдачи процесса отделения масел и остатков СОЖ от твердых частиц 74

Х.А. Аскеров, А.Д. Ахмедов

Исследование структуры и механических свойств малоперлитной строительной стали 09Г2ФБ после термического упрочнения 82

Х.А. Аскеров

Некоторые особенности растворимости карбидной фазы в строительных сталях 09Г2ФБ и 10Г2ФБ при термомеханической обработки 87

В.Т. Калинин, Л.А. Шапран, Л.Х. Иванова, А.А. Кондрат

Ликвационные процессы в модифицированных Fe-C расплавах при литье роликов и валков92

В.О. Яковенко

Математичне моделювання мікрохвильового сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів.....99

Системні технології обробки інформації

Є.О. Матрос, П.І. Бідюк

Системи підтримки прийняття рішень при роздрібному кредитуванні фізичних осіб 106

А.С. Краевой

Об одном методе построения системы моделирования децентрализованных вычислительных систем 116

Н.Г. Мороз

Цифровой метод обработки спектрометрической информации в ядерной физике 127

А.Н. Давидчик

О приближении операторами джексона и коровкина 132

И.Н. Кобзева, Г.Л. Логунова, В.А. Бигвава

Проблемы создания национальных стандартов по противоминной деятельности в рамках формирования системы гуманитарного разминирования в Украине..... 137

И.П. Плисс, С.В. Попов, Т.В. Рыбальченко

Прогнозирование тренд-сезонных временных рядов потребления электрической энергии с помощью искусственных нейронных сетей 150

РЕФЕРАТЫ

УДК 539.3 + 629.7

Белоножко П.П. **Представление деформируемых упругих элементов космических аппаратов системами твердых тел** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 5 (58). – Дніпропетровськ, 2008. – С.3-16.

Моделювання динаміки пружних просторово розвинених периферійних елементів космічних апаратів – задача, що є актуальною у зв'язку з інтенсивним розвитком супутників даного класу. Важливим етапом її вирішення є вибір розрахункової схеми периферійного елемента.

У роботі викладений оригінальний підхід до зіставлення розрахункових схем з розподіленими (у вигляді пружної балки) та зосередженими (у вигляді ланцюга тіл) параметрами, сформульовано критерій динамічної еквівалентності.

УДК 622.788

Бойко М.М., Ковальов Д.А., Ванюкова Н.Д. **Комплексне дослідження впливу основності, температури обпалу, глиноземістого і магнезіального індексів на якість обкотишів** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 5 (58). – Дніпропетровськ, 2008. – С.17-26.

На підставі експериментальних даних розроблена математична модель для розрахунку міцності обкотишів при зміні відношень CaO/SiO_2 , $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$, MgO/SiO_2 і температури обпалу. Аналіз процесу з використанням математичної моделі показав, що максимальна міцність обкотишів досягається при $\text{MgO}/\text{SiO}_2 - 0,23-0,28$ і основності $0,55-0,65$. При цьому зміна $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ з $0,25$ до $0,4$ знижує міцність, а збільшення температури обпалу з 1230 до 1280 °С сприяє підвищенню міцності.

УДК 539.3 + 629.7

Фоков А.А. **Передаточные функции распределенного упругого периферийного элемента в составе КА в задаче определения параметров его механического эквивалента** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 5 (58). – Дніпропетровськ, 2008. – С.27-36.

Отримано співвідношення для передаточних функцій розподіленого пружного елемента у вигляді протяжної пружної балки. Співвідношення необхідні при використанні заснованого на застосуванні апарата передаточних функцій методу визначення характеристик механічного об'єкта із зосередженими параметрами, що еквівалентний по динамічних властивостях вихідному розподіленому пружному елементу в складі КА. Дано трактування критерію еквівалентності, застосовуваного в методі суперелемента, з погляду зіставлення передаточних функцій розподіленого пружного елемента і його механічного еквівалента.

УДК 621.74.002.6:669.131.7

Иванова Л.Х., Колотило Е.В., Ивонин И.В. **Системный подход к разработке технологии литья валков из комплексномодифицированных чугунов** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 5 (58). – Дніпропетровськ, 2008. – С.37-43.

УДК 621.74

Иванова Л.Х., Колотило Е.В. **Системный подход к разработке технологии литья чугунных валков с использованием шлаков** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 5 (58). – Дніпропетровськ, 2008. – С.44-49.

УДК 621.771

Иванова Г. П., Штицко П. І. **Удосконалення приводного механізму робочої кліті стану ХПТ** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 5 (58). – Дніпропетровськ, 2008. – С.50-56.

На основі аналізу структурної схеми визначена кількість надлишкових зв'язків у приводному механізмі робочої кліті. Описаний спосіб усунення надлишкових зв'язків шляхом аналізу рухомостей в кінематичних з'єднаннях. Запропоновані дві схеми самоустанавлюючого приводного механізму без надлишкових зв'язків.

Бібл. 4, іл 3.

УДК 628.543

Керимов А.К. **Гидравлика тонкослойного отстойника** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 5 (58). – Дніпропетровськ, 2008. – С.57-61.

УДК 620.179

Марунич В.О., Яріз Г.Ю. **Дослідження та розробка технології обробки з активним контролем діелектричних покриттів нежорстких металевих виробів** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 5 (58). – Дніпропетровськ, 2008. – С.62-73.

Розглядаються існуючі способи неруйнуючого активного контролю товщини діелектричних покриттів на металевих виробах, найбільш раціональним з яких визнано вихротоковий неруйнуючий спосіб контролю. На його базі запропонований спосіб обробки діелектричних покриттів на великогабаритних нежорстких виробах із застосуванням активного контролю товщини покриття, реалізований за допомогою пристрою для обробки діелектричних покриттів металевих виробів. Визначена залежність ефективного використання способу від діаметра ріжучого інструмента та від конструктивних параметрів вихротокового датчика активного контролю.

Бібл. 5, іл. 4.

УДК 532.72.001.572

Вернигора В.Д. **Визначення коефіцієнта масопередачі процесу відділення мастила і залишків ЗОР від твердих часток** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 5 (58). – Дніпропетровськ, 2008. – С.74-81.

Наведена в статті методика дозволяє визначити коефіцієнт масопередачі процесу відділення мастила і залишків ЗОР від твердих часток шламу абразивної обробки металів.

Бібл. 9, іл. 3.

УДК 620.17

Аскеров Х.А., Ахмедов А.Д. **Исследование структуры и механических свойств малоперлитной строительной стали 09Г2ФБ после термического упрочнения** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 5 (58). – Дніпропетровськ, 2008. – С.82-86.

УДК 620.17

Аскеров Х.А. **Некоторые особенности растворимости карбидной фазы в строительных сталях 09Г2ФБ и 10Г2ФБ при термомеханической обработки** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 5 (58). – Дніпропетровськ, 2008. – С.87-91.

УДК 620.18

Калінін В.Т., Шапран Л.А., Іванова Л.Х., Кондрат О.О. **Ликвационные процессы в модифицированных Fe-C расплавах при литье роликов и валков** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 5 (58). – Дніпропетровськ, 2008. – С.92-98.

Наведено термодинамічний розрахунок і моделювання залежності величини седиментаційної стійкості дисперсних добавок в об'ємі ковша від розміру часток. Показано, що мінімальна товщина шару Fe-C розплаву, в якому частки модифікатору розподіляються рівномірно, складає 1,0...2,5 м. Наводяться дані по тривалості ефекту модифікації. Показана ефективність обробки Fe-C розплавів нанодисперсними добавками.

УДК 536.24

Яковенко В.А. **Математическое моделирование микроволновой сушки коллоидных капиллярно-пористых материалов** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 5 (58). – Дніпропетровськ, 2008. – С.99-105.

Построена математическая модель процесса нагревания и сушки коллоидных капиллярно-пористых материалов под действием энергии микроволнового электромагнитного поля с учетом фазовых превращений. Решение сформулированной задачи позволяет решить проблему проектирования оптимальных рабочих камер и моделирования процессов нагревания и сушки в микроволновом электромагнитном поле с учетом закона движения границы сухой зоны.

Библ. 8.

УДК 519-86

Матрос Є.О., Бідюк П.І. **Системы поддержки принятия решений при розничном кредитовании физических лиц** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 5 (58). – Дніпропетровськ, 2008. – С.106-115.

В статье предложен системный подход к созданию СППР для эффективного сопровождения розничного кредитования. Предложенная СППР состоит из следующих блоков – блок оценки кредитоспособности заемщика, хранилище данных, блок взыскания проблемной задолженности, блок постройки скоринговой модели, блок отчетности и анализа портфеля. В статье описан принцип взаимодействия блоков для всех этапов кредитования и детально рассмотрен функционал данных блоков. Предложенная СППР включает функционалы и модель взаимодействия, которые есть новейшими как для украинских так и для международных банков.

УДК 004.057.4+004.724

Краевой А.С. **Об одном методе построения системы моделирования децентрализованных вычислительных систем** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 5 (58). – Дніпропетровськ, 2008. – С.116-126.

У статті проводиться виділення типових завдань, пов'язаних з розробкою системи моделювання децентралізованих обчислювальних середовищ і опис авторських рішень деяких з цих завдань. На практичних прикладах показані вимоги до системи моделювання: близькість до реального середовища виконання, можливість повторного використання, відкритість до змін. Ці вимоги забезпечуються порівневою декомпозицією служб: зберігання даних, маршрутизації пошукових запитів, знаходження об'єктів, передачі віддалених повідомлень. Додатково в роботі приводиться короткий аналіз наразі актуальних програмних продуктів-аналогів і можливих стандартів, що вважають таку декомпозицію важливим методом побудови системи моделювання. В заключній частині розглядаються деталі реалізації і переваги системи: реалізація базових методів аналізу складних мереж, краща реалізація служби віддалених викликів.

УДК 621-31

Мороз М.Г. **Цифровий метод обробки спектрометричної інформації в ядерній фізиці** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 5 (58). – Дніпропетровськ, 2008. – С.127-131.

Запропонований алгоритм роботи програмного забезпечення для спектрометра іонізуючих випромінювань, виконаного на базі цифрового сигнального процесора (ЦСП) TMS320F2812. Показано, що можлива програмна реалізація функцій спектрометра, реалізованого на основі ЦСП, що дозволяє понизити апаратні витрати і зменшити енергоспоживання.

Бібл. 2, рис. 5.

Давидчик А.Н. **О приближении операторами джексона и коровкина** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 5 (58). – Дніпропетровськ, 2008. – С.132-136.

У даній роботі розглянуті питання наближення періодичних функцій операторами Джексона і Коровкіна. Отримані асимптотичні точні оцінки.

УДК 621-31

Кобзєва І.М., Логунова Г.Л., Бігвава В.А. **Проблеми створення національних стандартів з протимінної діяльності в рамках формування системи гуманітарного розмінування в Україні** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 5 (58). – Дніпропетровськ, 2008. – С.137-149.

Розглянуті складові системи гуманітарного розмінування в Україні. В рамках створення цієї системи розкрита проблема створення національних стандартів протимінної діяльності, принципи їх розробки і застосування.

Бібл. 7.

УДК 004.032.26

Пліс І.П., Попов С.В., Рибальченко Т.В. **Прогнозування тренд-сезонних часових рядів споживання електричної енергії за допомогою штучних нейронних мереж** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 5 (58). – Дніпропетровськ, 2008. – С.150-160.

Розглянуто і вирішено задачу прогнозування часових рядів, які містять поліноміальний тренд та полігармонійну компоненту, що виникає в системах планування та керування споживанням електричної енергії. Алгоритм розв'язання призначений для роботи у послідовному режимі, а його нейромережева реалізація дозволяє підвищити швидкодію за рахунок розпаралелювання обчислень.

Бібл. 24, іл. 3.

UDC 539.3 + 629.7

Belonozhko P.P. **Представление деформируемых упругих элементов космических аппаратов системами твердых тел** // System Technologies. – N 5(58) – Dnipropetrovsk, 2008. – P.3-16.

Modelling dynamics of elastic spacely developed peripheral elements of spacecrafts is a problem, actual in connection with intensive evolution of satellites of the given class. The important stage of its solution is choice of an analytical model of a peripheral element.

The original approach to comparison of an analytical models with distributed (a spring beam) and lumped (a circuit of bodies) parameters is proposed, criterion of dynamic equivalence is formulated in thus work.

UDC 622.788

Boyko M.M., Kovalev D.A., Vanyukova N.D. **Complex research of the influence basility CaO/SiO_2 , temperature of burning, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ and MgO/SiO_2 indexes on pellets quality** // System Technologies. – N 5(58) – Dnipropetrovsk, 2008. – P.17-26.

The mathematical model was designed on the grounds of experimental data for calculation of pellets strength when change basility CaO/SiO_2 , $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ and MgO/SiO_2 indexes, and burning temperature. The analysis of the process has shown that maximum strength of pellets is reached at MgO/SiO_2 - 0,23-0,28 and basility - 0,55-0,65. Change $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ index from 0,25 to 0,4 reduces strengths. The burning temperature from 1230 to 1280 °C raises strength of pellets.

UDC 539.3 + 629.7

Fokov A.A. **Передаточные функции распределенного упругого периферийного элемента в составе ка в задаче определения параметров его механического эквивалента** // System Technologies. – N 5(58) – Dnipropetrovsk, 2008. – P.27-36.

The expressions for transfer functions of a distributed elastic element in the form of an extended elastic beam are received. The expressions are necessary at use in characteristics determination method for mechanical object with lumped parameters based on transfer functions apparatus application. It is supposed, that the mechanical object is equivalent on dynamic properties to the initial distributed elastic element consisting of a spacecraft. The interpretation of criterion of the equivalence applied in a method of a superelement, based on comparison of transfer functions of the distributed elastic element and its mechanical equivalent is given.

UDC 621.74.002.6:669.131.7

Ivanova L.H., Kolotilo E.V., Ivonin I.V. **Системный подход к разработке технологии литья валков из комплексномодифицированных чугунов** // System Technologies. – N 5(58) – Dnipropetrovsk, 2008. – P.37-43.

UDC 621.74

Ivanova L.H., Kolotilo E.V. **Системный подход к разработке технологии литья чугунных валков с использованием шлаков** // System Technologies. – N 5(58) – Dnipropetrovsk, 2008. – P.44-49.

UDK 621.771

Ivanova A.P., Stytsko H. I. **Perfection of drive mechanism of working cage of the Cold Rolling of Pipes (CRP)** // System technologies.- N 5(58). - Dnepropetrovsk, 2008. - P.50-56.

On the basis of analysis of flow diagram the amount of surplus communications in the drive mechanism of working cage is certain. The method of removals of surplus communications by the analysis of mobility in kinematics connections is described. Two charts of the selfset drive mechanism without surplus communications are offered.

Bibl. 4, ill. 3.

UDC 628.543

Kerimov A.K. **Гидравлика тонкослойного отстойника** // System technologies.- N 5(58). - Dnepropetrovsk, 2008. – P.57-61.

The determinative defining degree of use of working volume тонкослойного of a sediment bowl is the movement mode in distribute-le water stream with variable weight, formation which is in dependence from constructive and hydraulic parametres of a construction. The known constructive it is solved вoраспределения in similar otstojni-kah will not be co-ordinated with hydraulics laws. For the fullest use of working volume тонкослойного a sediment bowl the top edges of parallel plates in its longitudinal section should settle down on a curve, the calculated weight. Received analiti-cheskaja dependence is applicable for all constructive kinds of tonkosloj th sediment bowls.

UDK 620.179

Marunich V.A., Yariz A.JU. **Research and development of technology of processing with the active control of dielectric coverings of no rigid metal products** // System technologies.- N 5(58). - Dnepropetrovsk, 2008. – P.62-73.

Existing ways of not destroying active control of thickness of dielectric coverings on metal products are considered, by most rational of which is recognized a way of the control of vortical currents. On its base the way of processing of dielectric coverings on large-sized no rigid products with application of the active control of thickness of the covering, realized by means of the device for processing dielectric coverings of metal products is offered.

Dependence of an effective using of a way on diameter of the cutting tool and on design data the gauge of vortical currents of the active control is certain.

Bibl. 5, ill. 4.

UDC 532.72.001.572

Vernigora V.D. **Determination of mass transfer coefficient process of oil separation and remainder of Lubricate Cooling Liquids (LCL) from hard particles** // System technologies. - N 5(58). - Dnepropetrovsk, 2008. – P.74-81.

Given in the article methods allow determining the coefficient of separation and remainders of LCL from hard slime particles of abrasive metal treatment.

Bibl. 9, ill. 3.

UDC 620.17

Askerov H.A., Ahmedov A.D. **Исследование структуры и механических свойств малоперлитной строительной стали 09Г2ФБ после термического упрочнения** // System technologies. - N 5(58). - Dnepropetrovsk, 2008. – P.82-86.

UDC 620.17

Askerov H.A. **Некоторые особенности растворимости карбидной фазы в строительных сталях 09Г2ФБ и 10Г2ФБ при термомеханической обработки** // System technologies. - N 5(58). - Dnepropetrovsk, 2008. – P.87-91.

UDC 620.18

Kalinin V.T., Sharlan L.A., Ivanova L.H., Kondrat A.A. **Features of processes of lykvatsyy of refractory nano materials at the retrofitting iron - carbon alloys** // System technologies. - N 5(58). - Dnepropetrovsk, 2008. – P.92-98.

A thermodynamics calculation and design of dependence value of sedimentation firmness of dispersion additions in the volume of scoop from the value of particles is resulted. It is shown, that the minimum thickness of layer of Fe-C fusion in which portions of modifier are distributed evenly makes 1,0...2,5 m. Data on duration of effect of modification are cited. Efficiency of treatment Fe-C fusions by nanoadditions is shown.

UDC 536.24

Yakovenko V.A. **Mathematical model operation of the colloid cappillary-porous materials' microwave drying** // System technologies. - N 5(58). - Dnepropetrovsk, 2008. – P.99-105.

The mathematical model of the colloid cappillary-porous materials' heating and drying processes under activity of microwave electromagnetic field energy in view of phase changes is constructed. The solution of the formulated problem allows to solve a problem of designing of optimum working cabinets and model operations of heating and drying processes in a microwave electromagnetic field in view of the law of a boundary's motion of a dry area.

Lit. 8.

UDC 519-86

Matros E.O., Biduk P.I. **Decision support systems for retail lending** // System technologies.- N 5(58). - Dnepropetrovsk, 2008. – P.106-115.

The article proposes system approach for creation decision support systems for retail lending. Proposed DSS consist of next parts – creditworthiness estimation block, datawarehouse, collection block, scoring model building block, MIS block. The article shows principle of interaction of proposed parts for all stages of lending and detail descriptions of functionality of blocks. Proposed DSS include functionalities end model of interaction, which are latest both for Ukrainian and international banks

UDC 004.057.4+004.724

Kraevoy A.C. **Об одном методе построения системы моделирования децентрализованных вычислительных систем** // System technologies.- N 5(58). - Dnepropetrovsk, 2008. – P.116-126.

The paper features a survey of common tasks related to development of decentralized computing environment simulation system, and contains original solutions for some of the tasks. Requirements are reasoned by practical examples: ease of code reuse, openness to change, similarity to real production environment. The above requirements are satisfied by n-tier decomposition of service components: data storage, query routing, object location and remote procedure calls (RPC). Also the paper contains brief analysis of current similar software products and possible standards assuming such decomposition as an essential method for building a simulation system. The paper concludes with implementation details and competitive advantages: basic complex network metrics and more robust RPC service.

UDC 621-31

Moroz N. **Digital method of treatment of spectrometry information in nuclear physics** // System Technologies. – N 5(58) – Dnipropetrovsk, 2008. – P.127-131.

There is offered software work algorithm for the spectrometer of ionizing radiations, built on the base of digital signal processor (DSP) TMS320F2812. It is revealed that is possible to software implementation of the spectrometer functions on the basis of DSP that allows to reduce instrument expenses and to decrease the power consumption.

Bibl. 2, fig. 5.

Davidchik A.N. **About approximation of periodic functions with operators of Jackson and Korovkin** // System Technologies. – N 5(58) – Dnipropetrovsk, 2008. – P.132-136.

Given article approximation of periodic functions by positive linear operators Jackson and Korovkin.

$$\text{Let, } L_n(f) = \frac{1}{2} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) dt + f \cdot v_n, \text{ and } v_n(t) = \frac{1}{2} + \sum_{k=1}^n \rho_k^n \cos kt$$

Theorem. Suppose that $f \in W_p^r(\delta)$. Then $\chi\left(D_n, \frac{\gamma}{n}\right) = 1 + \frac{3}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} Q\left(\frac{k\gamma}{4}\right) + o\left(\frac{1}{n}\right)$

UDC (083.74)

Kobzeva I. N., Logunova G. L., Bigvava V. A. **The problems of formation of the national standards for demining operations in the framework of creation of the Ukrainian humanitarian mine clearance system** // System Technologies. – N 5(58) – Dnipropetrovsk, 2008. – P.137-149.

There were considered the compounds of the humanitarian mine clearance system in Ukraine. In the framework of this system there were elucidated the problem of formation of national standards for demining operations and the principles of their development and use.

Bibl. 7

UDC 004.032.26

Pliss I.P., Popov S.V., Rybalchenko T.V. **Forecasting of trend-seasonal electric load time series using artificial neural networks** // System Technologies. – N 5(58) – Dnipropetrovsk, 2008. – P.150-160.

The problem of forecasting of time series containing polynomial trend and polyharmonic component is considered that arises in electric energy consumption planning and management systems. The solution algorithm is intended to work in sequential mode, and its neural network implementation allows to increase processing rate by parallelizing calculations.

Ref. 24, fig. 3.

АВТОРЫ ВЫПУСКА

Аскеров Х.А. - к.т.н., доцент, Азербайджанский архитектурно-строительный университет.

Ахмедов А.Д. - к.т.н., доцент, Азербайджанский архитектурно-строительный университет.

Белоножко Павел Петрович - к.т.н., старший научный сотрудник, Институт технической механики НАНУ и НКАУ, Днепропетровск.

Бойко Максим Николаевич – аспирант кафедры металлургии чугуна, НМетАУ.

Ванюкова Наталья Дмитриевна - д.т.н, профессор кафедры металлургии чугуна, НМетАУ.

Вернигора Виктор Дмитриевич - старший преподаватель кафедры ОТБЖ ДГТУ.

Давидчик А.Н. - Днепродзержинский государственный технический университет, г. Днепродзержинск.

Иванова Людмила Харитоновна - д.т.н., профессор каф. Литейного производства НМетАУ.

Иванова Ганна Павлівна - к.т.н., доцент кафедры будівельної механіки Національної металургійної академії України, м. Дніпропетровськ.

Калинин Василий Тимофеевич - д.т.н., профессор кафедры литейного производства НМетАУ.

Калинин Василий Тимофеевич - д.т.н., профессор, каф. литейного производства НМетАУ.

Керимов А.К. – аспирант, Азербайджанский Архитектурно-Строительный Университет.

Кобзєва Ірина Миколаївна - науковий співробітник, Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут "Іскра" Міністерства освіти і науки України.

Ковалев Дмитрий Арсеньевич – д.т.н, профессор кафедры металлургии чугуна, НМетАУ.

Кондрат Александра Александровна - аспирант каф. литейного производства НМетАУ.

Кондрат Александра Александровна - аспирант кафедры литейного производства НМетАУ.

Плисс Ирина Павловна - к.т.н., старший научный сотрудник. Харьковский национальный университет радиоэлектроники, ведущий научный сотрудник Проблемной научно-исследовательской лаборатории автоматизированных систем управления.

Попов Сергей Витальевич - к.т.н., старший научный сотрудник. Харьковский национальный университет радиоэлектроники, старший научный сотрудник Проблемной научно-исследовательской лаборатории автоматизированных систем управления.

Рыбальченко Тарас Вячеславович - 000 «Хартэп», заместитель технического директора.

Шапран Людмила Александровна - ст. преподав. каф. литейного производства НМетАУ.

Штицько Павло Іванович - к.т.н., доцент кафедри прикладної механіки Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту.