

Хейн Вин Зо
Win Zaw Hein

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РОТАЦИОННОГО ОБЖИМА ТРУБ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

MODELING OF ROTARY CRIMP TUBE FOR MANUFACTURING OF AIRCRAFT PARTS



Хейн Вин Зо – кандидат технических наук, профессор кафедры «Технология производства летательных аппаратов» Российского государственного технологического университета им. К. Э. Циолковского (Россия, Москва); 121552, Москва, ул. Оршанская, д. 3; 89853101319. E-mail: taryar4ever@gmail.com.

Mr. Hein Win Zaw – PhD in Engineering, Department «Technology of production of aircraft» of Russian K. E. Tsiolkovsky State Technological University (Russia, Moscow); 121552, Moscow, 3, Orshanskaya av.; 89853101319.

E-mail: taryar4ever@gmail.com.

Аннотация. В работе проведен анализ методов изготовления деталей гидрогазовых систем летательных аппаратов, проведено моделирование процесса ротационного обжима концевой участка трубной заготовки с помощью осевых и радиальных усилий.

Summary. The article analysis of methods of manufacturing parts hydraulic and gas systems of aircraft, simulated the process of crimping the end portion of the rotary tube blank by means of axial and radial forces.

Ключевые слова: трубные заготовки, ротационный обжим, очаг деформаций, момент внешних сил, радиальные усилия, ролики.

Key words: round billets, rotary crimping, deformation zone, moment of the external forces, radial forces, rollers.

УДК 621.7.04

При производстве авиационной и ракетно-космической техники широко распространены процессы листовой штамповки. До 70 % деталей летательных аппаратов получают именно этими методами. Листовая штамповка имеет целый ряд преимуществ, к которым относятся относительно невысокая трудоемкость изготовления изделий (и, как следствие, малая себестоимость деталей), большая производительность при сравнительно небольших потерях материала заготовки (и, как следствие, высокий коэффициент использования материала). Также к преимуществам можно отнести благоприятные условия для механизации и автоматизации процессов. Изделия, получаемые методом листовой штамповки, отличаются высокими точностными параметрами, малой шероховатостью и т.д.

В производстве гидрогазовых систем современных летательных аппаратов используются тонкостенные конструкции, получаемые из трубных заготовок. К таким деталям относятся баллоны, обтекатели, корпусные детали с криволинейной образующей, переходники, сильфоны, компенсаторы, тяги управления, а также детали внутреннего набора гидрогазовых систем.

Методы изготовления деталей зависят от их формы, функционального назначения, материала заготовки, геометрических параметров, а также программы выпуска. К подобным методам относятся формообразование трубных заготовок методом раздачи и обжима; вытяжка, формовка и гибка листового материала и т.д. Недостатками данных процессов является

то, что в случае процесса раздачи возможно разрушение заготовки в зоне максимального утонения, в случае обжима возможна потеря устойчивости. Кроме того, в связи с применением высокопрочных материалов с низкой пластичностью традиционные технологии не позволяют получить детали с высокими качественными показателями, а сами процессы имеют низкую степень экономической эффективности.

Таким образом, проблема повышения качества тесно связана с экономической эффективностью производства и может быть решена за счет разработки новых и совершенствования существующих технологических процессов. Это, в свою очередь, требует совершенствования существующих расчетных методов для получения данных о внутренних напряжениях и деформациях, возникающих в процессе формоизменения заготовок. Поиск следует вести в направлении уменьшения усилий деформации, изменения конструкции оснастки, в сторону упрощения, расширения номенклатуры применяемых материалов.

В данном направлении можно выделить применение методов формообразования с учетом локального деформирования, среди которых хорошо себя зарекомендовали методы ротационного формообразования, имеющие целый ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами: получение большей степени деформации, снижение потери устойчивости, уменьшение разрушений. Данные преимущества достигаются за счет повышения пластичности материала под действием сжимающих напряжений.

Процесс ротационного обжима осуществляется в следующей последовательности (см. рис. 1). Вращающаяся трубчатая заготовка 1 по оси подается в имеющийся профилированный зазор между оправкой 2 и давящим роликом 3. Вращение обеспечивается оправкой 2. Осевое перемещение происходит за счет отклонения оси вращения трубчатой заготовки на угол α от оси вращения оправки (рис. 2). Сила P обеспечивает упругое сжатие стенки заготовки, что приводит к снижению потери устойчивости.

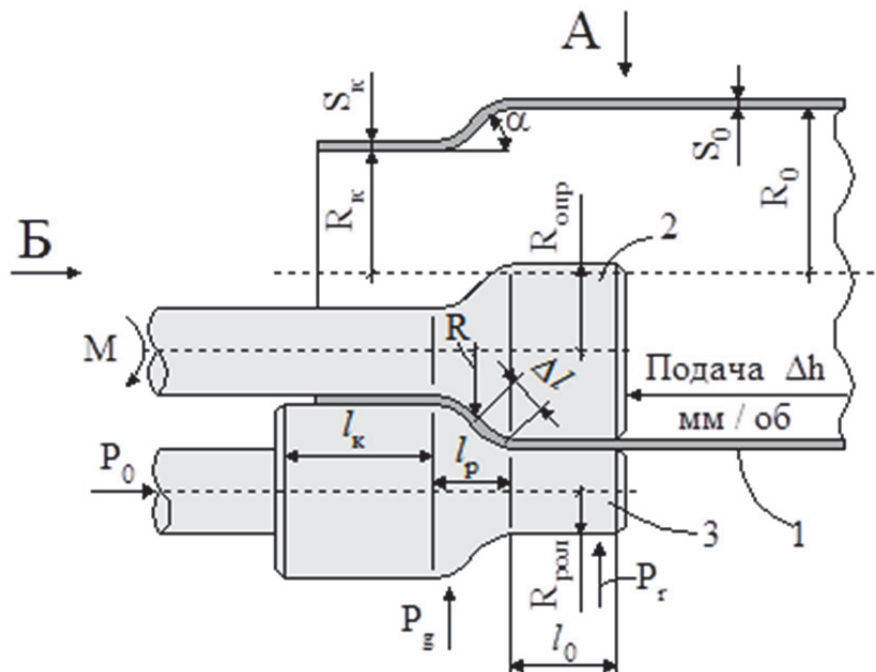


Рис. 1. Принципиальная схема процесса ротационного обжима труб

Под действием комплекса осевых и радиальных усилий происходит локальное деформирование концевой участка заготовки. В начале процесса деформирование происходит в нестационарном очаге деформации, который с течением времени переходит в стационарный.

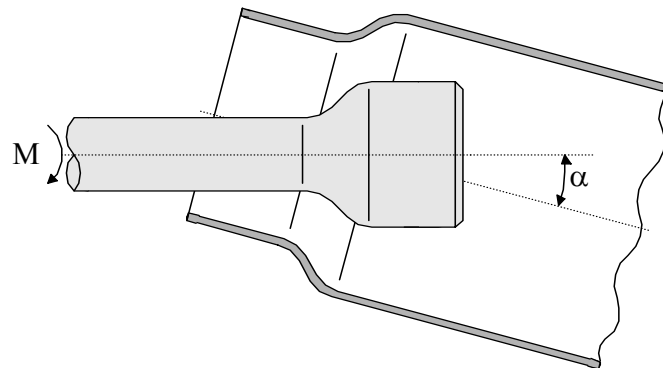


Рис. 2. Отклонение оси вращения трубчатой заготовки на угол α от оси вращения оправки (вид А на рис. 1)

Исключая потери на упругое деформирование стенки трубы от силы P , принимаем следующее допущение: работа от внешнего момента $M\varphi$ полностью расходуется на обжим концевой участка трубы, следовательно

$$M\varphi = \iiint_V (\sigma_s \varepsilon_i dV). \quad (1)$$

Из уравнения (1) из расчета на один оборот заготовки получим:

$$2\pi M = \sigma_s \varepsilon_i \Delta V, \quad (2)$$

где $\Delta V = 2\pi R S \Delta h \exp(\varepsilon_m)$ – объем деформируемого материала заготовки (принимаем, что толщина стенки в очаге деформации $S = S_0 = \text{const}$, поскольку происходит упругое сжатие стенки трубы, и деформациями можно пренебречь); R – радиус кромки заготовки (обеспечивается радиусами оправки); Δh – величина подачи заготовки на один оборот, мм; $\varepsilon_m = \ln(R_0/R)$.

Преобразуем уравнение (2) и получим, что работа, приходящаяся на один оборот детали, равна:

$$M = \sigma_s \varepsilon_i R S \Delta h \exp(\varepsilon_m), \quad (3)$$

где $\varepsilon_i = 1,15\varepsilon_m$; $\sigma_s = \sigma_{\text{то}} + n\varepsilon_i$; $R = R_0 - \Delta h \sin \alpha \exp(\varepsilon_m)$.

Расчет работы внешнего момента за последующие обороты детали проводим по уравнению (3) и суммируем по формуле

$$M_{i=N} = \sum_{i=1}^N M_i,$$

где M_i – величины работы от внешнего момента, полученные из выражения (3); N – общее количество оборотов заготовки от $i = 1$ до $i = N$.

Скорость вращения заготовки определим из соотношения радиусов кромок оправки и заготовки и приведем к оборотам в секунду:

$$V_{\text{д}} = \frac{nR_{\text{опр}}}{R_0 60}, \quad (4)$$

где n – частота вращения оправки (об/мин).

Определим время, затраченное на обработку:

$$\tau = \frac{l}{V_{\text{д}}}.$$

Определим перемещение законцовки детали в зоне деформации, приходящееся на один оборот:

$$\Delta l = \Delta h \exp(\varepsilon_m).$$

Угол отклонения оси вращения трубчатой заготовки от оси вращения оправки (в градусах) рассчитаем по следующему выражению:

$$\alpha = \frac{360\Delta h}{4\pi^2 R_0}.$$

Определим смещение заготовки и инструмента в направлениях x и y (рис. 3), получим

$$x = \frac{0,5(R_0^2 - R^2)}{R_{\text{рол}} + R}, \quad y = \sqrt{R_0^2 - (R + x)^2}. \quad (8)$$

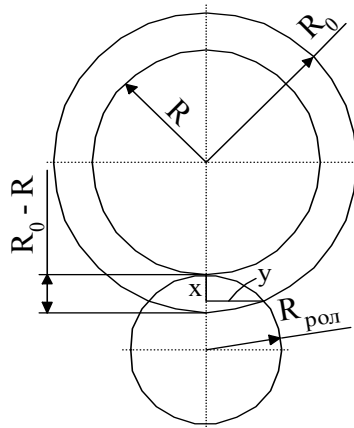


Рис. 3. Схема расчета смещений и определения площади контакта заготовки и инструмента (вид Б на рис. 1)

Также из рис. 3 определим площадь проекции контакта в осевом направлении:

$$F \approx y(R_0 - R).$$

Таким образом, площадь проекции контакта заготовки и инструмента по всему очагу деформации равна:

$$F_0 = \pi(R_0^2 - R^2)$$

Примем, что затраченная работа (усилие) на преодоление сил трения пропорциональна площади контакта. Исходя из допущения, рассчитаем осевое усилие P_0 , действующее на ролик:

$$P_0 = \frac{M_{i=N} F \varphi}{F_0 l \cos \alpha},$$

где l – перемещение концевой части детали в очаге деформации ($l = l + \Delta l$); φ – угол поворота детали ($\varphi = 2\pi i$).

Определим радиальное усилие:

$$P_{\text{д}} = P_0 \cos \alpha.$$

Определим усилие, возникающее в зоне упругого сжатия:

$$P_r = l_0 d_k \sigma_{\text{то}},$$

где $d_k = \sqrt{r_c^2 - h_c^2}$ – длина контакта оправки и заготовки в зоне упругой деформации.

$$\text{Здесь } r_c = \frac{R_{\text{опр}} + R_{\text{рол}}}{2}, h_c = r_c - 0,002S_0.$$

Проведение процесса деформирования возможно при условии, что

$$P_0 \leq P_r 2f,$$

где f – коэффициент трения в зоне контакта оправки и заготовки.

Рассчитаем момент в зоне упругости:

$$M_r = P_r r_c.$$

Определим суммарную радиальную силу путем сложения усилия в зоне контакта и радиального усилия. Таким образом, усилие на ролике будет равно:

$$P_{\Sigma} = P_D + P_r. \quad (4)$$

Суммарный крутящий момент определим путем сложения внешнего момента за все обороты и момента в зоне упругости:

$$M_{\Sigma} = M_{i=N} + M_r.$$

Определим мощность на оправке от суммарного крутящего момента с учетом общего количества оборотов:

$$W = \frac{M_{\Sigma} \Phi}{\tau}.$$

Применяя коэффициент запаса $k = 1,5 - 2,0$, определим мощность двигателя по формуле (4).

Вывод: математическая модель процесса формообразования концевых участков трубчатых заготовок с использованием метода ротационного обжима позволяет автоматизировать отдельные этапы новых производственных процессов, связанных с силовыми параметрами подачи заготовок по оси и радиальных усилий, развиваемых на роликах. Предварительные расчеты силовых параметров позволят сократить как материальные, так и трудовые затраты на разработку новых технологических процессов, повысить качество деталей за счет снижения потери устойчивости и разрушения заготовок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хейн, Вин Зо Экспериментальные исследования процесса раскатки труб / Вин Зо Хейн // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2007. – № 12. – С. 11-14.
2. Хейн, Вин Зо Математическое моделирование процесса ротационного обжима концевой участка трубы / Вин Зо Хейн // Интернет-журнал «Наукovedение»: электронное научно-техническое издание. – 2013. – № 6 (19). Идентификационный номер статьи в журнале: 62TVN613. Режим доступа: <http://naukovedenie.ru>.
3. Листовая штамповка. Расчет технологических параметров : справ. / А. С. Чумадин и [др.]. – М.: Изд-во МАИ, 1999. – 516 с.

Алетдинов Р. Ф., Волкова Т. А.
R. F. Aletdinov, T. A. Volkova

СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ЁМКОСТНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ СО СПЛОШНЫМ РОТОРОМ

REPLACEMENT SCHEME OF CAPACITIVE AC ENGINE WITH SOLID ROTOR



Алетдинов Рустам Фларидович – преподаватель кафедры электромеханики Уфимского государственного авиационного технического университета (Россия, Уфа); +7 987 491 5830. E-mail: rustikose@yandex.ru.

Rustam F. Aletdinov – Lecturer in Ufa State Aviation Technical University, Department of Electromechanics (Russia, Ufa); +7 987 491 5830. E-mail: rustikose@yandex.ru.



Волкова Татьяна Александровна – старший преподаватель кафедры электромеханики Уфимского государственного авиационного технического университета (Россия, Уфа); 8 (347) 253-15-63. E-mail: volkovausatu@yandex.ru.

Tatyana A. Volkova – Lecturer in Ufa State Aviation Technical University, Department of Electromechanics (Russia, Ufa). 8 (347) 253-15-63. E-mail: volkovausatu@yandex.ru.

Аннотация. Описывается принцип построения схемы замещения ёмкостного асинхронного двигателя со сплошным ротором. Выводятся электромеханические уравнения ёмкостного асинхронного двигателя со сплошным ротором.

Summary. The principle of the equivalent circuit capacitive asynchronous engine with solid rotor is described. Equations of electromechanical capacitive induction engine with solid rotor are derived.

Ключевые слова: дуально-инверсный аналог; ёмкостной двигатель; взаимоёмкость.

Key words: dual-inverted analogue; capacitive engine; mutual capacitance.

УДК 621.313;530.1

Введение

Для развития теории ёмкостных электромеханических преобразователей энергии (ЭМПЭ) на основе дуально-инверсной электродинамики имеет смысл обратиться к графическому представлению ёмкостных преобразователей в виде обобщённой электрической машины, а также разработке правила построения обобщённой схемы ёмкостного ЭМПЭ.

На основе дуально-инверсной аналогии (ДИА) элементы электрической цепи будут взаимно заменять друг друга, как это было показано в [1]: источник напряжения $u(t)$ – источник тока $i(t)$; сопротивление R – проводимость G и т.д.

В теории цепей рассматриваются дуальные первое и второе уравнения Кирхгофа и соответствующие им инверсные схемы. Для ёмкостных и индуктивных преобразователей дуальными являются первое и второе уравнения Максвелла для движущихся сред, а инверсными – соответствующие им схемы источников тока и напряжения [2].

Для цепи источника тока справедливо первое уравнение Кирхгофа

$$i = -yu + j,$$

где j – ток ёмкостной индукции.

Для цепи источника ЭДС справедливо второе уравнение Кирхгофа

$$U = -zi + e,$$

где e – ЭДС электромагнитной индукции.

Все математические выражения в дуально-инверсной электродинамике получаются сходными по форме записи, причём проводимостям в уравнениях узловых потенциалов соответствуют сопротивления в уравнениях контурных токов.

В настоящее время широко применяются математические модели индуктивных ЭМПЭ [3], которые отражают их физические закономерности, удобны при анализе ЭМПЭ и систем на их основе с позиций энергетического подхода, но мало приспособлены для анализа и синтеза ёмкостных электромеханических преобразователей.

Обобщённая модель ёмкостной электрической машины (ЁЭМ) была применена В. А. Челухиным [7; 8]. Но по большей части затрагиваются индуктивно-ёмкостные электрические машины (ИЁЭМ), касаясь ЁЭМ в силу доказательства ДИА обобщённой индуктивной машины (ОИМ). При этом В. А. Челухин указывает, что на основе ДИА принцип построения будет следующим: при замене модели ОИМ ёмкостной необходимо ёмкость располагать так, чтобы взаимные ёмкости были минимальными, если взаимные индуктивности максимальные, и наоборот. Для этого обкладки ёмкостей, расположенных на роторе, необходимо развернуть на 180° в положение наибольшего удаления от обкладок на статоре. Действительно, по правилам дуально-инверсной замены [6] режим короткого замыкания в индуктивной цепи соответствует режим холостого хода в ёмкостной цепи. Поскольку, например, в индуктивной асинхронной машине с короткозамкнутым ротором цепь ротора работает в режиме короткого замыкания, то в ёмкостной машине с таким же ротором цепь ротора должна работать в режиме холостого хода. Поэтому в первом случае ток ротора равен току короткого замыкания, а во втором – току холостого хода $I_r = 0$.

Для построения обобщённой электрической модели (ОЭМ) необходимо и достаточно рассмотрение электрической машины, содержащей две группы электродов, одна из которых расположена на статоре, а другая – на роторе.

Для математического описания обобщённой ёмкостной электрической машины за основу примем физическую модель двухфазной электрической машины, представленной на рис. 1. Так как ёмкости (взаимоёмкость) ротора жёстко связаны с ротором и поэтому вращаются относительно статора, то физическая модель представлена в двух не связанных системах координат. Электроды статора при этом располагаются на осях координат, неподвижных относительно статора α - β , а ёмкости ротора – на осях координат, неподвижных относительно ротора d - q . Оси координат α - β и d - q располагаются под углом $\varphi_{эл}$, который меняется по мере вращения ротора относительно статора.

Следует также обратить внимание на то, что представленная на рис. 2 физическая модель обобщённой электрической машины идеальна и отличается от реальной машины следующими допущениями:

- распределение токов в цепях каждой из систем электродов вдоль окружности воздушного зазора машины считается синусоидальным или постоянным;
- учитываются только основные составляющие пространственных кривых распределения напряжённости электрического поля в рабочем зазоре машины, имеющие период, равный двум полюсным делениям машины;
- не учитывается влияние механических и электрических потерь на величину напряжений;
- не учитываются диэлектрический гистерезис, насыщение и паразитные ёмкости в машине;
- внешняя сеть, связанная с машиной, принимается бесконечно мощной.

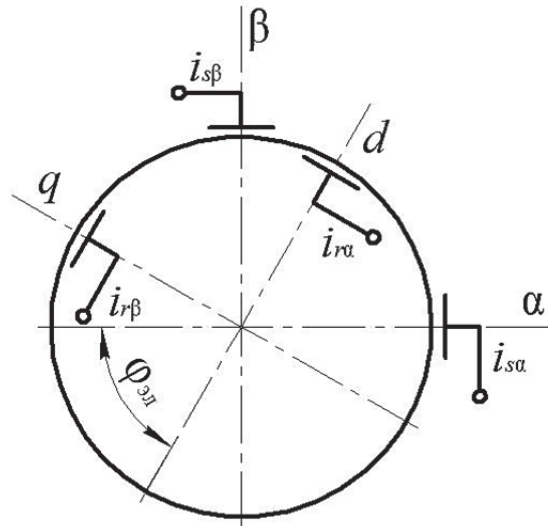


Рис. 1. Физическая модель обобщённой ёмкостной электрической машины

Для получения математической модели ОЭМ воспользуемся первым законом Кирхгофа, применив его для каждой пары из четырёх электродов, в результате чего получим

$$\left. \begin{aligned} i_{s\alpha} &= u_{s\alpha} g_{s\alpha} + \frac{d}{dt} C_{s\alpha}, \\ i_{r\alpha} &= u_{r\alpha} g_{r\alpha} + \frac{d}{dt} C_{r\alpha}, \\ i_{r\beta} &= u_{r\beta} g_{r\beta} + \frac{d}{dt} C_{r\beta}, \\ i_{s\beta} &= u_{s\beta} g_{s\beta} + \frac{d}{dt} C_{s\beta}. \end{aligned} \right\}$$

Эта система уравнений описывает равновесие токов в каждой из пар электродов. Ток, прикладываемый к электроду, уравновешивается падением напряжения на проводимости соответствующего участка и ёмкости, которая возникает при изменении электрического поля на данном участке.

В результате движения электрического поля в области воздушного зазора у сбегающей и набегающей кромок электрода индуктора приращения вектора напряжённости электрического поля и вектора индукции имеют противоположные направления [2]. Поэтому наведённые токи ёмкостной индукции замыкаются в рабочем зазоре по замкнутому кругу и создают вихревое индуцированное поле $\nabla \times \bar{E}_2$, взаимодействие активной составляющей которого с потенциальным полем индуктора создаёт вращающий момент (режим двигателя) [2].

Электростатическое поле безвихревое в однородном поле, это его основное свойство. Следовательно, в электростатическом поле линии вектора – разомкнутые кривые. Они начинаются у положительных зарядов и кончаются у отрицательных.

Обобщённый вид индуктивной электрической машины можно найти в [3, 36].

Дуально-инверсная схема обобщённой ёмкостной машины будет выглядеть следующим образом (см. рис. 2).

Индукционная ЁЭМ переменного тока является дуально-инверсным аналогом индуктивной асинхронной электрической машины (АМ) [7]. Индукционная ЁЭМ может быть представлена в виде трёхфазного индуктора, создающего вращающееся с угловой скоростью ω_1 электрическое поле напряжённостью \bar{E}_1 , и ротора.

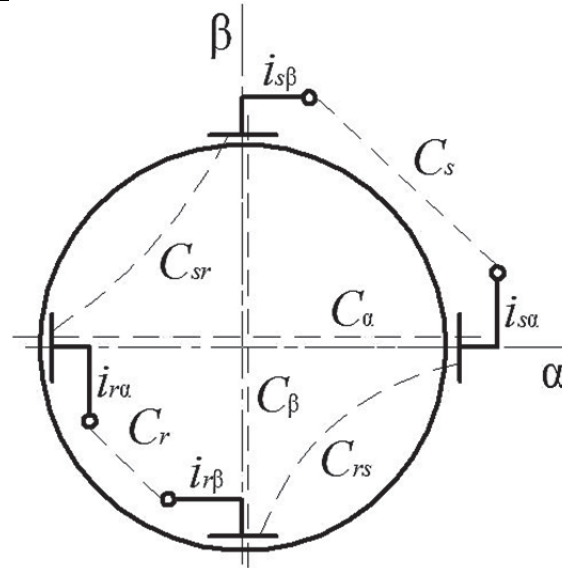


Рис. 2. Обобщённый вид ЁЭМ

В настоящей работе рассматривается формирование математической модели индукционной ЁЭМ со сплошным ротором в соответствии с теорией обобщённой индуктивной АМ [4; 5] на основе ДИА.

Построение модели

Ёмкостная обобщённая машина отличается от индуктивной обобщённой машины тем, что вместо пары обмоток в ёмкостной машине имеются две пары электродов ротора и статора [7]. Схема размещения электродов показана на рис. 1.

Уравнения Кирхгофа содержат выражения токов, потери на джоулево тепло на проводимостях, токодвигущей силы (ТДС) вращения и трансформаторных ТДС:

$$C_{s\alpha} \frac{d}{dt} U_{s\alpha} + C \frac{d}{dt} U_{r\alpha}; C \frac{d}{dt} U_{s\alpha} + C_{r\alpha} \frac{d}{dt} U_{r\alpha},$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{s\alpha} \\ -\dot{I}_{r\alpha} \\ -\dot{I}_{r\beta} \\ \dot{I}_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_s + \frac{d}{dt} C_{s\alpha} & \frac{d}{dt} C & 0 & 0 \\ \frac{d}{dt} C & g_r + \frac{d}{dt} C_{r\alpha} & C_{r\beta} \omega_r & C \omega_r \\ -C \omega_r & -C_{r\alpha} \omega_r & g_r + \frac{d}{dt} C_{r\beta} & \frac{d}{dt} C \\ 0 & 0 & \frac{d}{dt} C & g_s + \frac{d}{dt} C_{s\beta} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{r\alpha} \\ u_{r\beta} \\ u_{s\beta} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$C_3 = C(U_{r\beta} \cdot U_{r\alpha} - U_{s\alpha} \cdot U_{r\beta}),$$

$$J \frac{d\omega_c}{dt} \pm C_c = C_3.$$

Уравнение вращающего момента

$$M_3 = pC \times [(u_{s\beta} u_{r\alpha} - u_{s\alpha} u_{r\beta}) \cos \varphi_{эл} - (u_{s\beta} u_{r\alpha} + u_{s\alpha} u_{r\beta}) \sin \varphi_{эл}].$$

Уравнение электромеханической связи

$$i_i = g_i u_i + \sum_{j=1}^{2q} C_{i,j} \frac{du}{dt} + \omega_{эл} \sum_{j=1}^{2q} \frac{dC_{i,j}}{d\varphi_{эл}} u_j,$$

где $i = s\alpha, r\alpha, r\beta, s\beta$.

В правой части этого уравнения первый член отражает потери на джоулево тепло, второй – ёмкости и взаимоемкости системы, третий – ТДС ёмкостной индукции вращения.

Будем рассматривать приведённую выше систему уравнений для установившегося режима, являющегося частным случаем динамического режима. Уравнения токов установившегося режима получаются из дифференциальных уравнений электромеханического преобразователя (ЭП) путём замены в них оператора дифференцирования $\frac{d}{dt}$ на $j\omega$. Для обобщённой машины в системе координат α, β уравнения установившегося режима могут быть получены из (1) в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{s\alpha} \\ -\dot{I}_{r\alpha} \\ -\dot{I}_{r\beta} \\ \dot{I}_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_s + jy_s & jy_c & 0 & 0 \\ jy_c & g_r + jy_r & vy_r & vy_c \\ -vy_c & -vy_r & g_2 + jy_r & jy_c \\ 0 & 0 & jy_c & g_s + jy_s \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{U}_{s\alpha} \\ \dot{U}_{r\alpha} \\ \dot{U}_{r\beta} \\ \dot{U}_{s\beta} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $v = \omega_r / \omega_c$ – относительная скорость; g_s, g_r – проводимости статора и ротора соответственно; $y_s = \omega C_s$ – ёмкостное сопротивление статора; $y_r = \omega C_r$ – ёмкостное сопротивление ротора; $y_c = \omega C$ – сопротивление взаимной ёмкости системы.

При этом $y_s = y_c + y_{ss}, y_r = y_c + y_{rr}$, где $y_{ss} = \omega C_{s\gamma}$ и $y_{rr} = \omega C_{r\gamma}$ – паразитные ёмкостные сопротивления соответственно статора и ротора.

В установившемся режиме ($d/dt = 0$) уравнение движения вырождается:

$$C_c = pM_{\tilde{e}}. \quad (3)$$

В отличие от индуктивных источников напряжения, в которых на активную и реактивную составляющие разлагается ток главной цепи, в ёмкостных источниках тока на активную и реактивную составляющие разлагается не индуцируемый ток (const), а напряжение (var), реактивная составляющая которого обусловлена реактивными, главным образом, ёмкостными сопротивлениями, а активная – активной нагрузкой и потерями в преобразователе [2]. Таким образом, уравнение ёмкостного момента в установившемся режиме имеет вид

$$M_{\tilde{e}} = \frac{mp}{2} C (U_{r\alpha A} U_{s\beta A} + U_{r\alpha P} U_{s\beta P} - U_{r\beta A} U_{s\alpha A} - U_{r\beta P} U_{s\alpha P}), \quad (4)$$

где $U_{s\alpha A}, U_{s\beta A}, U_{r\alpha A}, U_{r\beta A}$ – соответственно активные составляющие напряжений статора и ротора по осям α и β ; $U_{s\alpha P}, U_{s\beta P}, U_{r\alpha P}, U_{r\beta P}$ – соответственно реактивные составляющие напряжений статора и ротора по осям α и β .

Из уравнений установившегося режима обобщённой машины (2)-(4) можно получить уравнения для ёмкостных асинхронных и синхронных машин, а также для ёмкостного трансформатора. Так, для индукционной ЭЭМ со сплошным ротором уравнения установившегося режима примут вид (с учётом $U_{r\alpha} = 0, U_{r\beta} = 0$)

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{s\alpha} \\ 0 \\ 0 \\ \dot{I}_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_s + jy_s & jy_c & 0 & 0 \\ jy_c & g_r + jy_r & vy_r & vy_c \\ -vy_c & -vy_r & g_r + jy_r & jy_c \\ 0 & 0 & jy_c & g_s + jy_s \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{U}_{s\alpha} \\ \dot{U}_{r\alpha} \\ \dot{U}_{r\beta} \\ \dot{U}_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Для ёмкостной асинхронной машины со сплошным ротором может быть предложен дуально-инверсный аналог Т-образной схемы замещения индуктивного асинхронного двигателя [3], который преобразуется в П-образную схему замещения ёмкостного индукционного двигателя со сплошным ротором (см. рис. 3).

В результате преобразования системы уравнения (5) можно вывести уравнения индукционной ЁЭМ и составить П-образную схему замещения.

Переменным параметром для ЁЭМ будет $G'_2 + jY'_2(1 - \sqrt{s})/\sqrt{s}$, характеризующийся ёмкостным током смещения. Здесь и далее индексами 1 и 2 будут обозначаться соответственно цепи статора и ротора.

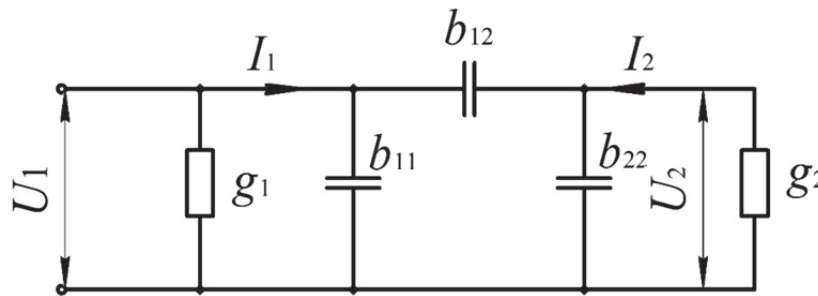


Рис. 3. П-образная схема замещения ёмкостного двигателя

В индукционном преобразователе режим ёмкостного преобразования достигается посредством электрического бегущего поля с использованием ёмкостной связи. На рис. 3 она обозначена b_{12} и представляет собой связь контуров тока ёмкостной индукции с внешней цепью.

По схеме замещения составляются уравнения Кирхгофа. Для цепи источника тока справедливо первое уравнение Кирхгофа (1), в котором ток ёмкостной индукции J равен $J = U \frac{dC}{dt}$ [2].

Принимая вышесказанное во внимание, получим

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = -\dot{J}_0 + \dot{U}_1 b_{11}, \\ 0 = \dot{J}_0 - \dot{U}_2 b_{22} - \dot{U}_2 b'_{22} \frac{1 - \sqrt{s}}{\sqrt{s}}, \\ \dot{U}_0 = \dot{U}_1 + \dot{U}_2, \end{cases} \quad (6)$$

где $b_{11} = g_1 + jy_1$, $b_{22} = g_2' + jy_2'$.

Отличительной особенностью системы уравнений (6) является зависимость параметров вторичной цепи (проводимости и ёмкостного сопротивления ротора) от скольжения.

Выведем обратные преобразования, позволяющие перейти от системы уравнений (6) к системе уравнений, подобной составленным для ёмкостного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (5) [6]. В таком случае мы получим математическую модель ЁЭМ со сплошным ротором, унаследованную от модели обобщённой машины.

Интерес представляет второе уравнение (6), записанное для цепи ротора, поскольку для цепи статора преобразования будут аналогичны показанным ранее в (5). Запишем развернутое выражение для ротора:

$$0 = \dot{J}_0 - g_2 \dot{U}_2 - jy_2 \dot{U}_2 - (g_2 + jy_2) \dot{U}_2 \frac{1-\sqrt{s}}{\sqrt{s}}. \quad (7)$$

Раскроем скобки в (7), умножим обе части на \sqrt{s} и проведём преобразования:

$$0 = \dot{J}_0 \sqrt{s} - g_2 \dot{U}_2 - jy_2 \dot{U}_2.$$

После замены переменных $\dot{J}_0 = -jy_0 \dot{U}_0$ и $\dot{U}_0 = \dot{U}_1 + \dot{U}_2$ получим

$$0 = -g_2 \dot{U}_2 - jy_2 \dot{U}_2 - jy_0 \dot{U}_2 \sqrt{s} - jy_0 \dot{U}_1 \sqrt{s}.$$

Учитывая, что $\dot{U}_{1\beta} = j\dot{U}_{1\alpha}$, $\dot{U}_{2\beta} = j\dot{U}_{2\alpha}$, $s = 1-v$, и пропуская промежуточные преобразования для ёмкостей статора и ротора, расположенных на одной оси, получим для оси α

$$0 = -g_2 \dot{U}_{2\alpha} - jy_2 \dot{U}_{2\alpha} - y_0 \dot{U}_{2\beta} \sqrt{1-v} - y_0 \dot{U}_{1\beta} \sqrt{1-v}. \quad (8)$$

Для выделения в (8) ТДС вращения умножим и разделим обе части уравнения на $\sqrt{1-v}$:

$$0 = g_2 \dot{U}_{2\alpha} \sqrt{1-v} + j(y_2 \sqrt{1-v} + y_0) \dot{U}_{2\alpha} + jy_0 \dot{U}_{1\alpha} - y_0 \dot{U}_{2\beta} v - y_0 \dot{U}_{1\beta} v.$$

Аналогично для оси β :

$$0 = g_2 \dot{U}_{2\beta} \sqrt{1-v} + j(y_2 \sqrt{1-v} + y_0) \dot{U}_{2\beta} + jy_0 \dot{U}_{1\beta} - y_0 \dot{U}_{2\alpha} v - y_0 \dot{U}_{1\alpha} v.$$

С учётом выражений для осей α и β статора в (2), а также $y_0 = y_c$ получим математическую модель ёмкостной асинхронной машины со сплошным ротором:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{1\alpha} \\ 0 \\ 0 \\ \dot{I}_{1\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_1 + jy_1 & jy_c & 0 & 0 \\ jy_c & (g_2 + jy_2)\sqrt{1-v} + y_c & -vy_c & -vy_c \\ vy_c & vy_c & (g_2 + jy_2)\sqrt{1-v} + y_c & jy_c \\ 0 & 0 & jy_c & g_1 + jy_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{U}_{1\alpha} \\ \dot{U}_{2\alpha} \\ \dot{U}_{2\beta} \\ \dot{U}_{1\beta} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Математическую модель (9) для динамического режима в дифференциальной форме можно получить путём замены ёмкостных проводимостей y_c на взаимоемкости C и замены ёмкостных проводимостей ротора и статора на дифференцируемые по времени ёмкости ротора и статора:

$$\begin{bmatrix} I_{1\alpha} \\ 0 \\ 0 \\ I_{1\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_1 + \frac{d}{dt} C_{1\alpha} & \frac{d}{dt} C & 0 & 0 \\ \frac{d}{dt} C & (g_2 + \frac{d}{dt} C_{2\alpha})\sqrt{1-v} + C & -Cv & -Cv \\ Cv & Cv & (g_2 + \frac{d}{dt} C_{2\beta})\sqrt{1-v} + C & \frac{d}{dt} C \\ 0 & 0 & \frac{d}{dt} C & g_1 + \frac{d}{dt} C_{1\beta} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_{1\alpha} \\ u_{2\alpha} \\ u_{2\beta} \\ u_{1\beta} \end{bmatrix}$$

Таким образом, уравнения статических режимов – это частный случай системы уравнений динамики. При решении новых задач электромеханики следует начинать с дифференциальных уравнений, а затем, получив из них уравнения установившегося режима, предлагать схемы замещения.

Полученная П-образная схема замещения была построена в программе Workbench и получена следующая осциллограмма пусковой характеристики по напряжению (см. рис. 4).

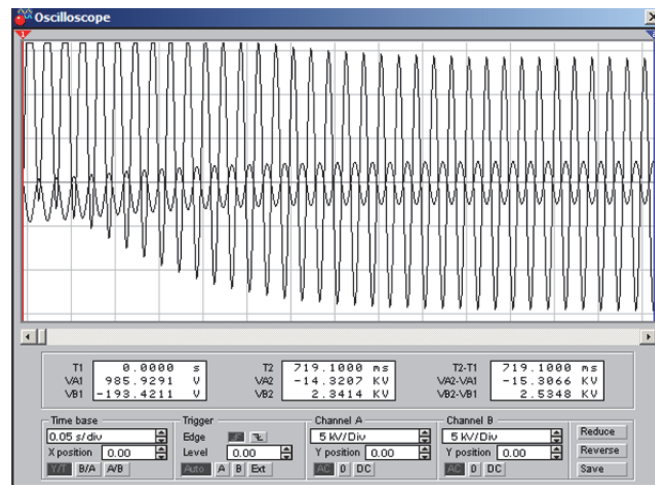


Рис. 4. Диаграмма напряжений

Как видно из осциллограммы, в момент пуска t_1 на электродах статора амплитуда напряжения возрастает скачком, а на роторе индуцируется напряжение, которое возрастает постепенно и с течением времени $t_2 \approx 720$ мс достигает установившегося режима.

Выводы

1. Рассмотрен метод получения уравнения обобщённой математической модели индукционной ЁЭМ со сплошным ротором путём преобразования от частного к общему.
2. Полученные уравнения обобщённой модели индукционной ЁЭМ со сплошным ротором могут быть применены для описания процессов преобразования потоков энергии в двухфазной системе координат.
3. На основе полученных уравнений была построена схема замещения индукционной ЁЭМ со сплошным ротором.
4. Полученные выражения уравнений позволят применить их к ёмкостным электрическим машинам с различного рода диэлектрическим ротором: с твёрдым или жидкостным диэлектриком.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алетдинов, Р. Ф. Определение функциональных связей в дуально-инверсной электродинамике путём сравнения размерностей / Р. Ф. Алетдинов, Т. А. Волкова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2012. – № IV-1(12). – С. 23-27.
2. Бальчитис, А. А. Ёмкостная подобласть индукционных процессов преобразования потоков энергии / А. А. Бальчитис. – Вильнюс: Изд-во «Минтис», 1973. – 307 с.
3. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. для вузов / И. П. Копылов. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.
4. Куцевалов, В. М. Вопросы теории и расчёта асинхронных машин с массивным ротором / В. М. Куцевалов. – М.-Л.: Энергия, 1966. – 304 с.
5. Постников, И. М. Обобщённая теория и переходные процессы электрических машин: учеб. для вузов / И. М. Постников. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1975. – 319 с.
6. Фаттахов, Р. К. Результаты испытаний ёмкостного асинхронного двигателя и получение решений его уравнений / Р. К. Фаттахов, И. Х. Хайруллин, К. М. Фаттахов // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: сб. науч. трудов II Всерос. научно-техн. конф.: в 2 т. Т. 2 / редкол.: В. А. Шабанов (отв. ред.) и др. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2009. – 259 с.
7. Челухин, В. А. Выбор схемы соединений индуктивно-ёмкостной машины методом дуальных цепей / В. А. Челухин // Электромеханика. – 1989. – № 8. – С. 104-107.
8. Челухин, В. А. Математическое моделирование процессов преобразования энергии на основе дуально-инверсной электродинамики / В. А. Челухин. – Владивосток: Дальнаука, 2008. – 63 с.

Соловьев В. А., Сухоруков С. И., Черный С. П., Костин К. Е., Савельев Д. О.
V. A. Solovyev, S. I. Sukhorukov, S. P. Cherny, K. E. Kostin, D. O. Savelyev

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО МОДУЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ГОЛОЛЁДА НА ПРОВОДАХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

DESIGN OF AN INTELLIGENT MODULE FOR THE PREDICTION OF ICE FORMATION ON POWER LINE'S WIRES



Соловьев Вячеслав Алексеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: keapu@knastu.ru.

Mr. Vyacheslav A. Solovyev – D.Sc. of Engineering, Professor, Head of the Department of Electrodrive Engineering and Industrial Automation, Komsomolsk-on-Amur State Technical University; 27, Lenin Ave., Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia. E-mail: keapu@knastu.ru.



Сухоруков Сергей Иванович – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sergei.svan@gmail.com.

Mr. Sergei I. Sukhorukov – PhD student, Department of Electrodrive Engineering and Industrial Automation, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia). E-mail: sergei.svan@gmail.com.



Чёрный Сергей Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: keapu@knastu.ru.

Mr. Sergei P. Cherny – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Electrodrive Engineering and Industrial Automation, Komsomolsk-on-Amur State Technical University; 27, Lenin Ave., Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia. E-mail: keapu@knastu.ru.



Костин Константин Евгеньевич – студент Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: keapu@knastu.ru.

Mr. Konstantin E. Kostin – student, Komsomolsk-on-Amur State Technical University; 27, Lenin Ave., Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia. E-mail: keapu@knastu.ru.



Савельев Дмитрий Олегович – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: keapu@knastu.ru.

Mr. Dmitriy O. Savelyev – PhD student, Department of Electrodrive Engineering and Industrial Automation, Komsomolsk-on-Amur State Technical University; 27, Lenin Ave., Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia. E-mail: keapu@knastu.ru.

Аннотация. В статье рассмотрена одна из основных проблем эксплуатации линий электропередач – процесс образования обледенения проводов. Определены основные факторы, влияющие на процесс

образования льда, описаны сочетания параметров, при которых образуются различные типы льда. Предложено использование интеллектуальной системы для прогнозирования процесса образования льда. Разработан модуль определения типа льда на базе нечёткой логики. Проверена работа модуля при изменяющихся во времени входных параметрах.

Summary. In this paper we consider one of the main problems arising at power line operation – ice formation process on power lines' wires. We single out and specify the key factors affecting the process, and describe several combinations of parameter under which different ice type's form themselves. We suggest employing an intelligent system for the prediction of ice formation processes. A fuzzy logic module for ice type's identification has been designed. The module's operation with time-varying input parameters has been tested.

Ключевые слова: ЛЭП, гололёд, прогнозирование, интеллектуальная система, нечёткий модуль.

Key words: power line, ice deposit, prediction, intelligent system, fuzzy module.

УДК 004.891

В настоящее время для передачи энергии на большие расстояния широко применяются высоковольтные воздушные линии электропередач (ЛЭП). Существует ряд проблем, связанных с эксплуатацией ЛЭП. Одна из важнейших проблем – проблема борьбы с гололёдом, образующимся на проводах и конструкциях линии в зимний период. Для удаления уже образовавшегося льда разработаны и применяются различные способы и устройства [1]. В зависимости от параметров окружающей среды и погодных условий на ЛЭП может образовываться лёд различных типов с различными физико-механическими характеристиками. Поэтому при реализации любого из этих способов возникает задача определения количества и параметров льда. Проблему определения массы образующихся на проводах отложений можно разделить на две составляющие: определение объёма отложений и определение их плотности. При этом нахождение приблизительного объёма отложений затруднений не вызывает, в то время как плотность отложений визуально определить невозможно, а плотности различных видов льда могут различаться на порядок [2].

Для заблаговременного определения типа и количества образующегося льда удобно использовать различные прогнозирующие системы, способные рассчитывать параметры процесса по текущим погодным условиям.

Все виды гололёда, встречающегося на ЛЭП, можно укрупнённо разделить на три группы: гололёд, изморозь и мокрый снег. Основные характеристики различных видов льда и условия их образования приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные виды ледяных отложений и условия их образования

Условия образования	Виды льда		
	Гололёд	Изморозь	Мокрый снег
Температура образования	-5...+5	-11...-3	-10...0
Дополнительные условия образования	Ветер до 10 м/с, осадки (дождь) или густой туман	Туман или повышенная влажность	Осадки (снег)
Плотность отложений, кг/м ³	600...900	100...400	200...600

В работах [3; 4] показано, что на процесс гололёдообразования основное влияние оказывают температуры воздуха и провода, скорость ветра, влажность воздуха и погодные условия (наличие и тип осадков, туман и т.д.). При этом температуры воздуха и провода, скорость ветра и влажность воздуха – количественные параметры, которые поддаются точ-

ному измерению с помощью приборов, а погодные условия – качественный параметр, который измерен быть не может.

Процесс обледенения проводов носит вероятностный характер, и судить о его параметрах можно лишь используя статистические данные и наблюдения за ходом процесса. Для повышения объективности и возможности заблаговременной оценки состояния ледяного покрова целесообразно в структуру прогнозирующей системы ввести дополнительный модуль, который позволял бы по имеющимся параметрам окружающей среды и текущего состояния ЛЭП прогнозировать возникновение ледяных отложений на проводах.

Основные параметры, определяющие интенсивность и вид отложений на проводах, носят не только количественный, но и качественный характер. Кроме того, как было показано выше, границы сочетаний условий, при которых образуются различные виды льда, не имеют чётких параметров.

Поэтому разработку прогнозирующей системы желательно вести с применением аппарата нечёткой логики [5].

Один из возможных вариантов реализации нечёткого модуля для определения типа отложений может быть представлен в виде следующей функциональной схемы (см. рис. 1). При составлении этой схемы было выбрано пять входных параметров, которые согласно [6] оказывают наибольшее влияние на вид образующегося льда.

В качестве алгоритма нечёткого логического вывода выбран алгоритм Мамдани [7] как наиболее интуитивно доступный для составления базы правил.

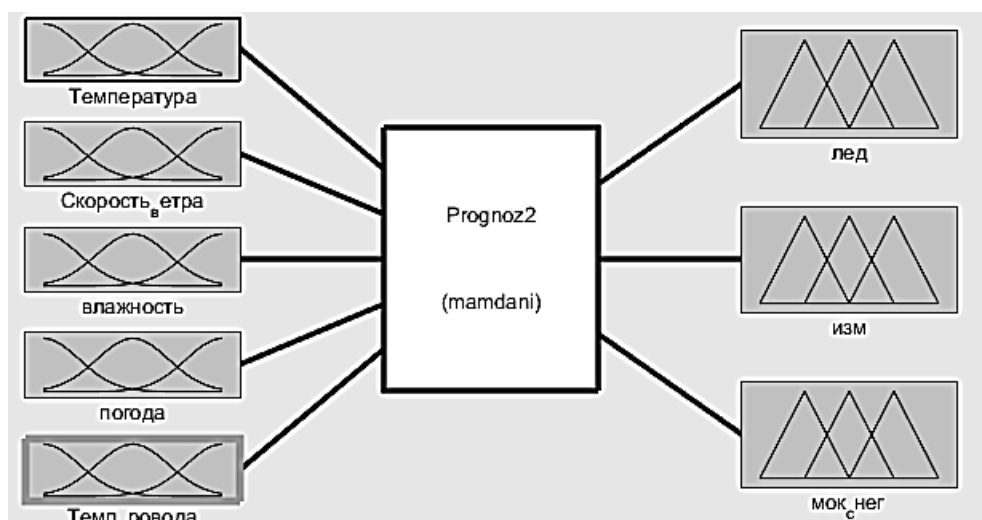


Рис. 1. Функциональная схема нечёткого модуля

Входные переменные модуля приведены на рис. 2, выходные – на рис. 3. Фрагмент базы правил нечёткого модуля приведён на рис. 4.

Диапазон значений входной переменной «температура»: $-30...+5$ °С. Переменная содержит три нечётких терма, описывающих диапазоны температур, при которых происходит образование основных видов льда. Входная переменная «скорость ветра» состоит из одного s-образного терма, описывающего степень влияния скорости ветра на процесс гололёдообразования. Диапазон значений $0...10$ м/с, что соответствует существующим ограничениям (при скорости ветра выше 10 м/с образования отложений происходить не будет).

Входная переменная «влажность» содержит три терма, описывающих низкую (0 %), среднюю (50 %) и высокую (100 %) влажность воздуха соответственно. При этом влажности 0 % соответствует значение 0, а влажности 100 % – значение 1. Входная переменная «погода» содержит три терма, описывающих три основных варианта погодных условий: ясная погода без тумана или осадков (значение 0), туман (значение 0,5) и наличие осадков (значение 1).

Переменная «температура провода» содержит два терма, описывающих влияние температуры провода на процесс гололёдообразования: при температуре 0 °С процесс останавливается.

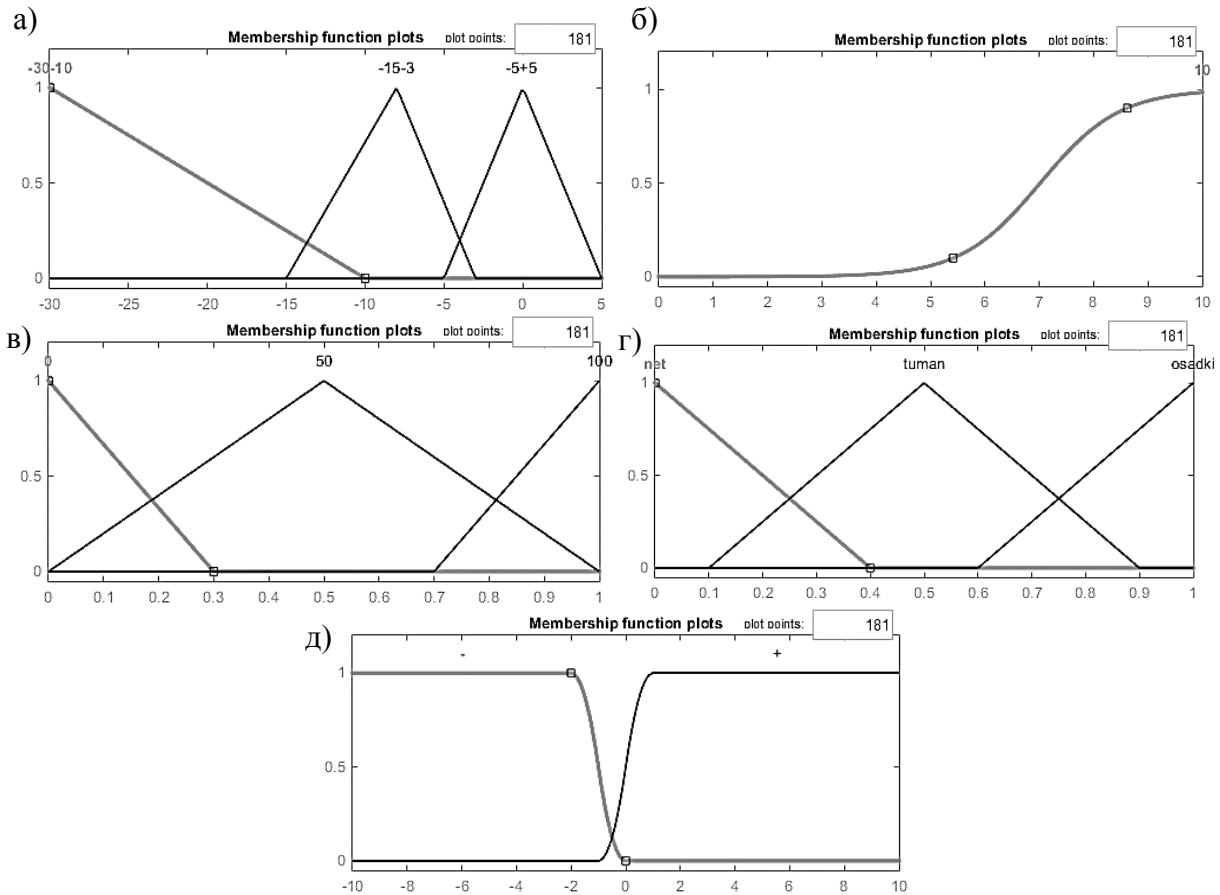


Рис. 2. Входные переменные модуля: а – температура; б – скорость ветра; в – влажность; г – погода; д – температура провода

Каждая из трёх выходных переменных содержит по два нечётких терма, описывающих две возможные ситуации: «отложение соответствующего типа образуется» и «отложение соответствующего типа не образуется». Первой ситуации соответствует значение 1, а второй – значение 0.

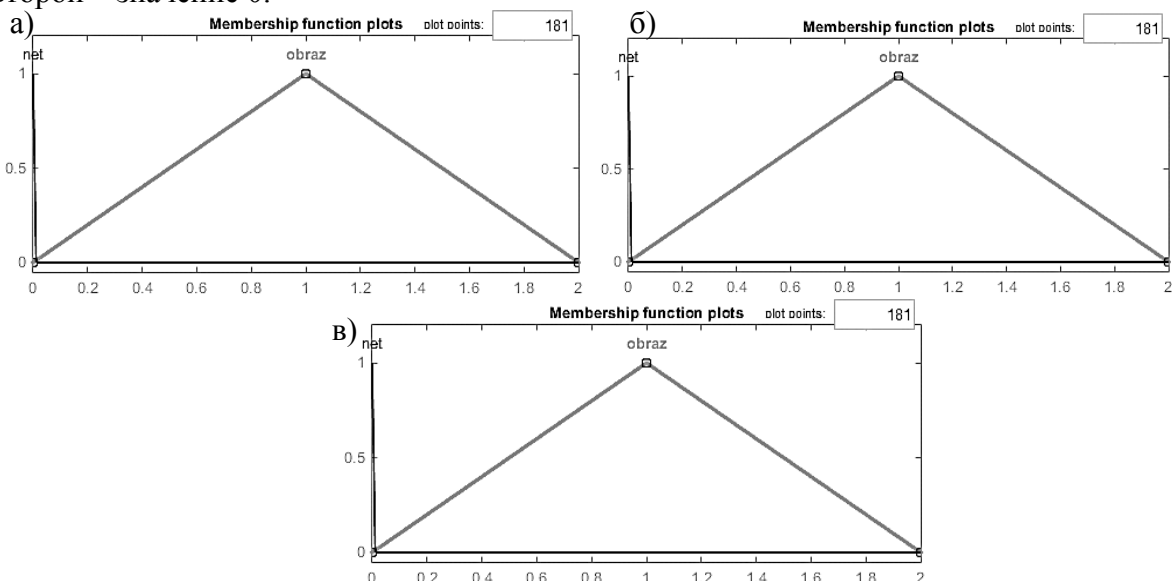


Рис. 3. Выходные переменные модуля: а – лёд; б – изморозь; в – мокрый снег

1. If (Температура is -5+5) and (Скорость_ветра is not 10) and (влажность is not 0) and (погода is not net) and (Темп_провода is -) then (лед is obraz) (1)
2. If (Температура is not -5+5) then (лед is net) (1)
3. If (Скорость_ветра is 10) then (лед is net) (1)
4. If (погода is net) then (лед is net) (1)
5. If (Температура is -15-3) and (Скорость_ветра is not 10) and (влажность is 100) and (погода is not osadki) and (Темп_провода is -) then (изм is obraz) (1)
6. If (Температура is not -15-3) then (изм is net) (1)
7. If (влажность is not 100) and (погода is net) then (изм is net) (1)
8. If (Температура is -15-3) and (Скорость_ветра is not 10) and (влажность is not 0) and (погода is osadki) and (Темп_провода is -) then (мок_снег is obraz) (1)
9. If (Температура is -5+5) then (мок_снег is net) (1)
10. If (Скорость_ветра is 10) then (мок_снег is net) (1)
11. If (погода is not osadki) then (мок_снег is net) (1)
12. If (Темп_провода is +) then (лед is net)(изм is net)(мок_снег is net) (1)

Рис. 4. Фрагмент базы правил нечёткого модуля

Оценка адекватности работы разработанного нечёткого модуля была проведена в математической модели прогнозирующей системы в среде MatLAB (см. рис. 5). В приведённой модели на вход нечёткого модуля подаётся сигнал с выхода блока, имитирующего изменение параметров окружающей среды и температуры провода с течением времени. Внутренняя структура данного блока приведена на рис. 6.

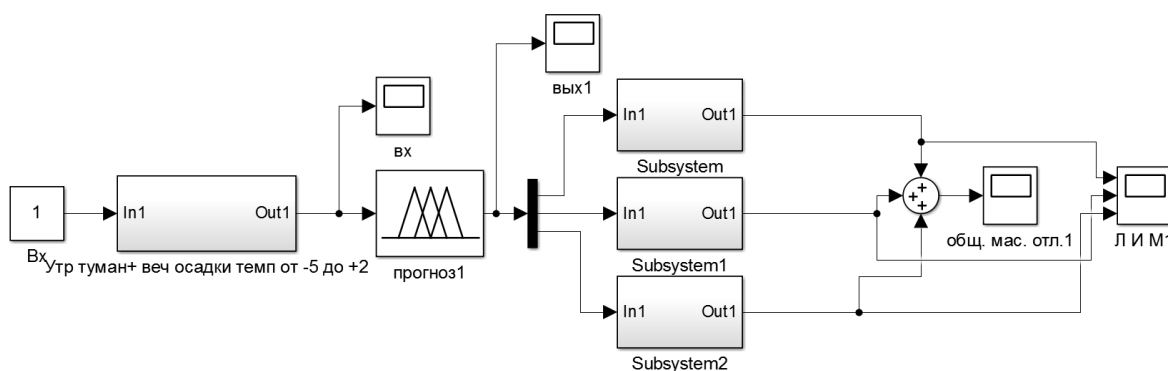


Рис. 5. Математическая модель

Сигналы с выходных переменных нечёткого модуля подаются на соответствующие подсистемы, отвечающие за расчёт конечной массы образовавшегося льда. Указанные подсистемы имеют идентичную структуру, приведённую на рис. 7, и отличаются величинами коэффициентов К.

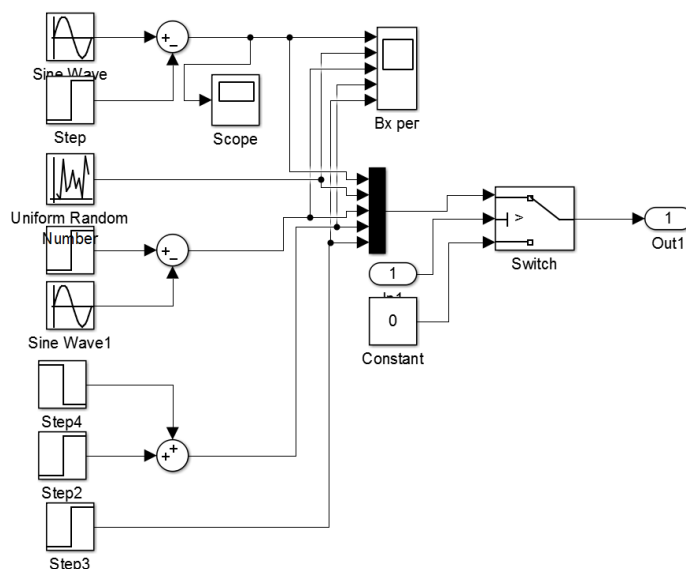


Рис. 6. Структура блока задания входных сигналов

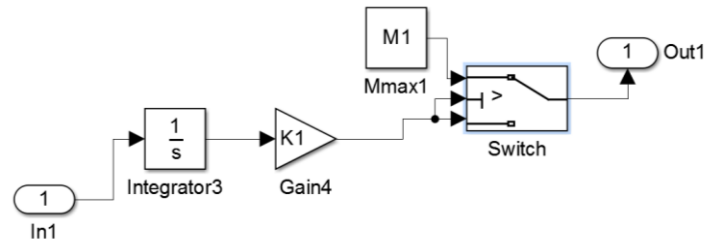


Рис. 7. Структура подсистемы, рассчитывающей массу льда соответствующего типа

Работа системы была смоделирована для двух случаев различного изменения параметров окружающей среды в течение суток. Температура воздуха (T_B), температура провода ($T_{пр}$) и влажность (v) в обоих случаях заданы в виде плавно изменяющихся функций, в то время как скорость ветра (V_B) была представлена случайной величиной. Графики изменения входных и выходных параметров, полученные в результате моделирования, приведены на рис. 8, 9. На всех приведённых графиках по оси абсцисс откладывается время в часах, а по оси ординат – соответствующие величины параметров.

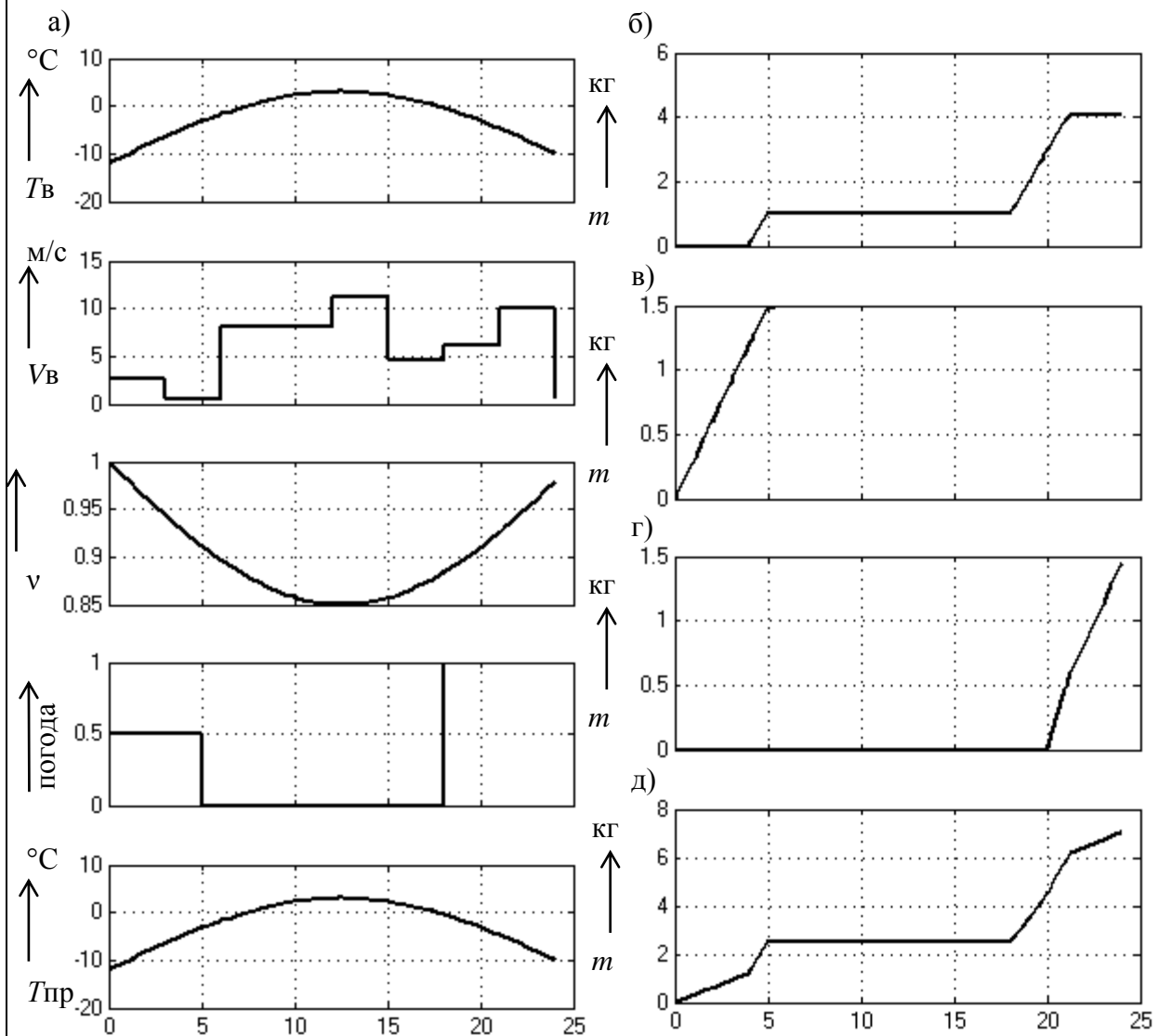


Рис. 8. Графики входных и выходных значений при моделировании: а – входные параметры; б – масса образующегося льда; в – масса образующейся изморози; г – масса образующегося мокрого снега; д – суммарная масса гололёдно-изморозевых отложений

Из графиков на рис. 8 видно, что при изменении параметров окружающей среды разработанный нечёткий модуль отражает изменение как скорости, так и типа образования льда. Также при повышении температуры воздуха и температуры провода выше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ процесс гололёдообразования прекращается.

На графиках, приведённых на рис. 9, также прослеживается зависимость скорости и типа намерзающего льда от погодных условий. При этом на рис. 9 температура воздуха не превышала $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, однако на промежутке времени 7...17 ч образования ледяных отложений не происходило. Это связано с повышением температуры провода. Такие ситуации характерны для ЛЭП, на которых в определённые промежутки времени тепловой мощности, выделяемой на проводе от протекающего тока, достаточно для значительного разогрева провода.

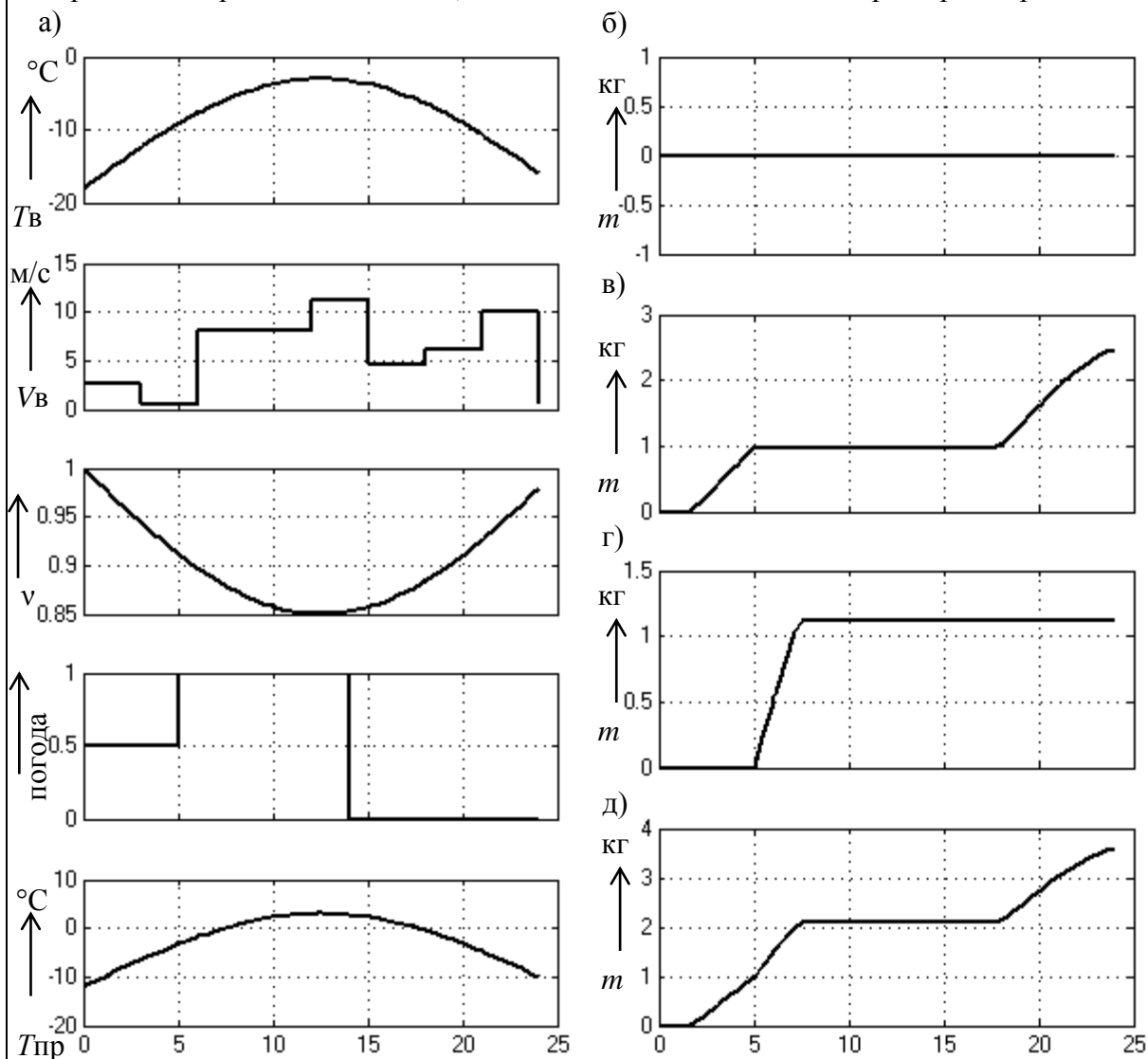


Рис. 9. Графики входных и выходных значений при моделировании: а – входные параметры; б – масса образующегося льда; в – масса образующейся изморози; г – масса образующегося мокрого снега; д – суммарная масса гололёдно-изморозевых отложений

Анализ результатов показывает, что используемый подход к определению типа образующегося гололёда при текущих погодных условиях реально отражает связь между основными факторами, влияющими на процесс, и типами гололёдно-изморозевых образований. Использование нечёткой математической модели даёт возможность выявить характерные сочетания условий для каждого из типов льда. Предварительные результаты моделирования показали хорошее совпадение с имеющейся статистической информацией.

ЛИТЕРАТУРА

1. Инновационные технологии управления. В 2 кн. Кн. 1 / [А. А. Баранников и др.]. – Одесса: КУПРИЕНКО СВ, 2013. – 128 с.
2. Методические указания по борьбе с гололёдом и автоколебаниями на контактной сети, линиях ДПР, автоблокировки и продольного электроснабжения. Кн. 1. Основы профилактического подогрева, плавки гололёдно-изморозевых образований и меры борьбы с автоколебаниями проводов контактной сети и высоковольтных линий / РЖД, Департамент электрификации и электроснабжения. – Москва, 2004. – 132 с.
3. Титов, Д. Е. Мониторинг интенсивности гололёдообразования на воздушных линиях электропередачи и в контактных сетях: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Титов Дмитрий Евгеньевич. – Саратов, 2014. – 150 с.
4. Титов, Д. Е. Учёт температуры провода воздушной линии при определении начала образования гололёдных отложений / Д. Е. Титов, Г. Г. Угаров // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 5. – С. 46-52.
5. Пегат, А. Нечёткое моделирование и управление / А. Пегат; пер. с англ. – М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2013. – 798 с.
6. Титов, Д. Е. Физические процессы образования гололёдных отложений на проводах воздушных линий электропередач / Д. Е. Титов // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2014. – № 1. – С. 31-34.
7. Круглов, В. В. Нечёткая логика и искусственные нейронные сети / В. В. Круглов, М. И. Дли, Р. Ю. Голунов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 201 с.

Ким К. К., Мартьянов М. В., Иванов С. Н., Просолович А. А.
K. K. Kim, M. V. Martjanov, S. N. Ivanov, A. A. Prosolovitch

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ТЕПЛОТВОДА В ЭЛЕМЕНТАХ ГЕРМЕТИЧНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

THE PROBLEM RESEARCH OF HEAT RESISTANCE IN THE ELEMENTS OF HERMETIC ELECTROMECHANICAL CONVERTERS



Ким Константин Константинович – член-корреспондент АЭН РФ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Kim Konstantin Konstantinovich – member of Russian Academy of electrical engineering, Dr. Sc. (Eng), professor, Head of Department of Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I (Russia, Saint-Petersburg); 190031, Saint-Petersburg, Moscovsky av., 9. E-mail: kimkk@inbox.ru.



Мартьянов Михаил Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханические комплексы и системы» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9.

Mr. Michail V. Martjanov – Associate Professor of Department of Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I (Russia, Saint-Petersburg); 190031, Saint-Petersburg, Moscovsky av., 9.



Иванов Сергей Николаевич – доктор технических наук, доцент, начальник учебно-методического отдела Института новых информационных технологий Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681021, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Котовского, 1-60. E-mail: isn@initkms.ru.

Mr. Sergey N. Ivanov – Doctor of Engineering, head of educational Department, Institute of new information technologies Komsomolsk-on-Amur State Technical University. (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681021, Komsomolsk-on-Amur, Kotovsky str. 1-60. E-mail: isn@initkms.ru.



Просолович Алексей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматизированного проектирования» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681014, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Калинина, 41-40. E-mail: alpr72@mail.ru.

Mr. Aleksey A. Prosolovitch – Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University\$ (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681014, Komsomolsk-on-Amur, Kalinin str. 41-40. E-mail: alpr72@mail.ru.

Аннотация. В статье рассматриваются теоретические основы устойчивости процесса теплообмена в элементах герметичных электромеханических преобразователей. Приведены краткие результаты анализа расчетных методов, позволяющих проводить оценку влияния гидродинамических и тепловых параметров на исследуемые режимы работы энергетического оборудования с непосредственным охлаждением экранирующих элементов. Обосновывается выбор определяющих факторов и производится постановка задачи исследования с использованием универсальных программных сред.

Summary. The article discusses the theoretical basis of sustainability of the process of heat exchange elements in a sealed Electromechanical transducers. Brief results of the analysis of the computational methods that allow the assessment of the influence of hydrodynamic and thermal parameters of the investigated modes of operation of power equipment with direct cooling of the shielding elements. The selection of the determinants and made formulation of research objectives with the use of universal software environments.

Ключевые слова: герметичный электромеханический преобразователь, теплообмен, устойчивость, вектор скорости, температурное поле.

Key words: sealed electromechanical converter, heat transfer, stability, velocity vector, temperature field.

УДК 621.31: 621.25

Введение

Электромеханические преобразователи (ЭМП) традиционно составляют основу современных электротехнических комплексов, применяемых в различных сферах человеческой деятельности. Наиболее востребованными в настоящее время являются ЭМП, спроектированные с максимальным учетом условий удаленной эксплуатации. Наглядным примером такого оборудования являются разработки герметичных устройств, реализуемые крупнейшими мировыми производителями «Siemens», «Франклин Электрик Ойропа ГмбХ» и рядом других. В частности, фирмой «Siemens» предложен и испытан капсулированный компрессорный агрегат STC&ECO, обладающий повышенной безопасностью, увеличенным временем безотказной работы, длительным периодом межремонтного обслуживания (до 5 лет). Очевидно, что переход к герметичным (или капсулированным) электромеханическим преобразователям (ГЭМП) целесообразен и для отечественных объектов энергетики, нефтегазодобычи, транспорта [1, 2]. Более высокая стоимость герметичного устройства полностью компенсируется его надежной работой в самых тяжелых условиях даже без учета возможных простоев и ущерба при эксплуатации оборудования с более низкими степенями защиты от воздействия окружающей среды.

Повышение надежности наряду с возможностью увеличения удельной мощности по сравнению с однотипными преобразователями традиционного исполнения обеспечивается конструкцией ГЭМП, особенностью которой является наличие тонкостенного немагнитного цилиндрического экрана, охватывающего первичную обмотку. В большинстве случаев использование экрана из материала с высоким удельным электрическим сопротивлением практически не влияет на эксплуатационные характеристики преобразователя, однако при определенных условиях в нем могут выделяться дополнительные тепловые потери. Поскольку повышение теплового сопротивления между первичной обмоткой и экраном нецелесообразно, основным способом снижения температуры и устранения ее влияния на неподвижную часть ЭМП является непосредственное охлаждение экрана и утилизация отводимой тепловой мощности. Обеспечение эффективного теплоотвода в пространстве, ограниченном зазором между поверхностью экрана и вращающимся ротором, представляет собой сложную задачу, направленную на установление основных закономерностей процессов теплообмена с учетом конструктивных особенностей ГЭМП [3].

Постановка задачи исследования

Принципиальной трудностью реализации ГЭМП является целесообразность одновременного снижения влияния экрана на электромагнитные характеристики преобразователя, что уже на стадии проектирования приводит к необходимости минимизации зазора, и обеспечения достаточной интенсивности теплоотвода в условиях стесненной конвекции. Априорный анализ проектных параметров, определяющих теплообменные процессы в рассматриваемой области, показывает, что их можно разделить на две группы. Первая включает геометрические величины, к которым относятся внешний и внутренний диаметры d_1 , d_2 , длины капсулированного статора l_1 и ротора l_2 , толщина экрана Δ , величина зазора δ , характери-

ки профиля. Вторая группа – температура, скорость перемещения и физико-химические свойства охлаждающей жидкости.

При этом практика проектирования объектов энергетического машиностроения показывает:

- с уменьшением длины возрастает давление на отдельные элементы конструкции и возрастает расход хладагента через торцевые части;
- с увеличением длины возрастают потери на трение, следовательно, тепловые потери и ухудшается тепловой режим;

- малые соотношения l/d компенсируют неточности изготовления и монтажа.

Важным этапом расчета является выбор величины зазора:

- при малых зазорах легче обеспечивается гидродинамический режим работы, т.е. возрастает несущая способность и уменьшается минимально допустимая скорость вращения;
- при малых δ снижается опасность самовозбуждения автоколебаний;

- при малых зазорах давление более равномерно распределено на поверхности, следовательно, среднее расчетное давление меньше отличается от максимального;

- уменьшение зазора ведет к возрастанию потерь на трение и росту температуры;

- с уменьшением зазора снижается расход охлаждающей жидкости и ужесточается тепловой режим;

- при малых зазорах повышаются требования к точности изготовления и ее стоимость.

Очевидно, что учет только геометрических факторов при оценке эффективности теплообмена в зазоре ГЭМП уже представляет задачу, не имеющую однозначного аналитического решения вследствие своей избыточности. Для ее конкретизации на начальном этапе наиболее целесообразно использование методов имитационного моделирования, обеспечивающих не только учет размерных соотношений и профиля ограничивающих поверхностей, но и динамических характеристик режима работы ГЭМП, в частности, температуры экрана и скорости движения охлаждающей жидкости. В качестве программных продуктов, предназначенных для решения рассматриваемой задачи, можно использовать, например, ANSYS – универсальный пакет конечно-элементного анализа; для двумерных геометрических моделей интегрируемый в Matlab пакет Femlab; для гидродинамического расчета с использованием CFD-технологий пакет Solidworks, обеспечивающий анализ потока охлаждающих жидкостей (модуль Solidworks Flow Simulation) и содержащий интегрированные средства гидродинамики и теплообмена. Пакет ANSYS является наиболее мощным и позволяет учитывать даже фазовый переход жидкости, но при этом имеет сложный интерфейс и большое число параметров настройки программы. Пакет Solidworks обеспечивает возможность моделирования течения несжимаемой жидкости при любых числах Рейнольдса, создание расчетной параметрической трехмерной модели ГЭМП и формирование по ней расчетной сетки непосредственно по модели Solidworks, автоматическое создание расчетной области, задание составляющих скорости в объемах.

Исходным выражением в любом из используемых пакетов является уравнение теплопередачи, учитывающее явление вынужденной конвекции:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \text{div}(-\lambda \text{grad}\Theta + \rho c_p \Theta u) = q, \quad (1)$$

где c_p – удельная теплоемкость жидкости; ρ – ее плотность; Θ – температура; u – векторное поле скорости движения жидкости.

В уравнении (1) в скобках представлена плотность потока тепловой мощности. Она состоит из двух составляющих – кондуктивной и конвективной. Конвективная компонента (второе слагаемое) пропорциональна вектору скорости и связывает температуру экрана и скорость вращения ротора. При рассмотрении стационарного режима из уравнения (1) исключается слагаемое с производной температуры от времени. Несмотря на это, в свойствах

жидкости необходимо указывать значения теплоемкости и плотности, так как от них зависит количество энергии, которая переносится потоком жидкости.

Гидродинамический процесс перемещения охлаждающей жидкости в области исследования без учета теплообмена описывается системой уравнений движения (Навье-Стокса) и неразрывности:

$$\rho_{\text{ж}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + Q_i, \quad i, j = \overline{1 \dots 3},$$
$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0,$$

где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости; u_i – скорость жидкости в направлении оси i ; x_i – координата области расчета; p – давление; Q_i – составляющая объемных гравитационных сил; σ_{ij} – тензор турбулентных напряжений, определяемый по формуле

$$\sigma_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right),$$

где $\mu = \nu \rho_{\text{ж}}$ – динамическая вязкость, ν – кинематическая вязкость, определяемая суммой молекулярной ν_m и турбулентной ν_t вязкостей.

Поскольку точное решение уравнений движения (Рейнольдса) и неразрывности для неустановившегося трехмерного турбулентного движения в рассматриваемой постановке отсутствует, то возникает необходимость перехода от действительных скоростей к их средневременным значениям, связанным с первыми пульсационными проекциями.

Определение особых условий устойчивости

Анализ режимов работы ГЭМП позволяет сформулировать следующие критерии устойчивости теплоотвода, учитываемые при задании начальных и граничных условий:

- отсутствие радиального градиента температуры в характерных точках сечения зазора между экраном и вращающимся ротором, $grad \Theta = 0$;
- превышение допустимой температуры внутренней поверхности экрана, $\Theta_s \geq \Theta_{\text{max}}$;
- межфазные изменения в охлаждающей жидкости и снижение интенсивности теплообмена, $a \rightarrow \min$ (a – коэффициент теплопроводности).

Теоретический анализ устойчивости теплообмена

Теоретическое исследование гидродинамических течений в рассматриваемой области ГЭМП требует численного решения приведенных выше уравнений, описывающих режимы, ведущие к потере устойчивости с помощью построения гипотетических теорий или использованием асимптотических методов. Если режим движения жидкости рассматривать в виде течения Куэтта-Тейлора, то его можно характеризовать двумя составляющими скорости – осевой и радиальной, получаемыми из решения уравнений Навье-Стокса. Течение Куэтта-Тэйлора в зазоре между экраном и вращающимся ротором имеет форму ориентированных в осевом направлении встречных тороидальных вихрей, которые при критических значениях параметров вращения приводят к неустойчивости теплообмена (потеря устойчивости первого типа) [4].

Процесс теплообмена поверхности экрана с охлаждающей жидкостью в первом приближении (без учета краевых эффектов) может оцениваться по радиальной составляющей абсолютной скорости [3]. Очевидным критерием устойчивости этого процесса является переход к пленочному кипению и резкое снижение коэффициента теплоотдачи (потеря устойчивости второго типа).

Таким образом, решение рассматриваемой задачи сводится к определению гидродинамических и тепловых параметров, которые соответствуют двум типам потери устойчивости теплообмена в зазоре ГЭМП. При этом следует отметить, что наличие радиального потока жидкости от экрана к вращающемуся ротору не позволяет непосредственно использовать

результаты классических исследований, основанных на предположении, что потеря устойчивости первого вида возникает вследствие вторичных стационарных течений, не зависящих от отдельных объемных составляющих (вихри Тейлора). Существование принципиально более сложных течений жидкости (автоколебания с нелинейными волнами, аperiodические мультичастотные и турбулентные случайные пульсации) указывает на необходимость учета зависимости интенсивности радиальной составляющей скорости потока, являющейся причиной бифуркации возникновения вторичных вихрей, от величины критерия Рейнольдса для радиальной скорости. Использование теории бифуркаций в рассматриваемой задаче позволяет проследить последовательность возникновения и развития трехмерных вихрей путем решения исходных нестационарных трехмерных уравнений Навье-Стокса прямым численным моделированием (ПЧМ) без осреднения скоростей в потоке. Этот метод требует высокого разрешения пространственных и временных широкоспектральных составляющих вихрей и соответственно существенных программно-аппаратных ресурсов, что сужает прикладную область анализом течений при значениях Re меньших 10^3 , т.е. ламинарными и частично смешанными течениями априорно несоответствующих турбулентному характеру движения жидкости. Поэтому хотя ПЧМ имеет большие перспективы в ряде случаев целесообразно использовать другие промежуточные вычислительные алгоритмы. Одним из вариантов является спектральная фильтрация составляющих скорости, приводящая к разложению переменных в уравнениях Навье-Стокса с использованием масштабируемого фильтра.

Другой метод – моделирование отсоединенных вихрей – объединяет расчет безотрывных течений с расчетом потоков с протяженными отрывными областями.

При оценке потери устойчивости второго типа решается уравнение теплопереноса (1), выраженное через средневременные значения скоростей и температуры. Основными допущениями при этом являются отсутствие теплопереноса конвекцией средними составляющими скорости и исключительный теплообмен пульсациями вихрей, кроме этого теплофизические характеристики охлаждающей жидкости задаются для температуры экрана.

Предварительный анализ зависимости потери устойчивости первого типа показывает, что наиболее значимым фактором может быть выбрана окружная скорость вращающегося ротора, непосредственно определяющая радиальную составляющую и число Рейнольдса. Соответственно в качестве функции отклика принимается плотность вихрей, т.е. их количество на единицу длины экрана в осевом направлении. Для количественного учета факторов, приводящих к потере устойчивости второго типа, необходима информация о распределении тепловых полей в элементах ГЭМП. В частности, при выборе краевых условий могут быть использованы результаты критериального анализа зависимости температуры экрана от его толщины при различной частоте питающего напряжения [5].

Заключение

Проведенный анализ основных факторов и режимов, теоретически характеризующих возможность потери устойчивости теплообмена в элементах герметичных электромеханических преобразователей, показал, что при ее исследовании необходимо рассматривать одновременно два процесса: один обусловлен турбулентным движением охлаждающей жидкости в зазоре между поверхностью экрана и вращающимся ротором, второй – наличием распределенного источника тепловой мощности. В качестве основных независимых переменных соответственно могут быть выбраны радиальная компонента скорости движения в исследуемой области и начальная температура внутренней поверхности экрана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ким, К. К. Analysis of the influence of design factors on the winding reliability of the heating electro-mechanical transducers / К. К. Ким, Н. С. Карпова, О. В. Приходченко // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2013. – Вып. 2(35). – С. 26-31.
2. Анализ влияния конструкционных факторов на надежность герметичных электромеханических преобразователей / К. К. Ким, Д. А. Голоколос, Н. С. Карпова, С. Н. Иванов // Ученые записки Ком-



сомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2013. – № IV-1(16). – С. 29-34.

3. Иванов, С. Н. Энергетические соотношения в герметичных электротехнических комплексах специального назначения / Д. А. Голоколос, Г. М. Гринфельд, С. Н. Иванов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2014. – № III-1(19). – С. 4-10.

4. Колесов, В. В. Расчет стационарных, периодических и квазипериодических движений вязкой жидкости между двумя вращающимися проницаемыми цилиндрами / В. В. Колесов, М. Н. Романов // Механика жидкости и газа – 2010. – № 6. – С. 53-62.

5. Приходченко, О. В. Математическое моделирование и анализ электромагнитных и тепловых процессов в электромеханических теплогенерирующих преобразователях / О. В. Приходченко // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № III-1(7). – С. 27-37.

Сариллов М. Ю., Еренков О. Ю., Отряскина Т. А.
M. J. Sarilov, O. J. Erenkov, T. A. Otryaskina

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ

FORECASTING PARAMETERS OF SURFACE ROUGHNESS AT ELECTROSPARK PROCESSING

Сариллов Михаил Юрьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sarilov@knastu.ru.

Mr. Mikhail Yu. Surilov – D.Sc. in Engineering, Professor, Head of the Department of Chemical Industry Machinery and Equipment, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Komsomolsk-on-Amur. E-mail: sarilov@knastu.ru.

Еренков Олег Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: erenkov@list.ru.

Mr. Oleg Yu. Yerenkov – D.Sc. in Engineering, Professor, Department of Chemical Industry Machinery and Equipment, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Komsomolsk-on-Amur. E-mail: erenkov@list.ru.

Отряскина Татьяна Александровна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: knastu2000@mail.ru.

Ms. Tatiana A. Otryaskina – PhD in Engineering, Senior Lecturer, Department of Chemical Industry Machinery and Equipment, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Komsomolsk-on-Amur. E-mail: knastu2000@mail.ru.

Аннотация. Электроэрозионная обработка (ЭЭО) является прогрессивным методом, позволяющим обрабатывать труднообрабатываемые материалы. Недостатком ЭЭО является сложность прогнозирования результатов обработки (шероховатость), поскольку процесс формирования обработанной поверхности зависит, помимо режимов обработки, еще и от материала электрода и заготовки, от рабочей жидкости и т.д. Эти параметры не взаимосвязаны, следовательно, каждый из них оказывает свое влияние на ход процесса. Поэтому исследование закономерностей изменения шероховатости в зависимости от режимов обработки и выбор критерия оценки и контроля процесса формирования шероховатости являются актуальными научно-практическими задачами.

Summary. Electrosparking is a promising method for processing tough-to-machine materials. One of its disadvantages is the problem of forecasting the results of machining (roughness). This is due to the fact that the process of shaping the machined surface also depends - besides processing modes - on the material of the electrode and the blank, on the dielectric fluid, etc. These parameters don't stand in relation to each other, therefore, each of them brings in its own impact upon the process. Therefore, a study of the patterns of roughness change depending on the modes of machining, and of the choice of assessment&control criterion for roughness creation is a vital theoretical and practical task.

Ключевые слова: шероховатость, скважность, фрактальная размерность, электроэрозионная обработка.

Key words: roughness, porosity, fractal dimension, electrospark machining.

Введение

Стремительный прогресс авиационной, ракетной, атомной и электронной техники, инструментального производства и приборостроения вызвал необходимость в применении материалов, механическая обработка которых может быть осуществлена лишь с большим трудом или вообще невозможна. К ним относятся материалы с очень высокой твердостью, хрупкостью, вязкостью, а также материалы, обладающие магнитными свойствами. Особые трудности возникают при фасонной обработке таких материалов. Острая необходимость эффективно обрабатывать детали сложной формы из материалов, трудно обрабатываемых резанием, предопределила возникновение ряда новых методов, к которым относится электроэрозионная обработка.

Главным достоинством электроэрозионной обработки (ЭЭО) является возможность обрабатывать любые токопроводящие материалы независимо от их твердости и плотности. Однако сдерживающим фактором интенсивного применения ЭЭО является проблема достижения требуемых параметров шероховатости обработанной поверхности.

Получаемая шероховатость поверхности в первую очередь зависит от режимов обработки, а для ЭЭО – от частоты следования импульсов, скважности, напряжения и силы тока. Поэтому исследование закономерностей изменения шероховатости в зависимости от режимов обработки и выбор критерия оценки и контроля процесса формирования шероховатости поверхности после ЭЭО является актуальной научно-практической задачей, решение которой позволит выпускать более качественную продукцию и повысить эффективность технологического процесса.

Цель работы: обоснование возможности использования фрактальной размерности для оценки процесса формообразования и проведение экспериментальных исследований для установления взаимосвязи между величиной фрактальной размерности и значениями шероховатости поверхности.

Методика исследований

Известно, что ЭЭО имеет нестационарный характер [1; 2], в связи с чем для исследования и оценки данного процесса следует применять критерии нелинейной динамики. В нелинейной динамике в качестве критериев для оценки устойчивости используется фрактальная размерность, показатель Ляпунова и информационная энтропия [3; 4]. Основное достоинство этих критериев – возможность количественной оценки устойчивости процесса. В том случае, когда процесс зависит не менее чем от трех независимых параметров, целесообразно в качестве диагностического критерия использовать фрактальную размерность.

Процесс формирования обработанной поверхности при ЭЭО зависит, помимо режимов обработки, еще и от материала электрода и заготовки, от рабочей жидкости и т.д. Эти параметры не взаимосвязаны, следовательно, каждый из них оказывает свое влияние на ход процесса, степень его организованности или хаотичности. Степень хаотичности процесса характеризует фрактальная размерность. Для её вычисления необходимо иметь множество точек, определенных в фазовом пространстве и принадлежащих аттрактору [4].

Поверхность после ЭЭО является шероховатой, а ее профиль состоит из множества точек, в связи с чем он обладает фрактальными свойствами: самоподобием и иерархичностью.

В настоящее время существуют три наиболее известных метода расчета фрактальных размерностей: метод подсчета ячеек [5; 6], метод Грассберга-Прокаччия [6], метод расчета поточечной размерности [7]. Последний метод является наиболее точным и наименее трудоемким по сравнению с остальными, в связи с чем все расчеты производились с помощью данного метода. Для расчета фрактальной размерности использовалась специально разработанная в ФГБОУ ВПО «КнАГТУ» программа «DynAnalyzer».

Для получения экспериментальных данных по установлению взаимосвязи между величиной фрактальной размерности и значениями шероховатости и параметров ЭЭО использовалась экспериментальная установка и известная методика [4]. Основу установки состав-

ляют копировально-прошивочный электроэрозионный станок с адаптивным управлением модели 4Л721Ф1 и генератор импульсов ШГИ 40-440М. В качестве исследуемых материалов применялись алюминиевый сплав АК34 и титановый сплав ВТ20. В качестве рабочей жидкости использовался осветительный керосин КО-30 ГОСТ 4753-68 [8]. Параметры режимов изменялись в следующих диапазонах: скважность – от 1 до 4; частота импульсов – от 10 до 450 кГц.

Для снятия профилограммы, характеризующей профиль поверхности образца, использовался профилометр 296. Пример профилограммы обработанной поверхности образца из сплава ВТ20 приведен на рис. 1.

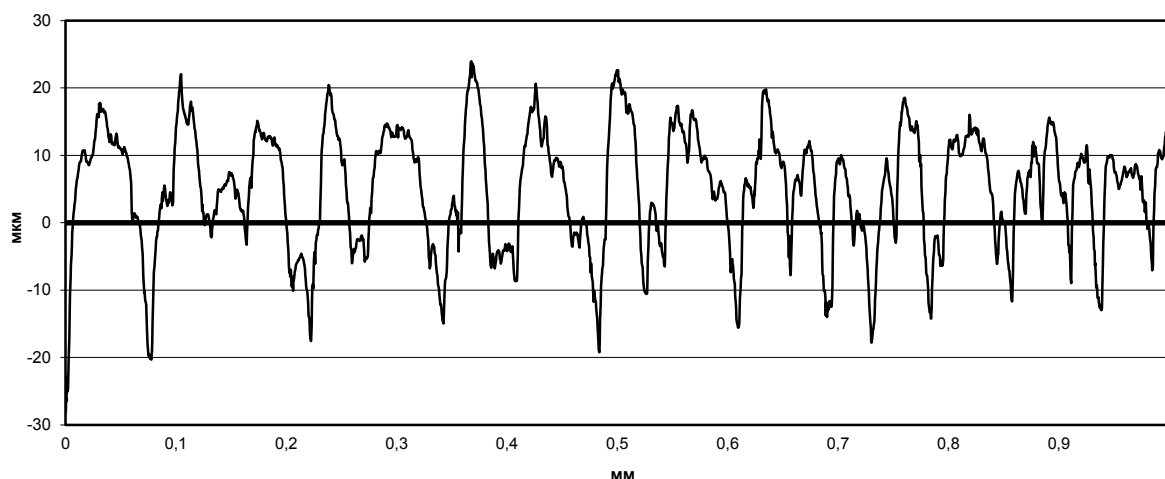


Рис. 1. Профилограмма для образца из титанового сплава ВТ20

Такую профилограмму можно рассматривать как временной ряд, т.е. как «случайное» хаотическое множество [9], а алгоритмы обработки результатов измерений позволяют рассчитать фрактальную размерность D_0 той или иной профилограммы.

Результаты исследований и их обсуждение

Экспериментальные данные по влиянию основных параметров ЭЭО, а именно частоты импульсов и скважности на величину параметра R_a шероховатости обработанной поверхности детали, представлены на рис. 2, 3. Анализ представленных данных позволяет сделать вывод о том, что для исследуемых материалов имеет место снижение уровня шероховатости с увеличением как частоты следования импульсов (см. рис. 2), так и с увеличением значений скважности (см. рис. 3).

Объясняется это тем, что с увеличением частоты следования импульсов уменьшается время контакта импульса с заготовкой, а с ростом значений скважности увеличивается пауза между рабочими импульсами, что приводит, в свою очередь, к сокращению времени воздействия энергии импульса, подводимой к инструменту, на локальный участок заготовки. При этом производятся изменения в структуре материала обрабатываемой поверхности на меньшую глубину (по сравнению с вариантом ЭЭО с невысокими значениями частоты импульсов и скважности). Это также объясняет причину сокращения количества металла [10], удаленного в жидкой фазе, что приводит к уменьшению искажения дна лунок и, как следствие, к уменьшению шероховатости обработанной поверхности.

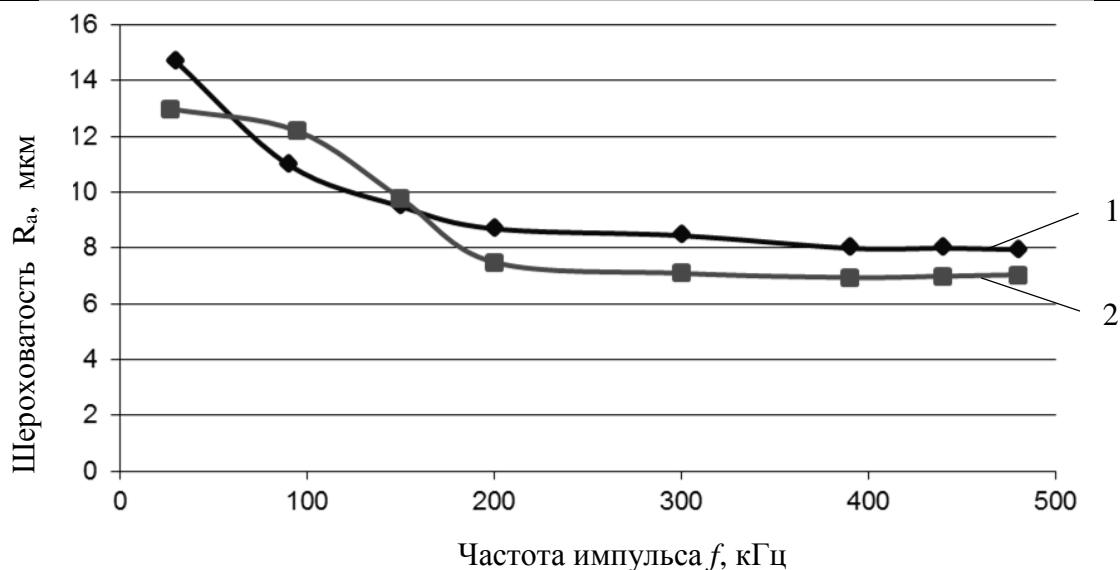


Рис. 2. Зависимость шероховатости от частоты следования импульсов:
1 – алюминиевый сплав АК34; 2 – титановый сплав ВТ20

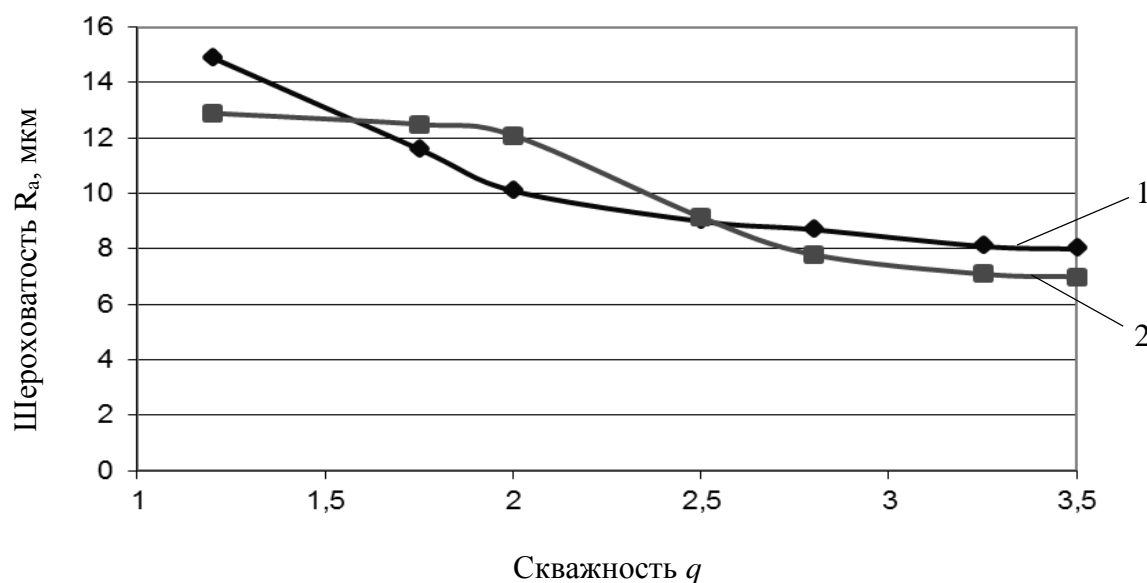


Рис. 3. Зависимость шероховатости от скважности:
1 – алюминиевый сплав АК34; 2 – титановый сплав ВТ20

Взаимосвязь между величиной фрактальной поверхности шероховатости и режимами ЭЗО представлена экспериментальными данными на рис. 4, 5.

Для всех исследуемых материалов значение фрактальной размерности шероховатости уменьшается с увеличением скважности (см. рис. 4). Это связано с тем, что при больших значениях скважности увеличивается пауза между рабочими импульсами, что позволяет стабилизировать процесс ЭЗО, т.е. снижается степень его хаотичности [8]. Из графиков на рис. 5 видно, что с увеличением частоты следования импульсов уменьшается значение фрактальной размерности. Этот факт можно объяснить следующим образом: при увеличении частоты следования импульса уменьшается период воздействия импульса на обрабатываемую поверхность, и за счёт этого уменьшается глубина образующихся лунок, что приводит к общему улучшению шероховатости поверхности. В этой связи процесс формирования поверхности при обработке становится самоподобным и устойчивым, что отражается на уменьшении значения фрактальной размерности.

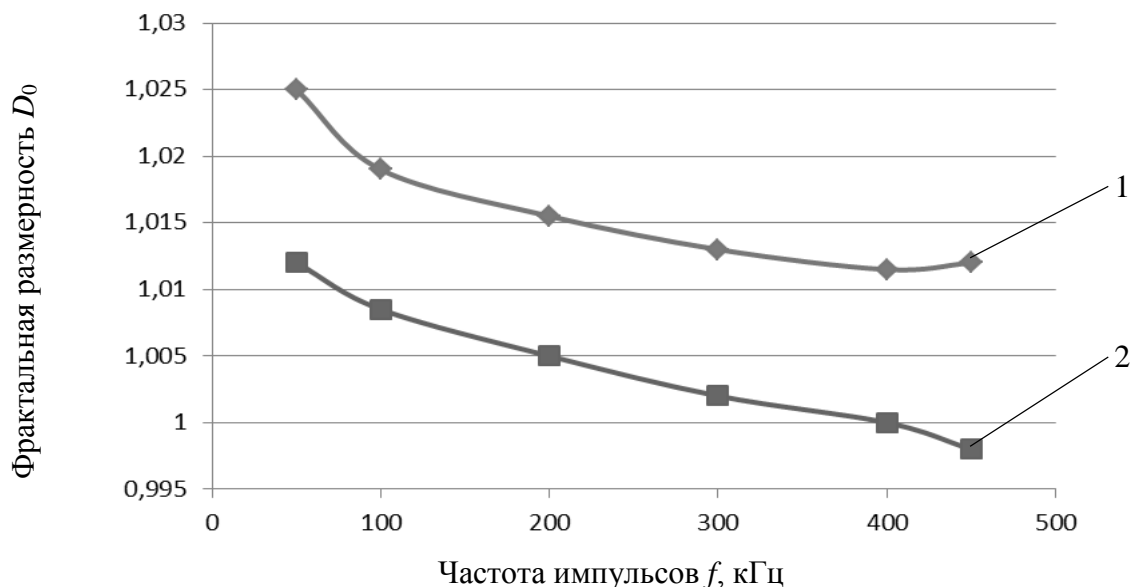


Рис. 4. Зависимость фрактальной размерности от частоты следования импульсов:
1 – алюминиевый сплав АК34; 2 – титановый сплав ВТ20

Совместный анализ зависимостей, представленных на рис. 2 – 5, показывает, что характеры зависимостей шероховатости R_a и фрактальной размерности D_0 от параметров обработки самоподобны. В результате проведенного корреляционного анализа полученных экспериментальных данных было установлено, что существует сильная корреляционная связь между фрактальной размерностью и шероховатостью поверхности после ЭЭО, о чем свидетельствуют значения коэффициентов корреляции 0,84 и 0,91 для сплава АК34 и ВТ20 соответственно. Этот факт позволяет применять фрактальную размерность в качестве диагностирующего признака при оценке шероховатости поверхностного слоя в процессе ЭЭО, т.е. фрактальная размерность может являться параметром управления процессом ЭЭО и эффективно использоваться в системах адаптивного управления электроэрозионным оборудованием.

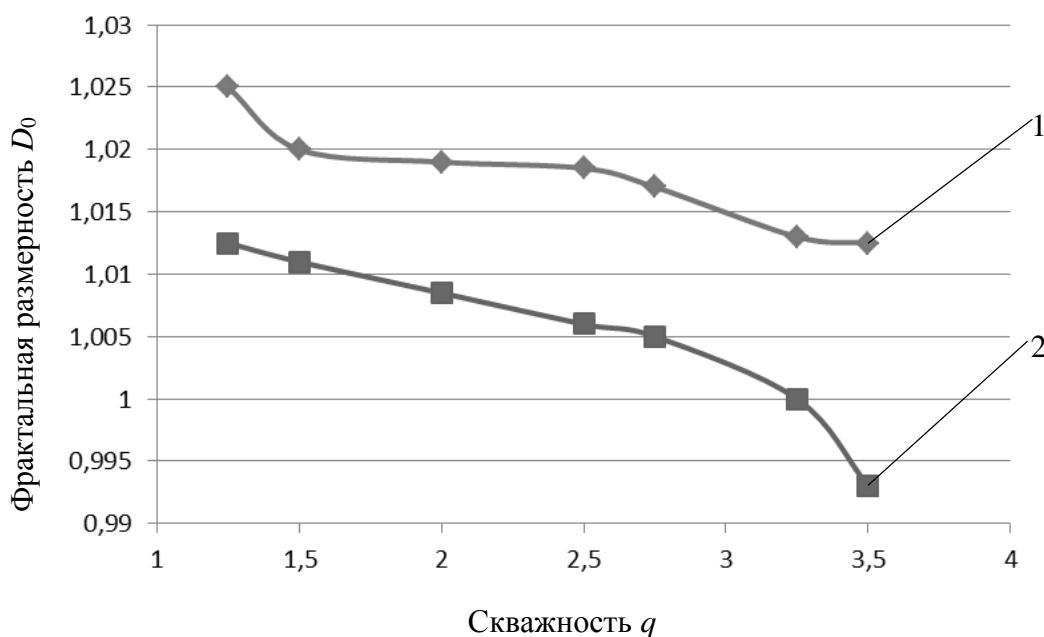


Рис. 5. Зависимость фрактальной размерности от скважности:
1 – алюминиевый сплав АК34; 2 – титановый сплав ВТ20

Заключение

На основании полученных результатов исследований можно сделать следующие выводы:

- научно обоснована возможность использования фрактальной размерности в качестве критерия для оценки устойчивости процесса формирования шероховатости поверхности после электроэрозионной обработки;
- экспериментально установлен характер изменения шероховатости поверхности после ЭЭО для алюминиевого сплава АК34 и титанового сплава ВТ20, а также характер изменения фрактальной размерности в зависимости от основных параметров процесса, а именно от частоты следования импульсов и скважности; при этом ЭЭО сплава ВТ20 является более устойчивой и эффективной;
- существует устойчивая корреляционная связь между фрактальной размерностью и шероховатостью поверхности после ЭЭО, что позволяет производить контроль шероховатости обрабатываемой поверхности в режиме реального времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Greenside, H. S. Impracticality of a box counting algorithm for calculating the dimensionality of strange attractors / H. S. Greenside, A. Wolf, J. Swift, T. Pignuaro // Phys. Rev. A. 25 (1982). № 6. P. 3453-3456.
2. Kobayashi, K. The Present and Future Developments of EDM and ECM / K. Kobayashi // Proc. Intern. Symp. Electromachining (ISEM-XI). Switzerland, 1995. P. 29-48.
3. Кабалдин, Ю. Г. Управление динамическими процессами в технологических системах механообработки на основе искусственного интеллекта / Ю. Г. Кабалдин, С. В. Биленко, С. В. Серый. – Комсомольск-на-Амуре : ГОУВПО «КНАГТУ», 2003. – 201 с.
4. Кабалдин, Ю. Г. Повышение устойчивости процесса электроэрозионной обработки и качества обработанной поверхности на основе подходов искусственного интеллекта / Ю. Г. Кабалдин, М. Ю. Сариков, С. В. Биленко. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КНАГТУ», 2007. – 191 с.
5. Малинецкий, Г. Г. Современные проблемы нелинейной динамики / Г. Г. Малинецкий, А. Б. Потапов. – М.: Эдиториал УРСС, 2000. – 336 с.
6. Мун, Ф. Хаотические колебания / Ф. Мун; пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 472 с.
7. Федер, Е. Фракталы / Е. Федер; пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
8. Электроимпульсная обработка металлов / А. Л. Лифшиц, А. Т. Кравец, И. С. Рогачев [и др.]. – М.: Машиностроение, 1967. – 198 с.
9. Электроэрозионная обработка материалов / М. К. Мицкевич, А. И. Бушин, И. А. Бакуто [и др.]; под ред. И. Г. Некрашевича. – Минск: Наука и техника, 1988. – 216 с.
10. Золотых, Б. Н. Физические основы электроэрозионной обработки / Б. Н. Золотых, Р. Р. Мельдер. – М.: Машиностроение, 1977. – 42 с.
11. Ким, В. А. Мезомеханика процесса стружкообразования при обработке металлов / В. А. Ким, М. Ю. Сариков, Т. А. Отряскина // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2014. – № III-1(19). – С. 52-69.

Серебренникова А. Г., Козлова М. А.
A. G. Serebrennikova, M. A. Kozlova

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ СТАЛИ 12X18H10T

IMPLEMENTATION OF METHOD OF OPTIMUM CUTTING SPEED DETERMINATION IN THE PROCESSING OF STEEL 12X18H10T



Серебренникова Анжела Геннадьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: S_angel@kmscom.ru.

Ms. Anzhela G. Serebrennikova – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering Technology (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, 27 Lenina pr., Komsomolsk-on-Amur. E-mail: S_angel@kmscom.ru.



Козлова Мария Андреевна – магистр кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: makozlova91@gmail.com.

Ms. Maria A. Kozlova – undergraduate/master/graduate Department of Mechanical Engineering Technology (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, 27 Lenina pr., Komsomolsk-on-Amur. E-mail: makozlova91@gmail.com.

Аннотация. В статье рассмотрен пример реализации экспресс-метода определения скорости резания при обработке стали 12X18H10T по равнодействующей силе резания P и мощности резания W . Описана методика проведения экспериментов, подтверждающих данный экспресс-метод.

Summary. The article describes the example of the rapid method of determining the cutting speed in the processing of steel 12X18H10T of the resultant cutting force P and cutting power W . The technique of experiments confirming the express-method.

Ключевые слова: титан, коррозионностойкие стали, труднообрабатываемые материалы, точение, равнодействующая сила резания P , мощность резания W .

Key words: titanium, stainless steel, hard materials, turning, still-operating cutting force, cutting power.

УДК 621.91.01

Непрерывное повышение требований к качеству готовых изделий, их долговечности и надежности вызывает необходимость применения определенных групп материалов, обладающих высокой механической прочностью, износостойкостью, коррозионной стойкостью, жаропрочностью. К материалам с такими свойствами относятся сплавы на основе титана и коррозионностойкие стали – материалы группы труднообрабатываемых.

Теоретическое обоснование процесса обработки материалов данной группы приведено в статьях [1 – 3]. В данной работе представлена реализация экспресс-метода определения оптимальной скорости резания.

Рассмотрим такой показатель, как мощность резания в виде функции скорости резания. В соответствии с известными зависимостями механики имеем:

$$W(V) = \frac{dA}{dt} = \frac{\int P(V) ds}{dt} = \int P(V) \frac{ds}{dt} = \int P(V) dV, \quad (1)$$

где A – работа резания, Дж; P – сила резания, Н; V – скорость резания, м/с.

Представим «падающую характеристику» силы резания в обобщенном виде какой-либо монотонно убывающей, например гиперболической, функции:

$$P_z(V) = C_1 + \frac{C_2}{V}, \quad (2)$$

где C_1, C_2 – некоторые коэффициенты.

Подставив выражение (2) в формулу (1), получим мощность резания в виде

$$W(V) = \int \left(C_1 + \frac{C_2}{V} \right) dV = \tilde{N}_1 V + C_2 \ln(V) + C_3. \quad (3)$$

В обобщенном виде графики функций $P(V)$ и $W(V)$ приведены на рис. 1.

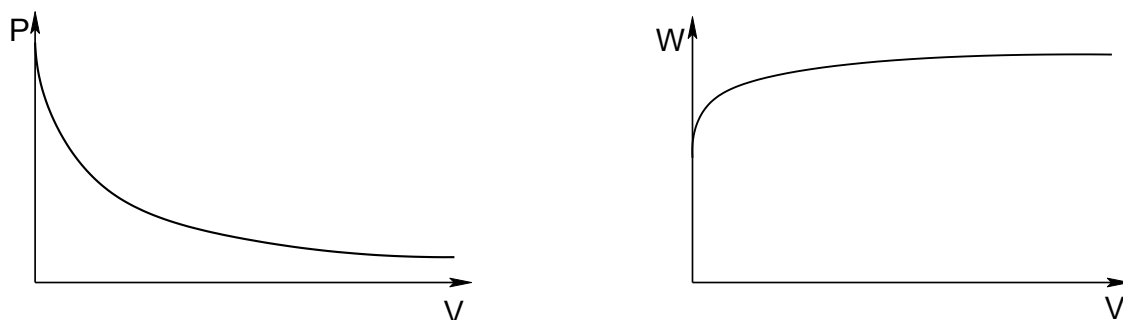


Рис. 1. Обобщенные графики зависимостей мощности W и силы резания P от скорости V

Пользуясь языком математического анализа и рассматривая мощность как функцию скорости, можно сказать, что выражение (3) является ограниченной сверху функцией, т.е.

$$\lim_{V \rightarrow \infty} W(V) < \text{const.}$$

Таким образом, границы диапазона оптимальных скоростей резания можно определить как такие значения скоростей, при которых значительное их увеличение не приводит к заметному росту мощности резания, при этом температура и равнодействующая сила резания принимают минимальные значения[6].

Тогда практическая задача сводится к определению границ этого диапазона. Теоретической методики такого расчета пока не создано, поэтому оптимальным (на данном этапе) является экспериментальный метод исследования.

Для подтверждения выдвинутой гипотезы был разработан лабораторно-исследовательский комплекс на базе станка 16K20 и лабораторного стенда SND201-2.

На рис. 2 представлен общий вид лабораторно-исследовательского комплекса. Основным элементом выступает динамометр STD201-2, который функционально состоит из головки-резцедержателя, интерфейсного блока, модуля подключения датчиков, персонального компьютера и комплекта кабелей.

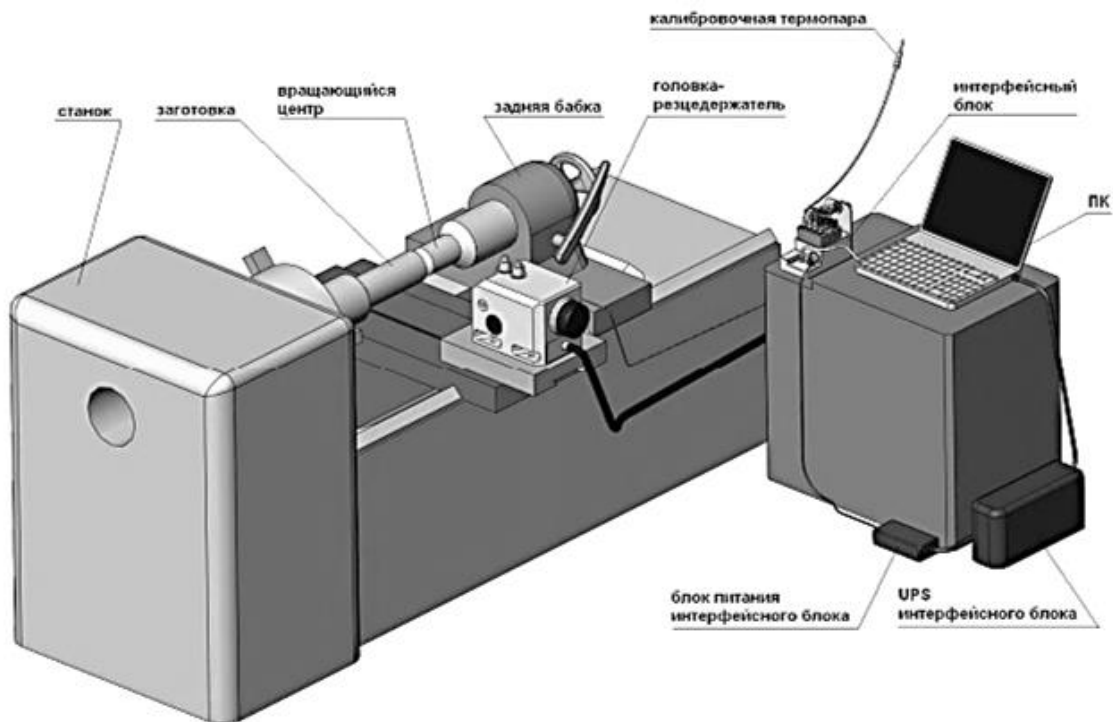


Рис. 2. Схема расположения лабораторно-исследовательского комплекса

В экспериментах использовались диски толщиной $b = 3$ мм и диаметром 180 мм из материала 12X18H10T. Характеристики данного типа материалов были рассмотрены выше.

Базовое программное обеспечение динамометра STD201-2, который входит в программно-аппаратный комплекс (ПАК), позволяет провести регистрацию сил резания и вибраций, вывести полученные значения в виде примитивных графиков и таблицы значений (рис. 3). Это не позволяет в полной мере провести исследование полученных данных, поэтому для более детального их анализа были разработаны алгоритм и программа, входящая в комплекс.

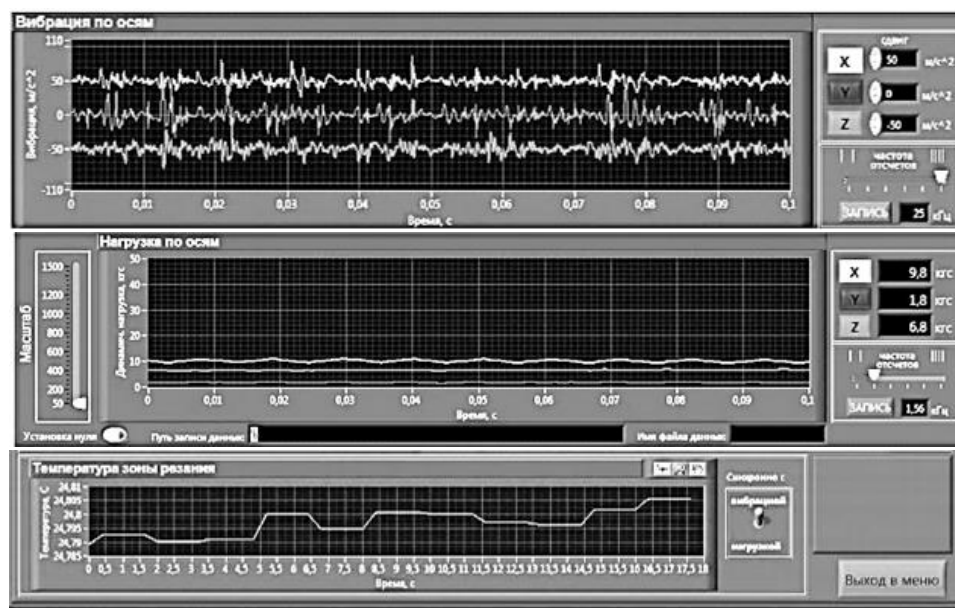


Рис. 3. Примеры регистрации параметров на динамометре STD201-2

Программа реализована средствами программной среды MathLAB. Для её работы необходимо наличие установленного пакета MathLAB на компьютере пользователя. Преимущество выбранного подхода к реализации программы заключается в скорости обработки данных. Например, при самой низкой дискретизации за время $T = 100$ с регистрируется около 400 тыс. значений по каждой из осей по силе и более 1 млн значений по температуре. Скорость обработки этих данных в программе не превышает 80 с.

Окно программы для ввода исходных данных представлено на рис. 4.

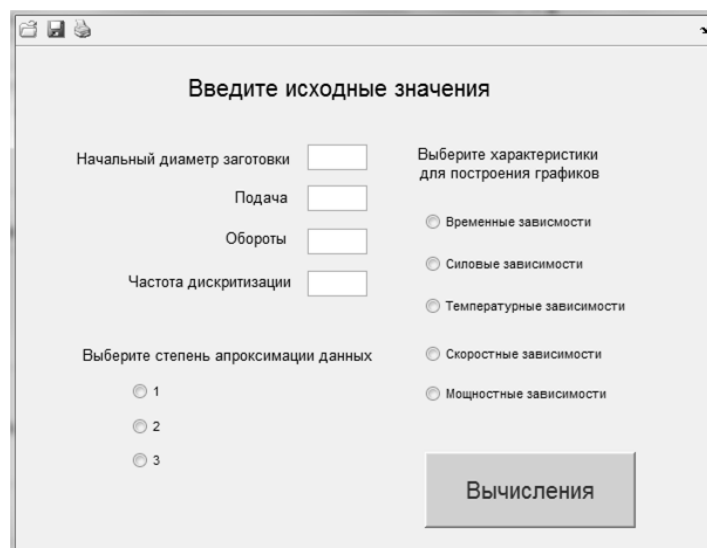


Рис. 4. Окно программы для ввода исходных данных

Исходные данные передаются в программу в виде файлов MS Office Excel, которые формирует ПАК. Далее программа считывает исходные значения и формирует массив данных для последующих расчетов и анализа. Программа исключает возможную погрешность при ручном анализе данных и позволяет пользователю моделировать различные зависимости при помощи графиков.

Методика проведения эксперимента

1. Установить и закрепить заготовку в специальном приспособлении в патроне токарно-винторезного станка 16K20, поджать задним центром. Способ крепления дисков представлен на рис. 5.

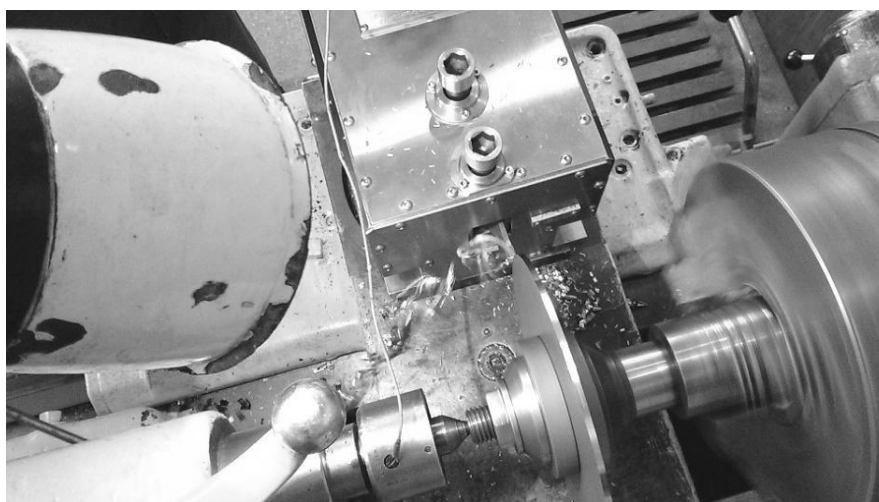


Рис. 5. Процесс обработки диска

2. Закрепить резец в люльке резцедержателя лабораторного стенда SND201-2 (см. рис. 5).
3. Установить режимы обработки: частоту вращения n , подачу S .
4. Провести процесс обработки.
5. В процессе обработки дисков ведется прием и перевод интерфейсным блоком динамических сигналов, поступающих с динамометра, в электрические, поступающие в системный блок компьютера для записи на жесткий диск.
6. После обработки данных в программной среде STD201-2, отображающей полученные значения на мониторе компьютера в виде графиков, происходит сохранение полученных значений в Excel-файле в виде ряда числовых значений. Пример вывода данных в Excel представлен на рис. 6.

	A	B	C	D	E	F
1	Время, с - Strain0 ()	Динамич. нагрузка, кгс - Strain0 ()	Время, с - Plot 1	Динамич. нагрузка, кгс - Plot 1	Время, с - Plot 2	Динамич. нагрузка, кгс - Plot 2
2	0	-2,25	0	44,54	0	20,13
3	0	-4,43	0	29,69	0	8,02
4	0	-3,68	0	48,82	0	27,56
5	0	-1,54	0	51,55	0	44,64
6	0,01	-0,7	0,01	35,95	0,01	9,3
7	0,01	2,88	0,01	41,02	0,01	11,51
8	0,01	4,49	0,01	46,3	0,01	44,78
9	0,01	-2,04	0,01	32,62	0,01	11,15
10	0,01	-5,61	0,01	33,14	0,01	-1,39
11	0,01	-1,51	0,01	37,82	0,01	31,74
12	0,01	0,72	0,01	41,08	0,01	23,56
13	0,01	2,71	0,01	53,95	0,01	26,11

Рис. 6. Пример вывода данных в Excel

7. Провести обработку сведенных усредненных значений в разработанной программе анализа данных.
8. Построить графики зависимостей параметров от времени и от скорости. Проанализировать получившиеся графики (рис. 7 – 9).

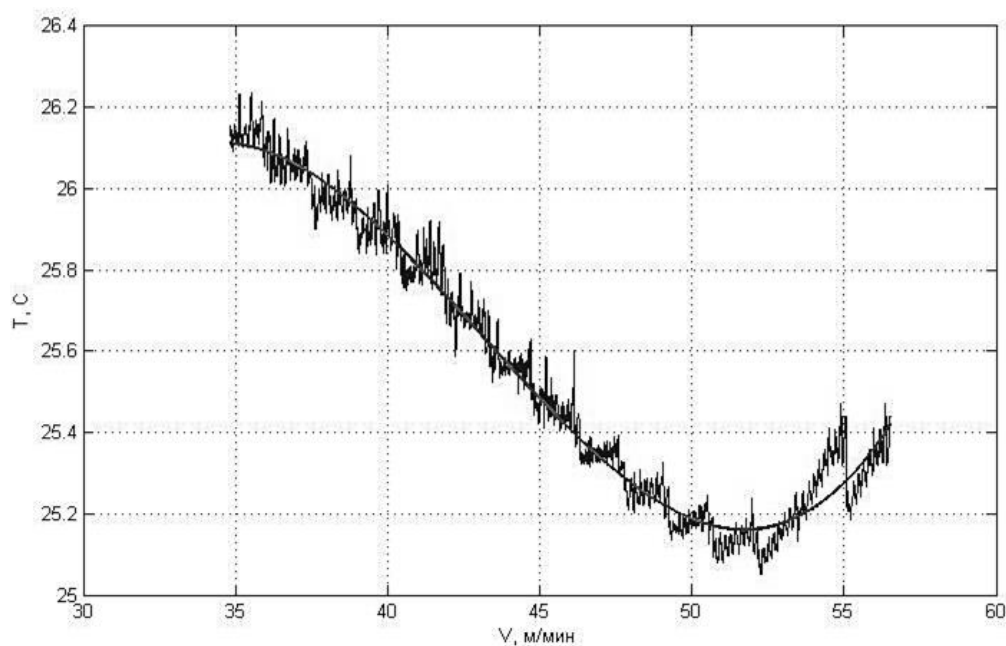


Рис. 7. График зависимости температуры резания T от скорости резания V

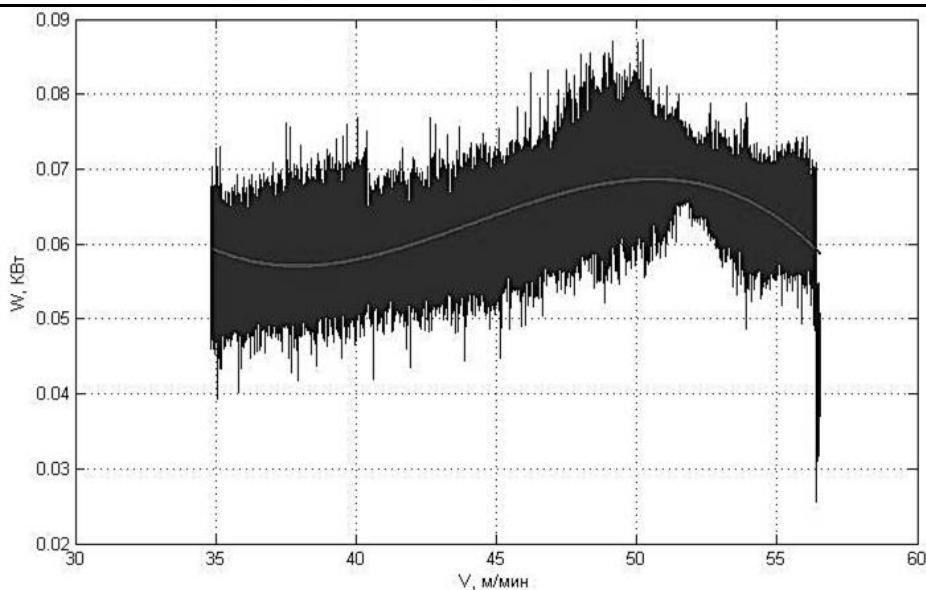


Рис. 8. График зависимости мощности резания W от скорости резания V

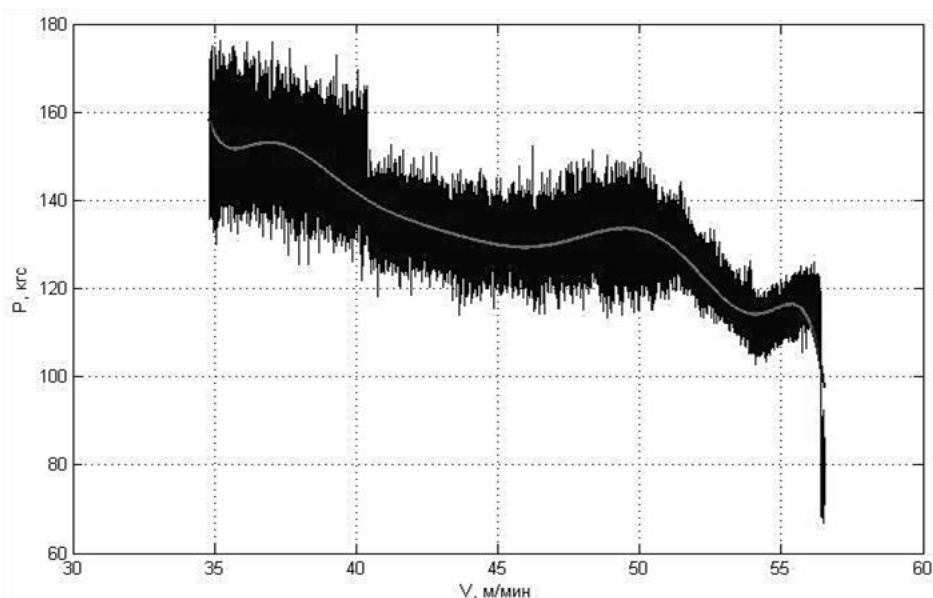


Рис. 9. График зависимости равнодействующей силы резания P от скорости резания V

Алгоритм обработки полученных значений

1. Расчет текущего диаметра D_i :

$$D_i = D_0 - \frac{S_{об} \cdot n \cdot T_i}{60},$$

где $D_0 = 180$ мм – начальный диаметр диска; T – текущее время, с; $S_{об}$ – подача на оборот, мм/об; n – частота вращения шпинделя, мин⁻¹.

2. Расчет текущей скорости V_i :

$$V_i = \frac{\pi \cdot D_i \cdot n}{1000}.$$

3. Расчет равнодействующей силы резания:

$$D = \sqrt{P_z^2 + P_y^2 + P_x^2}.$$

4. Расчет мощности резания:

$$N_{\text{дв}} = \frac{P_z \cdot V}{60 \cdot 102} + \frac{P_x \cdot S \cdot n}{1000 \cdot 60 \cdot 102}.$$

Коэффициенты в знаменателях дробей выражают перевод единиц измерения: 60 – минуты в секунды, 1000 – миллиметры в метры, 102 – ньютон на метр в секунду в киловатты.

Анализ результатов эксперимента

Исходные данные эксперимента были подобраны из расчета максимальной рекомендованной скорости резания, при которой работа станка проходит в стабильном рабочем режиме.

Исходные данные при обработке нержавеющей стали 12Х18Н10Т: $D_0 = 180$ – начальный диаметр диска, мм; $S = 0,07$ – подача, мм/об; $n = 100$ – частота вращения, об/мин.

Минимальные и максимальные значения основных характеристик анализируемых дисков приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сводная таблица данных по трем дискам материала 12Х18Н10Т

Номер диска	Характеристика	Минимальное значение	Максимальное значение
1	P_x , кгс	-2,975	6,29
	P_y , кгс	4,28	125,4
	P_z , кгс	-15,6	125,1
	P , кгс	5,299	163,7
	T , °С	25,14	25,44
	V , м/мин	56,5	34,81
	W , кВт	-0,01	0,08
2	P_x , кгс	-10,39	-1,9
	P_y , кгс	61,128	153,17
	P_z , кгс	20,95	148,22
	P , кгс	75,85	199,19
	T , °С	24,93	27,22
	V , м/мин	56,52	34,07
	W , кВт	0,00185	0,09
3	P_x , кгс	-7,43	3,06
	P_y , кгс	75,81	117,66
	P_z , кгс	29,9	123,5
	P , кгс	89,06	159,9
	T , °С	72,1	223,7
	V , м/мин	56,5	40,43
	W , кВт	0,027	0,1

Средние значения характеристик анализируемых дисков приведены в табл. 2.

Таблица 2

Средние значения характеристик анализируемых дисков

Характеристика	Минимальное значение	Максимальное значение
P_x , кгс	-6,93	2,48
P_y , кгс	47,07	132,08
P_z , кгс	11,75	132,27
P , кгс	56,74	174,26
T , °С	40,72	92,12
V , м/мин	56,51	36,44
W , кВт	0,01	0,09

Сравним эмпирически полученные значения оптимальной скорости резания, определенные по графикам зависимости мощности резания от скорости, с теоретическими значениями (табл. 3).

Таблица 3

Сравнение эмпирических и теоретических значений

Скорость резания	Эмпирическое значение, м/мин	Теоретическое значение, м/мин
V_1	52	30 – 56
V_2	54	
V_3	55	

Эмпирически определенное значение скорости резания входит в интервал рекомендуемых значений. Экспресс-метод определения оптимальной скорости работает верно. Исходя из этого, можно предположить, что данный метод позволяет определять оптимальную скорость резания для других групп материалов, но это требует дальнейших исследований.

Данная работа была проведена при поддержке грантов № 2014/68 (код проекта 254) и № 9.251.2014 (код проекта 251) Министерства образования и науки РФ, а также в рамках магистерской диссертации одного из соавторов.

Выводы

1. Критерием начала диапазона высокоскоростного резания является такое значение скорости V_{opt} , при котором ее дальнейший рост не приводит к увеличению мощности резания и температуры в зоне обработки.
2. Разработан алгоритм и ПАК для расчета оптимальной скорости резания.
3. Оптимальная скорость резания материала 12X18H10T равна 53 м/мин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бреев, С. В. Высокоскоростное фрезерование труднообрабатываемых материалов. Основные особенности фрезерной обработки / С. В. Бреев, А. Г. Серебренникова // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2013. – № III-1(15). – С. 52-60.
2. Бреев, С. В. Применение температурно-мощностного критерия для определения зоны высокоскоростной обработки труднообрабатываемых материалов / С. В. Бреев, А. Г. Серебренникова, М. А. Козлова // Сборник научных трудов SWorld. – 2014. – № 3(36). – Т. 5.
3. Бреев, С. В. Теоретическое обоснование высокоскоростной обработки труднообрабатываемых материалов / С. В. Бреев, А. Г. Серебренникова, М. А. Козлова // Сборник научных трудов SWorld. – 2014. – № 3(36). – Т. 5.
4. Бреев, С. В. Определение зоны высокоскоростной обработки труднообрабатываемых материалов на основе температурно-мощностного критерия / С. В. Бреев, А. Г. Серебренникова, М. А. Козлова // Межотраслевой институт «Наука и образование». – 2014. – № 3. – С. 8-11.
5. Проблемы и достижения в инновационных материалах и технологиях машиностроения : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Комсомольск-на-Амуре, 12-16 мая 2015 г. / редкол. : О. Ю. Еренков (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2015. – 320 с.
6. Бреев, С. В. Температурно-мощностной критерий как способ определения зоны высокоскоростной обработки труднообрабатываемых материалов / С. В. Бреев, А. Г. Серебренникова, М. А. Козлова // Современные материалы, техника и технология : материалы 4-й Междунар. практ. конф., Курск, 25-26 дек. 2014 г. – Курск, 2014. – С. 96-102.

Ким В. А., Башков О. В., Попкова А. А.
V. A. Kim, O. V. Bashkov, A. A. Popkova

ЦВЕТОВАЯ СЕГМЕНТАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ МИКРОСТРУКТУРЫ КАК ЭЛЕМЕНТ КОМПЬЮТЕРНОЙ МЕТАЛЛОГРАФИИ

COLOR SEGMENTATION OF THE MICROSTRUCTURE IMAGES AS AN ELEMENT OF COMPUTER-AIDED METALLOGRAPHY

Ким Владимир Алексеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре), 8-914-373-2534. E-mail: kmtnm@knastu.tu.

Mr. Vladimir A. Kim – D.Sc. in Engineering, Professor, Head of the Department of Materials Science and New Materials Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University; Komsomolsk-on-Amur, Russia; telephone: + 7 (914) 3732534. E-mail: kmtnm@knastu.tu.

Башков Олег Викторович – доктор технических наук, профессор, директор Центра коллективного пользования «Новые материалы и технологии» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре), 8-914-840-778. E-mail: ckp@knastu.tu.

Mr. Oleg V. Bashkov – D.Sc. in Engineering, Professor, Director of the Shared Resource Center of New Materials and Technologies, Komsomolsk-on-Amur State Technical University; Komsomolsk-on-Amur, Russia; telephone: + 7 (914) 840778. E-mail: ckp@knastu.tu.

Попкова Александра Александровна – аспирант кафедры «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре), 8-914-778-0339. E-mail: kmtnm@knastu.tu.

Ms. Alexandra A. Popkova – PhD student, Department of Materials Science and New Materials Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University; Komsomolsk-on-Amur, Russia; telephone: + 7 (914) 7780339. E-mail: kmtnm@knastu.tu.

Аннотация. Изложена методика цветовой сегментации изображения микроструктур как элемента компьютерной металлографии, раскрывающая широкие возможности структурного анализа. На примере структурных изменений стали 20 при пластической деформации показано практическое приложение цветовой сегментации, позволяющей разделять микроструктурные объекты по их структурно-энергетическому состоянию.

Summary. In this paper we set forth a technique for color segmentation of the image of microstructures as an element of computer-aided metallography, opening ample opportunities for structural analysis. By the example of structural changes of Steel 20 due to plastic deformation, we show the way of practical application of color segmentation, allowing us to separate microstructure objects judging by their structure-energy state.

Ключевые слова: микроструктура, компьютерная металлография, цветовая сегментация, плотность границ, дефекты кристаллического строения, свободная энергия, химический потенциал.

Key words: microstructure, computer metallography, color segmentation, density of borders, crystal structure defects, free energy, chemical potential.

УДК 519.6:621.74

Введение

Структурная организация материала является пространственно распределенной, а изображение микроструктуры представляет ее срез в плоскости металлографического шлифа. Изображения микроструктур с формальной точки зрения представляет набор геометри-

ческих фигур разной формы и мерности. При таком отображении микроструктуры все ее составляющие теряют одну единицу мерности. Т.е. нольмерные, одномерные и двухмерные объекты в реальности являются линейными, двухмерными и трехмерными соответственно. Поля упругих напряжений в матрице вокруг дисперсных частиц второй фазы на изображениях микроструктур и в реальности представляют точечные нольмерные объекты. Мерность микроструктурного объекта, зафиксированного на фотографии, зависит от кратности увеличения. Так, нольмерные объекты при малом увеличении преобразуются в двухмерные образования при высоком увеличении, и это необходимо учитывать при микроструктурном анализе.

Компьютерная обработка изображений микроструктур сводится к вычислению геометрических характеристик ее составляющих, в частности, периметра, площади и среднего диаметра всех двухмерных объектов, имеющих замкнутые границы, фрактальной размерности всех линейных образований и общего количества точечных элементов. Полученные значения в дальнейшем используются для вычисления различных комплексных показателей, характеризующих структурную организацию материала [1 – 5].

Идентификация структурных составляющих осуществляется травлением зеркальной поверхности металлографического шлифа. Для выявления определенных структурных объектов используются свои реактивы и методы. При травлении на поверхности шлифа образуются пленочные химические соединения, состав которых зависит от строения и химического состава структурного объекта, или развитый рельеф, вызванный растворением или осаждением продуктов реакции. Каждая структурная составляющая в результате цветовой интерференции приобретает свой индивидуальный цвет с определенной глубиной оттенка и отражательной способностью [6].

Если результатом травления является изменение шероховатости, то глубину или высоту рельефа можно оценить по степени темно-серого оттенка, создаваемого тенью и полутенями. Для более точного анализа состояния поверхности рекомендуется рассматривать металлографический шлиф в светлом и темном полях. В последнем случае получается негативное изображение.

Большие возможности структурного анализа материала заложены в цветовой сегментации, позволяющей идентифицировать микроструктурные составляющие по глубине цветовых оттенков. Алгоритм цветовой сегментации заложен во многих программах обработки изображений [7].

В статье описана методика обработки изображений микроструктур с помощью алгоритма цветовой сегментации, которая значительно расширяет возможности компьютерной металлографии, а также приведены результаты практического приложения этой методики при исследовании структурных изменений низкоуглеродистой стали 20 в результате пластической деформации.

Связь глубины цветового оттенка с активностью химической реакции при травлении металлографического шлифа

Изображение микроструктур, получаемых с помощью оптических металлографических микроскопов, формируется за счет отражения и поглощения света при его взаимодействии с поверхностью металлографического шлифа. В режиме «светлого поля» степень темноты участка на микрофотографии соответствует локальным зонам с более глубоким рельефом, полученным в результате травления шлифа. Глубина рельефа, получаемая в результате травления, определяется активностью протекания химической реакции полированной поверхности шлифа с реактивом-травителем. Правильный подбор состава реактива и технология травления должны обеспечивать образование химических соединений, которые бы растворялись и легко удалялись с поверхности металлографического шлифа, формируя только рельеф без остаточных продуктов реакции.

Чем ниже энергия активации, тем выше скорость химической реакции, в результате чего формируется более развитый рельеф поверхности [8]. Энергия активации зависит от

термодинамической устойчивости системы, в рамках которой протекает химическая реакция. С повышением энергии Гиббса термодинамическая устойчивость системы уменьшается [8].

При правильном выборе состава реактива для травления микроструктуры с более высокой свободной энергией (химическим потенциалом) должны подвергаться большему изменению рельефа, а образованная в результате травления поверхность будет обладать меньшей светоотражательной способностью [6]. На изображениях микроструктур, снятых в светлом поле, структурные объекты с высокой свободной энергией приобретают большую глубину темно-серого оттенка.

Большинство программ обработки изображений включают алгоритмы цветовой сегментации, позволяющие производить сортировку объектов изображения по глубине цветовых оттенков. Для описания уровня серого цвета в восьмиразрядном полутоновом изображении принято, что простой черный цвет имеет 0 пикселей, а простой белый – 255. Различная глубина серого оттенка обеспечивается сочетанием черных и белых цветов или комбинацией 0 и 1 в пределах 256 пикселей. Для более точного ранжирования глубины темно-серого оттенка можно применять разложение изображения на цветовые каналы (красный, синий и зеленый) с последующей обработкой каждого полученного изображения по алгоритму полутоновой сегментации [7]. Следовательно, объекты изображения, выявленные в области темно-серых оттенков с низким числом пикселей, представляют микроструктуры, которые подвергались более глубокому травлению или отличались высокой исходной величиной химического потенциала.

Методика исследования

Пластическая деформация цилиндрических образцов диаметром 5,0 мм и длиной 125 мм подвергалась растяжению на универсальной испытательной машине INSTRON-3382 до разной степени деформации. Металлографические шлифы изготавливались по традиционной методике, включающей шлифование и полирование на автоматическом станке AutoMet 250, и последующее травление 4,0%-ным раствором азотной кислоты в спирте.

Исследовалась микроструктура в поперечном сечении образцов, которая фиксировалась металлографическим микроскопом «Микро-200» при 400-кратном увеличении. Обработка изображений микроструктур осуществлялась специальной программой Image.Pro.Plus.5.1.

Исследуемые изображения микроструктур предварительно подвергались корректировке резкости и пространственной калибровке. Цветовая сегментация проводилась без разложения на цветовые каналы. Для этого вся шкала глубин темно-серого цвета была разделена на 5 интервалов, равных 51 пикселю. Границы интервалов глубин темно-серого цвета и их средние значения в пикселях приведены в табл. 1.

Таблица 1

Границы участков темно-серых оттенков и среднее значение каждого диапазона в пикселях

Диапазон	1	2	3	4	5
Границы диапазона	0/51	52/103	104/155	156/207	208/255
Среднее значение	25	77	129	181	232

В каждом интервале темно-серых оттенков снималась контрастная маска, в результате чего исходное изображение микроструктуры раскладывалось на 5 снимков. Контрастные маски с малыми значениями цветовых оттенков в пикселях фиксировали микроструктурные объекты, которые в результате травления приобретали более глубокие темные цвета, т.е. обладали более высоким исходным химическим потенциалом.

По изображениям контрастных масок рассчитывались количество (N) всех микрообъектов, зафиксированных на одной фотографии, площадь (F_i) и периметр (P_i) каждого из них. Полученные значения использовались для вычисления средней плотности границ (q_{cp}) и средней площади микроструктурных объектов ($f_{уд}$)

$$q_{cp} = \left(\frac{\sum_N P_i}{\sum_N F_i} \right),$$

$$f_{cp} = \frac{1}{N} \sum_N F_i.$$

Площадь металлографического шлифа, зафиксированная на снимке при увеличении 400 крат, составляла 32 800 мкм².

Результаты исследования и их анализ

На рис. 1 приведены микроструктуры исследуемых образцов в исходном состоянии и после пластической деформации. Сравнительный анализ показывает, что микроструктуры в поперечном сечении, сформированные при растяжении, мало отличаются от исходной, так как деформационные изменения зеренной структуры более выражено проявляются в продольном сечении образцов. Тем не менее незначительное уменьшение размеров зерен и повышение плотности точечных образований ощутимо при деформации $\varepsilon > 0,2$.

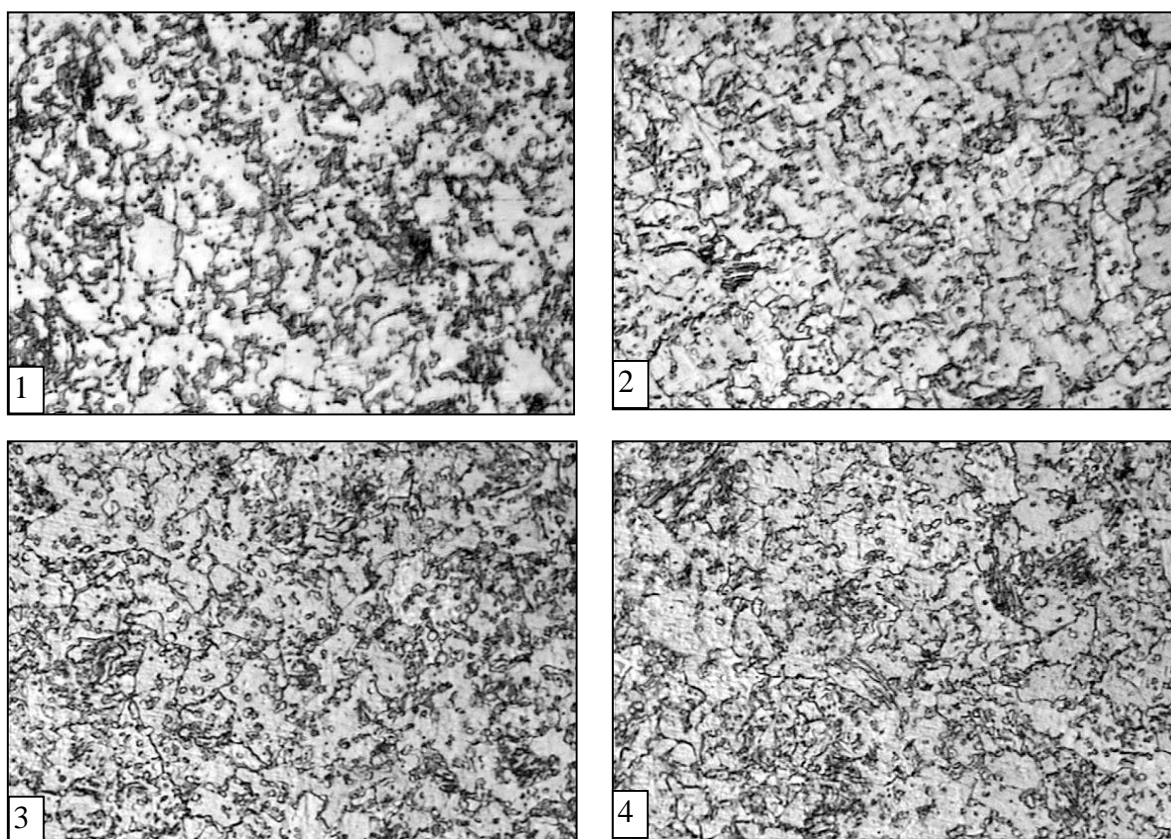


Рис. 1. Микроструктуры образцов из стали 20 в исходном состоянии (1) и после деформации $\varepsilon = 0,05$ (2), $\varepsilon = 0,2$ (3), $\varepsilon = 0,3$ (4)

На рис. 2 приведены контрастные маски исследуемых микроструктур с различной глубиной темно-серого оттенка, разложенных с помощью цветовой сегментации. При этом в

первом диапазоне были зафиксированы микроструктуры с высокой степенью травления или повышенной величиной химического потенциала, а в четвертом – с низким химическим потенциалом.

Микроструктуры, идентифицированные на контрастных масках, состоят из точечных объектов, объединенных в колонии с разной степенью упорядоченности. Линейные объекты состоят из совокупности точечных образований, выстроенных в ряд, а поверхностные микроструктуры (двухмерные образования) представляют участки с замкнутыми границами раздела. Внутри поверхностных структур выявляются неоднородно распределенные точечные образования.

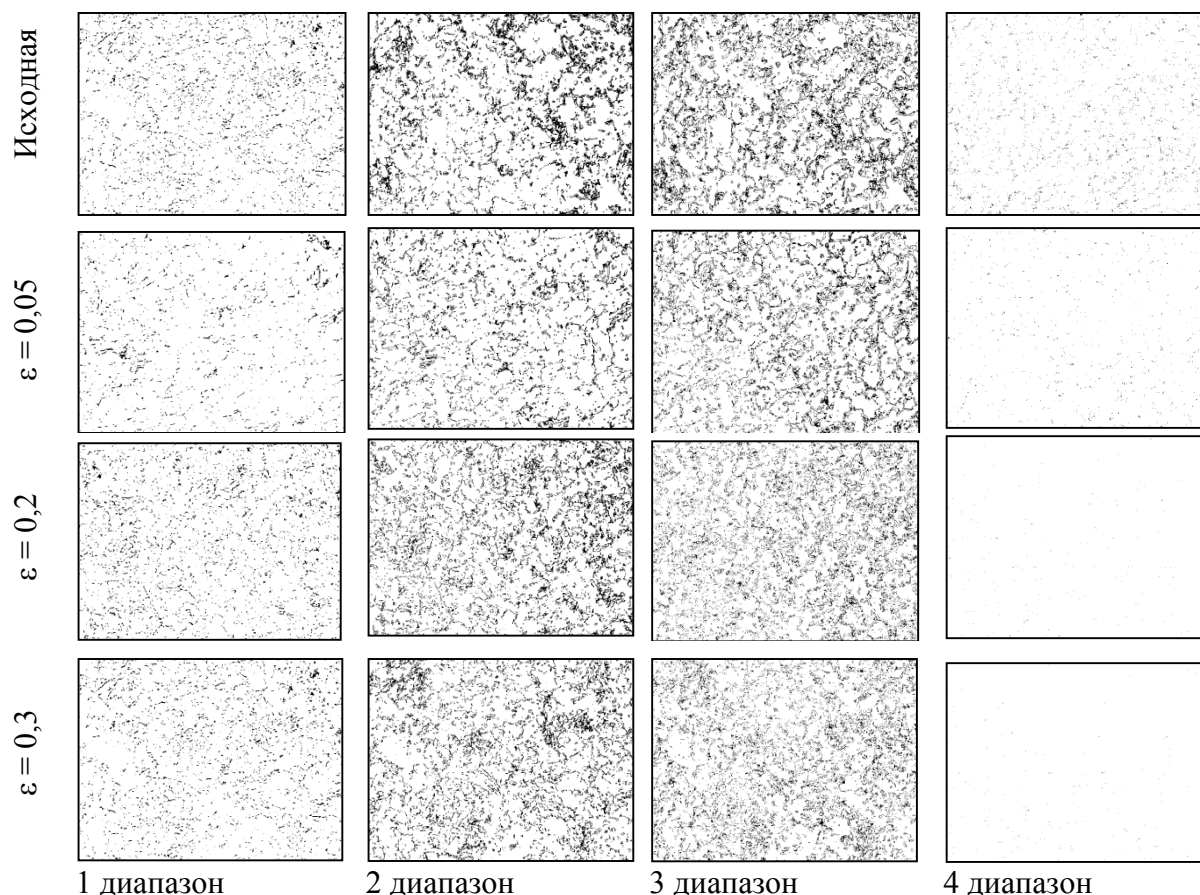


Рис. 2. Контрастные маски изображений микроструктур стали 20 с разной глубиной темно-серого оттенка в исходном состоянии (1) и после деформации $\varepsilon = 0,05$ (2), $\varepsilon = 0,2$ (3), $\varepsilon = 0,3$ (4)

Количество точечных объектов в зависимости от их химического потенциала носит экстремальный характер, достигая максимума в третьем диапазоне глубин темно-серого оттенка (см. рис. 3). С повышением степени пластической деформации количество точечных объектов увеличивается. Средняя площадь точечных объектов варьируется от 0,2 до 1,4 мкм² (см. рис. 4). В зависимости от величины химического потенциала, площадь точечных объектов носит экстремальный характер с максимумом во втором диапазоне глубин темно-серого оттенка. С повышением степени пластической деформации размеры точечных объектов снижаются.

Точечные объекты, зафиксированные на контрастной маске, в реальности могут представлять поля упругих напряжений матрицы вокруг дисперсных частиц второй фазы и пересечения одномерных дефектов кристаллического строения с плоскостью металлографического шлифа.

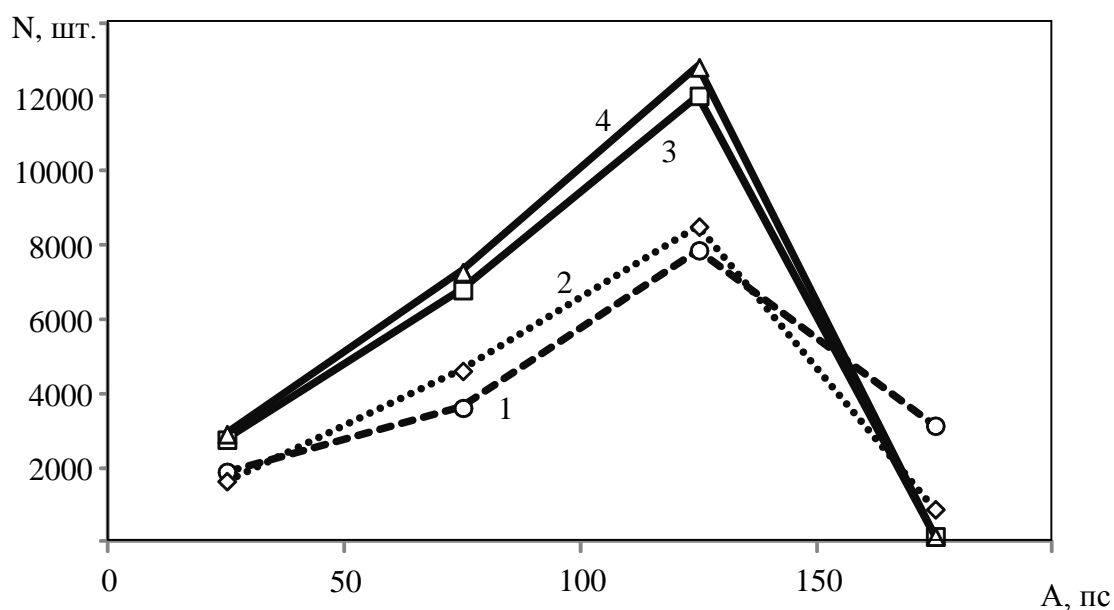


Рис. 3. Распределение количества микроструктурных объектов стали 20 по глубине темно-серого цвета в исходном состоянии (1) и после деформации $\varepsilon = 0,05$ (2), $\varepsilon = 0,2$ (3), $\varepsilon = 0,3$ (4)

Учитывая, что в структуре стали 20 присутствие дисперсных частиц второй фазы незначительно, можно предположить, что точечные объекты на контрастных масках в своем большинстве представляют сечения осей линейных дефектов, вокруг которых в матрице формируется поле упругих напряжений. Следовательно, разложение изображения микроструктуры по цветовой сегментации можно рассматривать как один из методов выявления одномерных дефектов кристаллического строения и их ранжирования по структурно-энергетическим показателям.

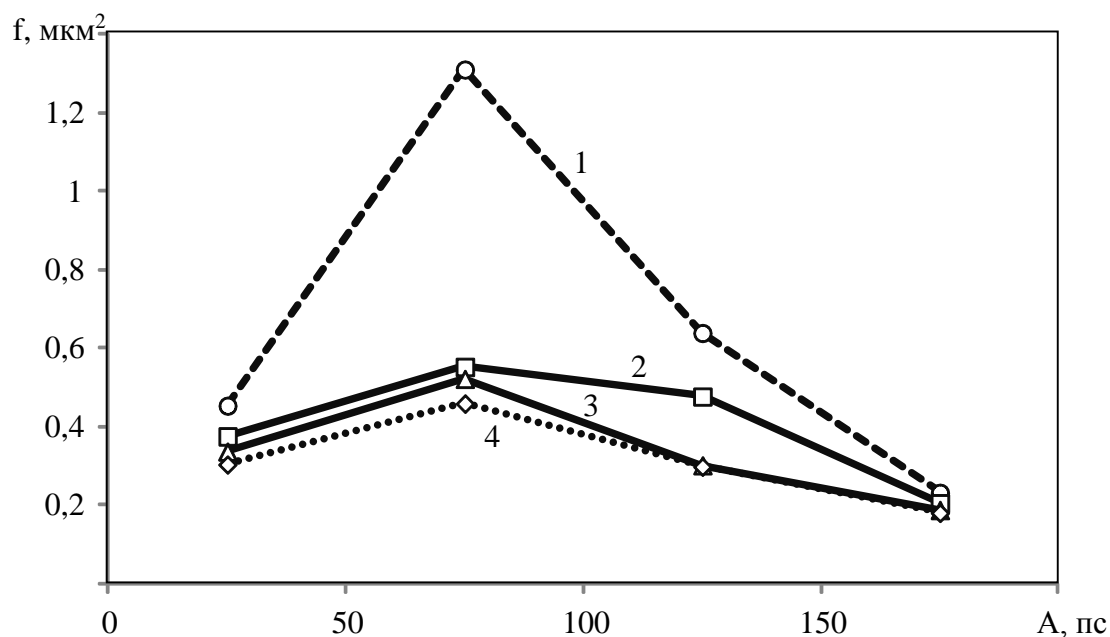


Рис. 4. Распределение средней площади микроструктурных объектов стали 20 по глубине темно-серого цвета в исходном состоянии (1) и после деформации $\varepsilon = 0,05$ (2), $\varepsilon = 0,2$ (3), $\varepsilon = 0,3$ (4)

Степень развитости границ или их суммарная протяженность характеризует ее потенциальную способность блокировать подвижность скользящих дислокаций, отвечающих за пластическую деформацию [10]. С повышением степени пластической деформации развитость границ возрастает за счет генерации дислокаций источниками, функционирующими на границах, выхода внутризеренных дислокаций к границам и деформационных изменений формы самих зерен [11, 12]. Степень развитости границ количественно оценивается удельной плотностью границ. Распределение микроструктурных объектов по этому показателю для разных глубин темно-серого оттенка показано на рис. 5.

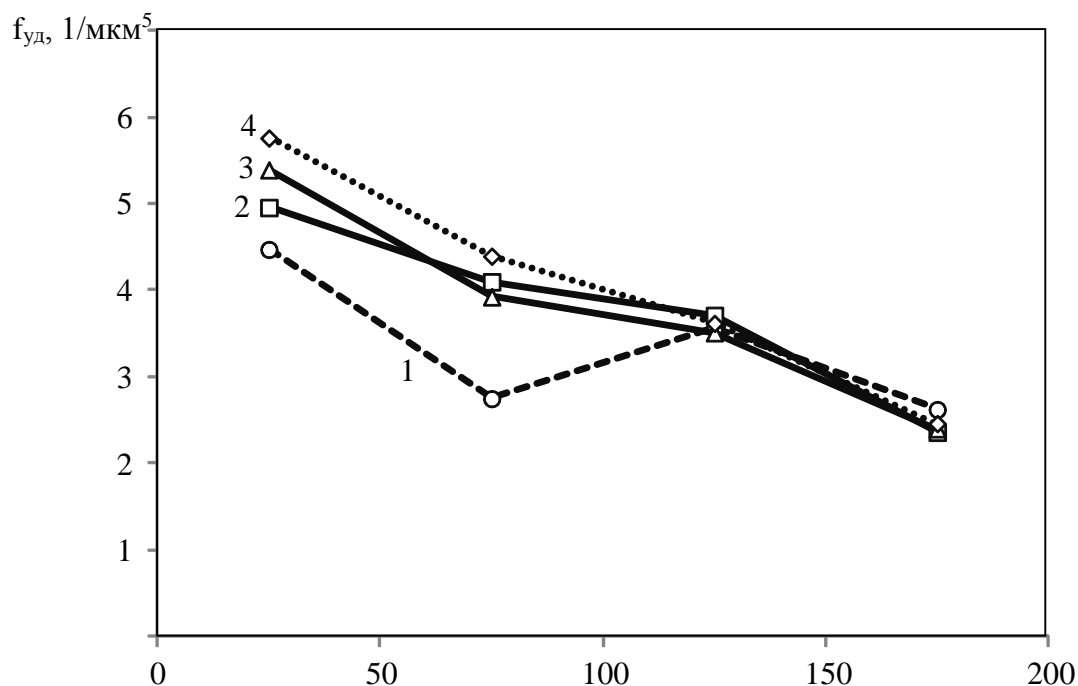


Рис. 5. Распределение удельной плотности границ микроструктурных объектов стали 20 по глубине темно-серого цвета в исходном состоянии (1) и после деформации $\varepsilon = 0,05$ (2), $\varepsilon = 0,2$ (3), $\varepsilon = 0,3$ (4)

Из анализа приведенных результатов следует, что с повышением степени пластической деформации развитость границ микроструктурных объектов в общем случае возрастает. Микроструктуры с развитыми границами отличаются более высокой величиной химического потенциала, и они более активно реагируют на деформацию. Удельная плотность границ микроструктурных объектов с малой величиной химического потенциала практически не зависит от степени пластической деформации. Эти микроструктурные объекты, видимо, закладываются на стадии производства материала и изделия и отличаются высокой структурной стабильностью.

Заключение

1. Цветовая сегментация изображений микроструктур позволяет разделять микроструктурные объекты по глубине темно-серого оттенка, которые косвенно характеризуют их структурно-энергетическое состояние.

2. На контрастных масках изображений микроструктур, разделенных по глубине темно-серых оттенков, выявляется, что линейные структуры состоят из совокупности упорядоченных точечных объектов, которые в реальности представляют пересечения линейных дефектов кристаллического строения с плоскостью металлографического шлифа.

3. С повышением степени пластической деформации плотность точечных объектов и их диаметральные размеры возрастают, а с изменением глубины темно-серого оттенка носят немонотонный экстремальный характер с наличием максимума.

4. Цветовую сегментацию изображений микроструктур можно рассматривать как методику декорирования линейных дефектов кристаллического строения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kim, V. A. Quantitative Structure-and-Energy Analysis of Heat Treatment of Structural Steel / V. A. Kim, V. V. Petrov, A. V. Butin, I. V. Belova, A. A. Shpileva // Metal Science and Heat Treatment. Vol. 52. № 3–84. 2010. p. 163-165.
2. Kim, V. A. Kinetics of structural of hardened steel 15H5M during tempering /Modern materials and technologies / V. A. Kim, I. V. Belova, A. V. Boutin. – 2013. – № 1. – С. 126-131.
3. Ким, В. А. Количественная оценка зеренной структуры конструкционных сталей при пластической деформации и рекристаллизационном отпуске / В. В. Лиманкин, Б. Н. Марьин [и др.] // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2012. – № II. –С. 83-88.
4. Башков, О. В. Методика цифровой обработки изображений микроструктуры алюминиевых сплавов в среде MATLAB / О. В. Башков, В. А. Ким, А. А. Попкова // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2013. – Т. 79. – № 10. – С. 34-40.
5. Статистическая оценка количественной металлографии / В. А. Ким, Р. В. Евдокимова, С. В. Золотарева, А. А. Попкова, М. Йошида // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2013. – № II-1 (14). – С. 76-82.
6. Брандон, Д. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля / Д. Брандон, У. Каплан. – М.: Техносфера, 2004. – 384 с.
7. Претт, У. Цифровая обработка изображений / У Претт; пер. с англ. - М.: Мир, 1982, 480 с.
8. Жуховицкий, А. А. Физическая химия: учебник для вузов / А. А. Жуховицкий, Л. А. Шварцман. - М.: Metallurgy, 1988. – 400 с.
9. Чувельдиев, В. Н. Неравновесные границы зерен в металлах. Теория и приложения / В. Н. Чувельдиев. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 304 с.
10. Кристиан, Д. Теория превращений в металлах и сплавах. Термодинамика и общая кинетическая теория / Д. Кристиан. – М.: Мир, 1978. – 808 с.
11. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах / Р. Р. Балахонов, А. В. Болеста, М. П. Бондарь [и др.]. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. – 520 с.
12. Синергетика и фракталы в материаловедении / В. С. Иванова, Л. С. Баланкин, А. А. Оксогоев, И. Ж. Бунин. – М.: Наука, 1994. – 383 с.

дефекты: поперечные трещины, несплавления и цепочки пор. Данные дефекты возникают даже в случае комиссионной проверки качества подготовки поверхности под сварку (проведение операции травления, шабрения торцов труб, механической зачистки кромок, обезжиривания ацетоном), процесса сварки, производимого с использованием современного сварочного оборудования фирмы Kemppi (Финляндия), и сварочных материалов, подготовленных в соответствии с технологической документацией. Процент сдачи деталей с первого предъявления по данным рентгеновского контроля не превышает 60...65 %, остальные 35...40 % деталей подвергаются исправлению (причём в ряде случаев неоднократно): разделка дефекта, подварка, рентгенографический контроль. Значительная дефектность процесса сварки трубопроводов приводит к неритмичности производства трубопроводов, что в свою очередь удлинит циклы сборки самолётов.

Методика проведения исследований

Исследовалось влияние качества подготовки свариваемых и сварочных материалов, выполнения требований техники и технологии создания сварных соединений на качество швов. Для этой задачи выбраны четыре марки алюминиевой сварочной проволоки диаметром 2 мм: СВАМг3, СВАМг6, СВАК5 и СВАМг6 (полированная). Согласно сертификатам поставщика (ОАО «ВИЛС» г. Москва), проволока поставляется в бухте по ГОСТ 7871-75 тянутая, без термической и химической обработки в нагартованном состоянии. Также нужно особо отметить требования стандарта, предъявляемые к качеству поставляемой проволоки и методам контроля: проволока должна иметь чистую поверхность, без плен, трещин, закатов, вмятин, расслоений и резких перегибов. На поверхности проволоки допускаются местные дефекты: цвета побежалости, темные и белые пятна, не выводящие проволоку при контрольной зачистке за предельные отклонения по диаметру. Проверке размеров и качества поверхности проволоки подвергается каждая катушка, бухта или пучок партии. Химический состав проверяют химическим или спектральным методом у 3 %, но не менее двух катушек, бухт или пучков партии. Для проверки механических свойств отбирают 2 %, но не менее двух катушек, определяется временное сопротивление разрыву. Качество поверхности проволоки определяют визуально, без применения увеличительных приборов.

В качестве образцов основного металла было взято две марки: АМг2м и АМг3м, образцы вырезаны из одного участка соответствующих марок труб (толщина 1,2 мм) по ОСТ 1.90038-88 «Трубы авиационные из алюминиевых сплавов. Технические условия».

Проволока и основной металл подвергались обработке химическим способом в щелочном растворе согласно производственной инструкции. Травление основного металла проводили по схеме травления сварочной проволоки.

Сформировано четыре партии по 4 образца проволоки разных марок. Для определения кинетики процесса химической обработки операция травления велась с выдержкой в ванне 30 с (1 партия), 60 с (2 партия), 120 с (3 партия). Четвёртая партия содержала образцы проволоки в исходном состоянии. Образцы проволоки взяты с одной бухты в состоянии поставки, с наличием бирки. Исследования поверхности проводились через 6 ч после процесса химической обработки проволоки и основного металла.

Также исследованиям подлежали образцы фланцев, подвергнутых холодному оксидированию (см. рис. 1, а), поступающих после этого на сварку и уже сваренных с деталью, полученной литьём (см. рис. 1, б). Эти соединения наиболее дефектные в отношении порообразования.

Холодное анодирование производится в специальных ваннах с серной кислотой технической 300...380 г/л при температуре -7...-4 °С с выдержкой 1 ч. В качестве катода (-) применяется проволока Д16, спирально намотанная на трубку, в которую установлены анодируемые элементы. В качестве анода (+) использованы свинцовые электроды, расположенные по бортам ванны. Детали полностью погружаются в раствор. Подготовленные под сварку кромки изолируются клееобразной смесью.

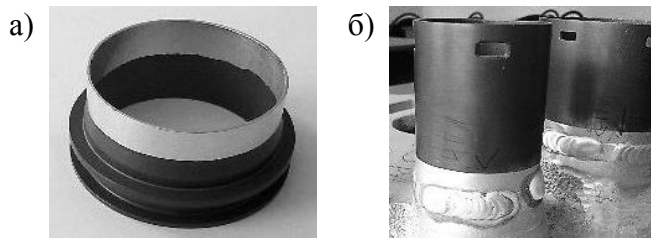


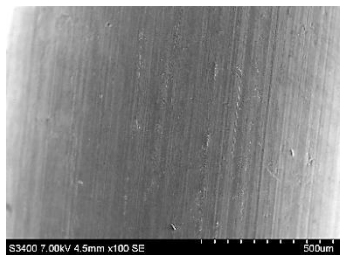
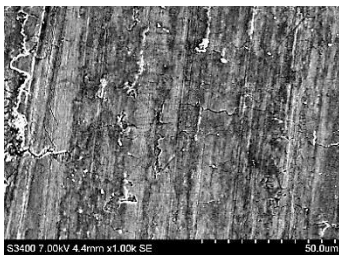
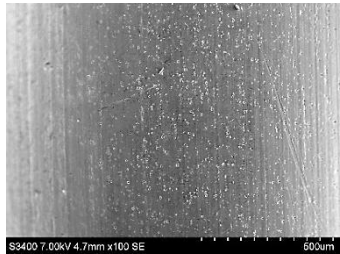
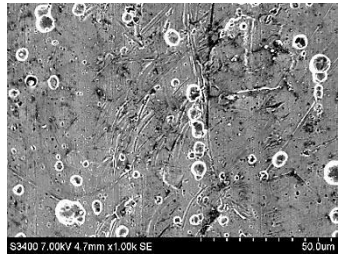
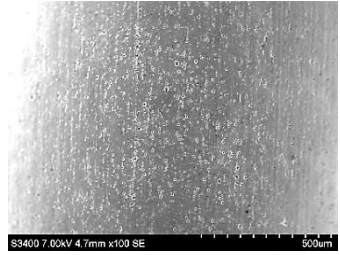
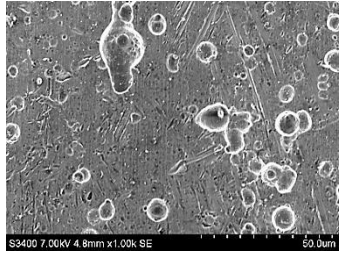
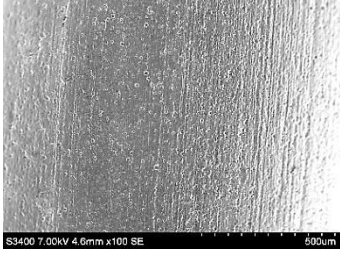
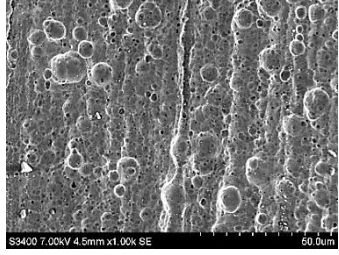
Рис. 1. Внешний вид анодированных деталей:
а – отдельная деталь; б – сваренная деталь

Качество поверхности образцов проволоки и основного металла оценивалось на растровом электронном микроскопе Hitachi S-3400N (Япония) с использованием приставки для проведения химического анализа по поверхности исследуемого образца.

С целью определения функциональных возможностей сварочных аппаратов Kemppi MasterTig 3500, проведена сварка опытных образцов труб диаметрами 32, 56 мм толщиной 1,2 и 1,6 мм. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты исследований

Проволока СвАМг6 при времени травления	×100	×1000
Полированная, состояние поставки		
30 с		
60 с		
120 с		

Анализ изображений микроструктуры поверхности образцов показал: поверхность исходной проволоки имеет высокую шероховатость, на поверхности присутствуют места закатов и продольные линии, возникшие при волочении проволоки; микровмятины, микро-трещины протяжённостью до 50 мкм, шириной до 15 мкм и достаточно глубокие. На поверхности полированной проволоки находятся разветвлённые трещины шириной до 0,5 мкм и протяжённостью 50 мкм и более.

При выдержке в ванне травления 30 с видны значительные различия в состоянии поверхности проволоки. Происходит вытравливание поверхностного слоя, что приводит к выравниванию дефектов, сокращается количество поверхностных дефектов, шероховатость уменьшается, появляются волнообразные каналы, направленные вдоль линий волочения.

Выдержка в ванне травления до 60 с в целом улучшает поверхность проволоки относительно выдержки в 30 с. Значительно уменьшается шероховатость, увеличивается интервал чередования волнообразных каналов, количество дефектов сокращается.

Поверхность образцов значительно изменилась при выдержке в ванне травления 120 с: образуется пемзообразная поверхность. Отчётливо видны округлые лункообразные места вытравливания и глубокие точечные вытравливания структурных составляющих. Таким образом, при двух минутах выдержки в ванне травления вытравливается уже основной металл и на поверхности образуется новая оксидная плёнка, совершенно другая по строению, чем та, которая получается при производстве проволоки.

Из данных исследований следует, что наилучшее время травления как для обычной, так и для полированной проволоки составляет 45...75 с. Влияние образования пемзообразной поверхности после травления 120 с на порообразование сварных швов требует дальнейших исследований.

Кроме того, необходимо тщательно контролировать качество поверхности проволоки после травления для отклонения вероятности перетравливания по наличию пемзообразности. Поскольку состав ванны травления со временем может меняться, необходим периодический контроль не только состава ванны, но и качества травления проволоки. Это можно осуществлять с помощью оптического микроскопа. Толщину оксидной плёнки можно контролировать замером электрического сопротивления. Для установления связи электрического сопротивления с реальным строением оксидной плёнки необходимо провести дополнительные исследования.

Внешний вид оплавленного торца сварочной проволоки СвАК5, полученного при остановке процесса сварки, приведён на рис. 2. Проволока к сварке была подготовлена по традиционной цеховой технологии.

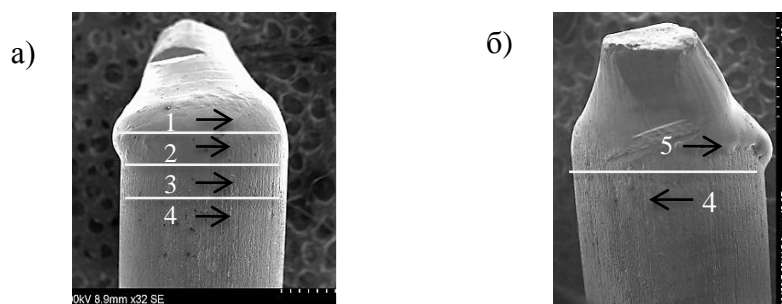


Рис. 2. Оплавленный торец присадочной проволоки:
 а – сторона воздействия дуги; б – обратная сторона;
 1 – зона расплавления; 2 – зона оплавления; 3 – переходная зона;
 4 – исходное состояние; 5 – пластифицированный металл

Как видно из рис. 2, а, поверхность проволоки со стороны воздействия дуги имеет несколько областей: 1 – зона расплавленного металла, 2 – борт с переходом от оплавленного

металла к расплавленному, 3 – оплавленная часть и 4 – не подвергнутая плавнению. Обратная сторона (см. рис. 2, б) не имеет зон 1, 2 и 3.

Исходная поверхность проволоки (см. рис. 3) имеет как с лицевой, так и с обратной стороны пемзообразную структуру с большим количеством пор, ямок диаметром 3...10 мкм. Также на поверхности проволоки по направлению продольной оси наблюдаются чередующиеся с шагом 25...50 мкм бороздки, что свидетельствует о травлении около 120 с.

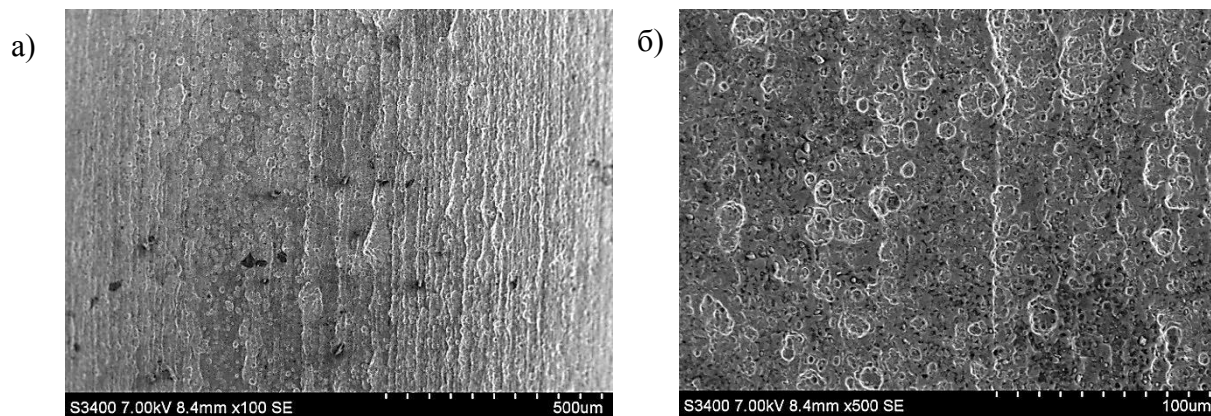


Рис. 3. Поверхность проволоки, подготовленной к сварке: а – $\times 100$; б – $\times 500$

Переходная зона присадочной проволоки со стороны воздействия дугового разряда характеризуется сохранением дефектов исходной проволоки: несколько размытой (частично оплавленной) формы продольные бороздки (см. рис. 4, а). Оплавленная поверхность имеет микротрещины шириной 1 мкм, микропоры диаметром не более 2 мкм и единичные макропоры диаметром 30...35 мкм (см. рис. 4, б, в).

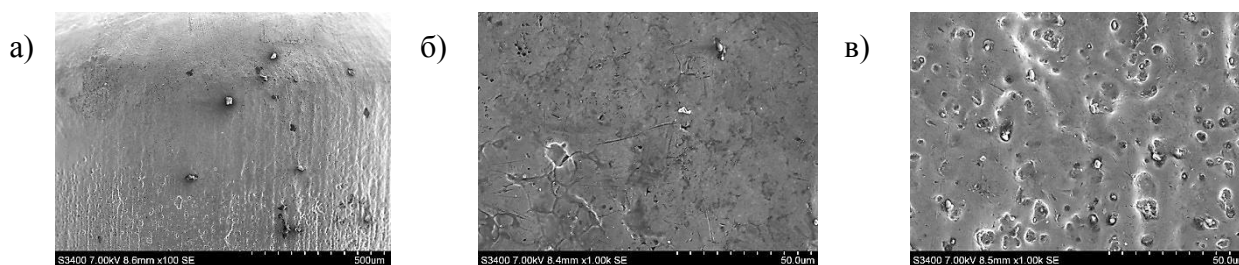


Рис. 4. Поверхность проволоки в зоне оплавления со стороны воздействия дуги и области подробного исследования: а – общий вид переходной зоны; б – оплавленный участок; в – переходная зона

Поверхность зоны оплавления со стороны воздействия дуги при переходе от зоны оплавления к зоне расплавления также оплавлена, дендритная структура дефектов не имеет (см. рис. 5).

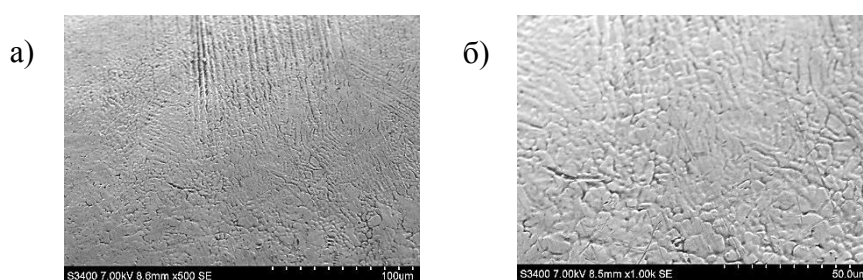


Рис. 5. Зона оплавления с лицевой стороны: а – увеличение $\times 500$; б – увеличение $\times 1000$

На рис. 6 показана поверхность зоны расплавления присадочной проволоки с лицевой стороны с чётким дендритным строением зёрен по линии отрыва капли расплавленного металла от проволоки. Поверхностных дефектов не наблюдается.

Совершенно иная картина наблюдается в зоне 5 с обратной стороны шва (см. рис. 7, 8). В зоне 5 вдоль проволоки видны борозды исходного состояния проволоки, образовавшиеся в процессе вытяжки пластифицированного участка проволоки температурой сварочной дуги в момент отвода присадка. Чередование бороздок по всей обратной поверхности одинаковое с периодом 5 мкм. На поверхности чередующегося рельефа имеются мелкие поры диаметром 1 мкм и микротрещины 1×3 мкм. Расплавления поверхности проволоки с обратной стороны не наблюдается.

Обратная сторона сварочной проволоки сохраняет больший объём нерасплавленного металла, но при этом разогревается до температуры пластификации. Так как на обратной стороне проволоки отсутствуют зоны оплавления 2 и расплавления 1, то при выводе из зоны действия сварочной дуги она сильно удлиняется с образованием на её поверхности микродефектов в виде пор и поверхностных дефектов исходного состояния проволоки.

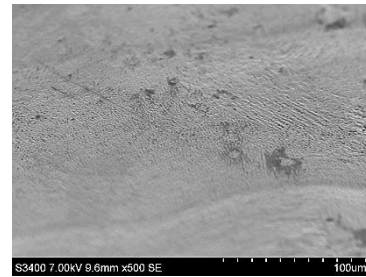
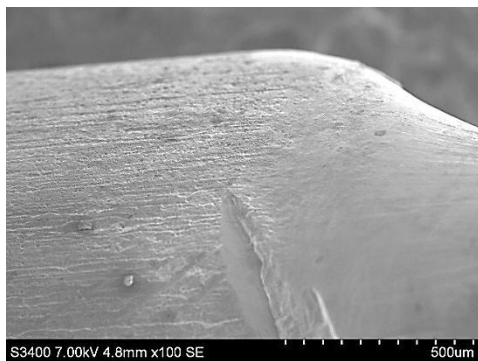


Рис. 6. Поверхность зоны расплавления торца присадочной проволоки

а)



б)

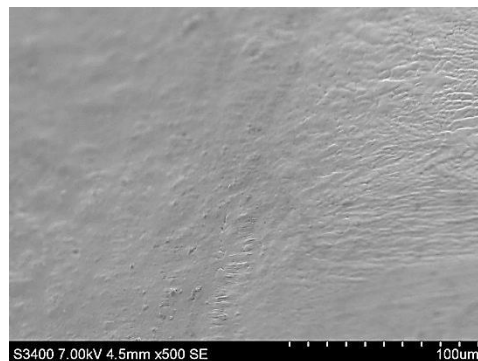


Рис. 7. Обратная сторона поверхности проволоки в переходе от исходного состояния к зоне 5: а – $\times 100$; б – $\times 500$

Механизм внесения капиллярно-конденсированной влаги с поверхности проволоки в сварочную ванну можно объяснить следующим образом: процесс внесения присадочного материала связан с чередованием манипуляций введения и вывода присадочного материала из зоны горения дуги. Попадая под действие сварочной дуги, расплавляется лишь лицевая поверхность сварочной проволоки, в то время как обратная значительно пластифицируется. Образовавшийся на лицевой поверхности проволоки объём расплавленного металла удерживается на ней до достижения критической массы и стекает в сварочную ванну под действием сил тяжести и давления дуги.

При небольшом перерыве (связанном с поворотом детали, с заменой деталей и т.п.) эти дефекты способны накапливать капиллярно-конденсированную влагу, и при возобновлении процесса сварки некий объём пластифицируемого материала обратной стороны будет вовлечён в сварочную ванну.

Исследования микроструктуры поверхности основного металла (труба АМг2М и АМг3М) показывают сходные результаты влияния операции травления как трубы, так и проволоки. И так же, как и в случае травления присадочной проволоки, оптимальным режимом подготовки основного металла (АМг5, АМг3, АМг6 и ВАЛ15) травлением является промежуток 45...75 с.

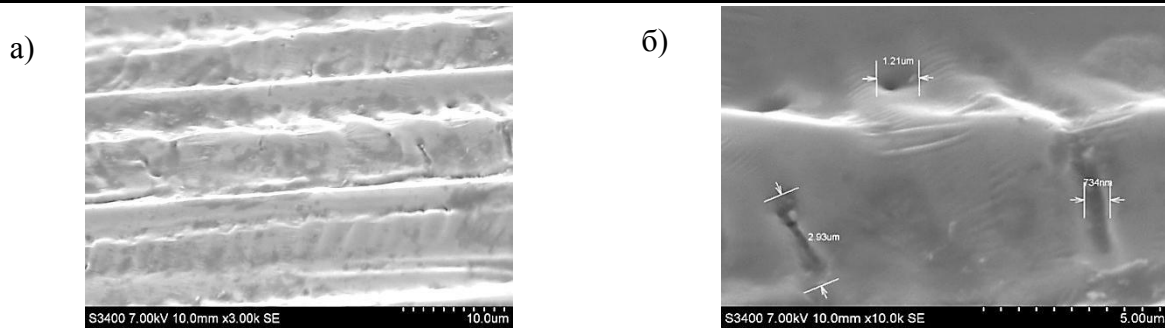


Рис. 8. Зона 5 (пластически деформированного металла): а – $\times 3000$; б – $\times 5000$

Исследовали причины порообразования при сварке фланцев, имеющих холодное анодирование. Как известно, при сварке этих деталей существенно возрастает пористость сварных соединений, аналогично происходит и при сварке деталей, полученных методом литья.

Аналізу подвергли обе детали. Сварное соединение, показанное на рис. 1, б, подвергалось неоднократному исправлению дефектов (поры, трещины, непровар) и было забраковано по причине невозможности их устранения. Образец, взятый непосредственно после анодирования (см. рис. 1, а), не был предварительно зачищен.

Как видно из рис. 9, поверхность образца (см. рис. 1, а) изолированного от анодирования, имеет дефекты механической обработки в виде рыхлот (вырывов), ориентированных преимущественно в поперечном направлении. В этом же направлении имеются чередующиеся с шагом 100 мкм сглаживающие (затирающие) вышеуказанные дефекты линии (ширина 45 мкм), оставленные режущим инструментом при чистовой механической обработке.

Представленное на рис. 10 распределение легирующих элементов, бесспорно, отражает исключительно качественную картину, т.к. определить конкретное количество элемента в одной из частей бинарной системы, которой является переход от анодированного слоя к основному металлу, не представляется возможным. Тем не менее по нему можно судить о плотности и дисперсности этого распределения.

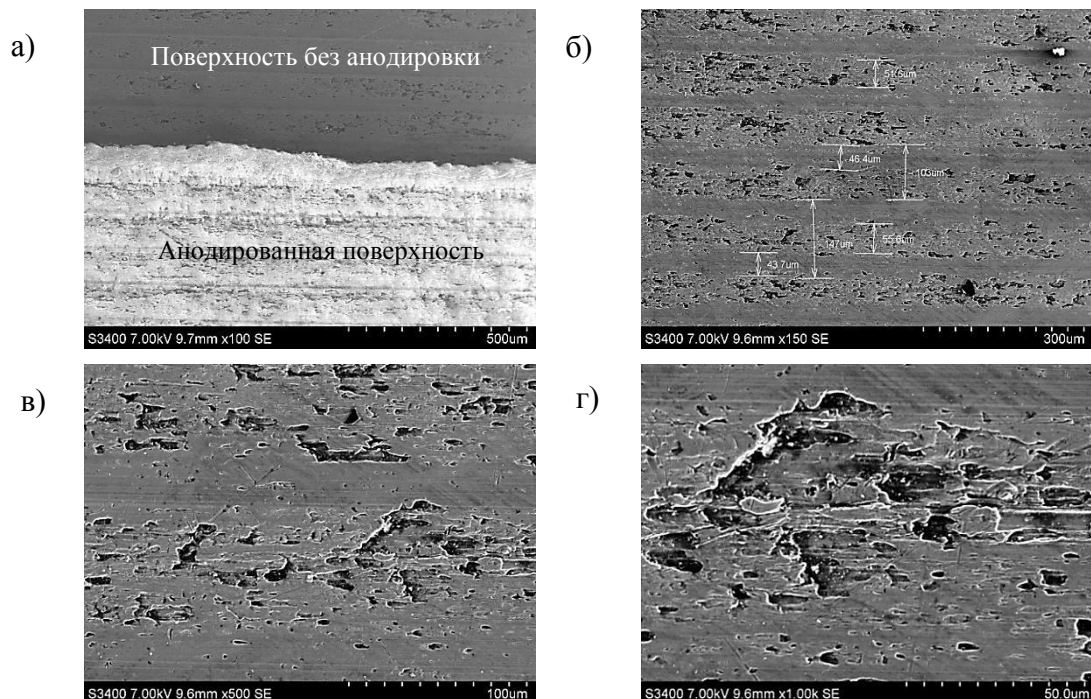


Рис. 9. Поверхность фланца после частичного анодирования: а – граница анодированной и неанодированной поверхностей; б; в; г – дефекты неанодированной поверхности

Анализ химического состава поверхности данного образца (см. табл. 2) показал присутствие серы (свыше 6 %), которая при превышении допустимых пределов может привести к уменьшению жидкотекучести и хладноломкости свариваемого материала (см. рис. 10).

Таблица 2

Результат химического анализа поверхности, подготовленной под сварку

Легирующий элемент, %					
Mg	Al	S	Mn	Fe	Ag
3,34	88,91	6,02	0,46	0,16	1,11

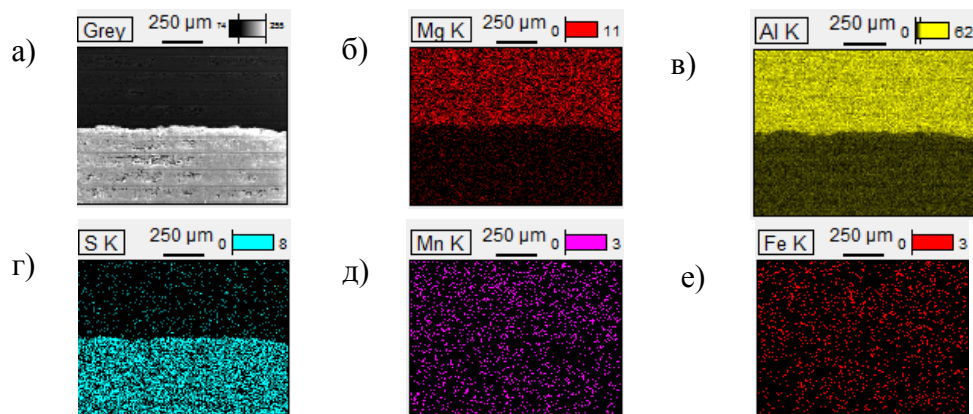


Рис. 10. Распределение легирующих элементов по поверхности анодированного образца: а – вид сканируемой поверхности; б – Mg; в – Al; г – S; д – Mn; е – Fe

Поверхность сварного образца с анодированным покрытием (см. рис. 1, б) отличается от предыдущего: его подготовили под сварку, используя механическую обработку шарошкой (при выборке дефектов) и металлической щёткой. И, как видно из рис. 11, этот метод не эффективен для устранения предшествующих ему дефектов (закатов, вырывов, пор), т.к. исходные дефекты дополнились дефектами механической обработки.

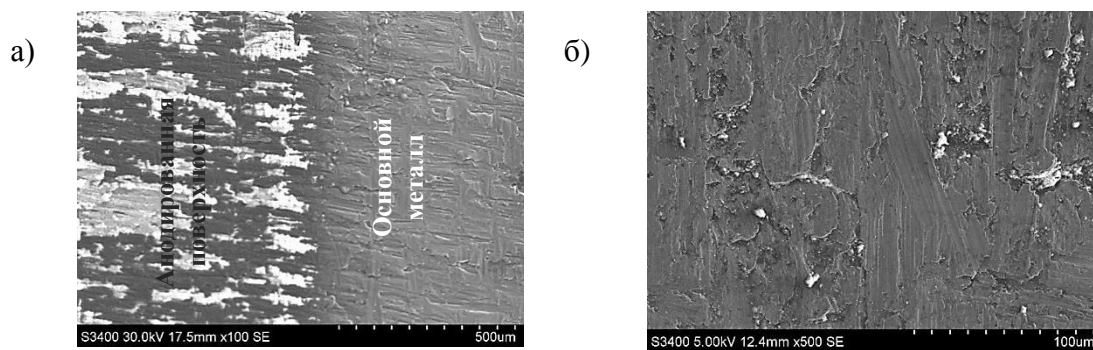


Рис. 11. Поверхность образца с анодированным слоем, подготовленным под сварку механическим способом: а – переходная зона; б – основной металл, увеличение

Химический анализ поверхности перехода сварного шва к литой детали с распределением элементов (см. рис. 12), показал, что как деталь, подвергаемая анодированию, так и сварной шов с литой деталью имеют на поверхности серу, ухудшающую свариваемость и качество сварных соединений. Характер распределения серы по поверхности исследуемого образца неравномерный – на поверхности литой детали серы больше, чем в сварном шве и детали анодированной.

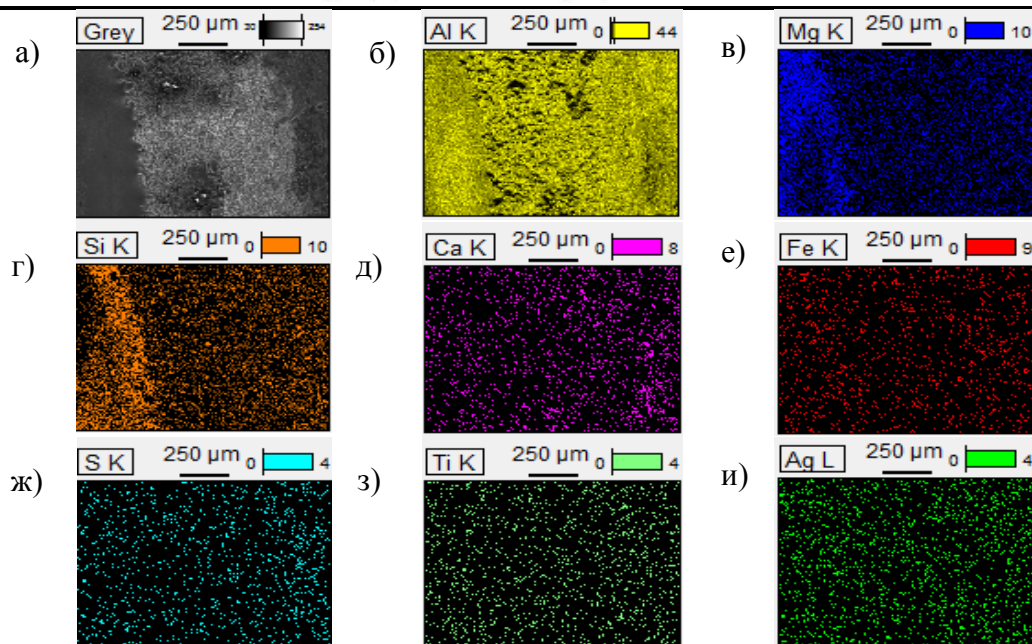


Рис. 12. Распределение химических элементов на поверхности перехода сварного шва к литой детали (ЗТВ): а – вид сканируемой поверхности; б – Al; в – Mg; г – Si; д – Ca; е – Fe; ж – S; з – Ti; и – Ag

Значение общего количества легирующих элементов на поверхности исследуемой области представлено в табл. 3.

Таблица 3
Результат химического анализа сварного соединения

Легирующий элемент, %							
Mg	Al	Si	S	Ca	Ti	Fe	Ag
1,69	85,73	10,75	0,25	0,28	0,11	0,32	0,87

Выводы

1. Сварка алюминиево-магниевых сплавов осложняется вероятностью порообразования, возникающего по причине формирования на их поверхности гидратированной оксидной плёнки, сложно удаляемой традиционными методами, поэтому механизм порообразования при сварке алюминиево-магниевых сплавов отличен от механизма при сварке алюминия. Этим обусловлен большой процент дефектных деталей (свыше 30 %) из числа предъявляемых впервые и доработанных.

2. Установлено, что основной причиной образования пор является водород, накапливающийся в оксидной плёнке свариваемых деталей. Причём технологические операции изготовления полуфабрикатов (литьё, штамповка, фрезерование и др.), подготовки их под сварку (химическая обработка, шабрение, зачистка металлическими щётками) также способствуют этому процессу, образуя поверхностные дефекты, увеличивающие фактическую площадь соединяемых кромок, т.е. площадь, на которой оксидная пленка развивается, а в последующем переносится в сварочную ванну. Кроме того, операция холодного анодирования способствует образованию сульфидов на поверхности свариваемых деталей, что неизбежно приводит к трещинообразованию и возникновению несплавлений в сварных соединениях.

3. Анализ процесса плавления сварочной проволоки при ручной подаче в зону действия дуги показал неравномерное её оплавление и сохранение (с увеличением размеров) поверхностных дефектов, способствующих накоплению капиллярно-конденсированной влаги и её внесению при возобновлении сварки. Этот факт усугубляется тем, что сварщику при-

ходится периодически останавливать сварку для вращения детали и осуществлять переварку части уже существующего шва, а также организацию замковых участков перекрытия формирующегося шва. На качество сварки отрицательно влияет отсутствие защиты корня шва.

4. Из данных исследований следует, что наилучшее время травления как для обычной, так и для полированной проволоки, а также основного металла (алюминиево-магниевые сплавы АМг2, АМг3, АМг6 и ВАЛ5) составляет 45...75 с, при котором обеспечивается устранение дефектов волочения и оптимальная величина оксидной плёнки.

5. Повышению качества сварных соединений, несомненно, могут способствовать уникальное высокоэффективное оборудование для ручной АрДЭС – установки MasterTig AC/DC 3000 и 3500W, имеющие возможность регулировки частоты импульсов сварочного тока, функцию «Минилог», позволяющую использовать два уровня тока (сварочного и дежурного, при котором переход между уровнями происходит кратковременным нажатием переключателя горелки) для поддержания дугового воздействия при повороте детали, и другие функции, а также разработка и использование универсальных механизированных вращателей.

6. Безукоризненное выполнение сварщиком всех указаний специального технологического процесса в отношении выполнения сварных соединений из алюминиево-магниевого сплава не гарантирует качества швов, что свидетельствует о недостаточном качестве подготовки сварочной проволоки и основного металла (растворенная поверхность, наличие загрязнений), о недопустимости вынужденных остановок с прерыванием дугового разряда для поворота трубы вручную.

Предложения и рекомендации

1. Проводить дополнительные мероприятия по активизации процесса промывки в проточной воде поверхностей деталей и сварочной проволоки после химического травления протиркой влажной ветошью под проточной водой либо в ультразвуковых ваннах.

2. Контролировать качество поверхности точёных деталей, поставляемых на позицию сварки, на предмет образования рыхлот (вырывов) при нарушении режимов резания.

3. Чётко отслеживать время травления 45...75 с.

4. Применять обработку спиртом свариваемых кромок непосредственно перед сваркой.

5. Производить сварку алюминиевых труб толщиной до 1,5 мм при частоте импульса 150...170 Гц, токе сварки 60...90 А.

6. При вынужденных остановках с прерыванием дугового разряда для поворота трубы вручную необходимо поддерживать горение дуги на дежурном токе с помощью функции «Минилог», которой снабжен сварочный аппарат MasterTig AC/DC 3500W.

7. После каждой остановки процесса сварки (непосредственно перед возобновлением сварки) производить ликвидацию (откусывание кусачками) оплавленного конца присадочной проволоки на расстоянии 2 см от торца либо (если это невозможно) использовать новую проволоку.

8. Необходимо разработать поворотное устройство, позволяющее вращать детали сложной конфигурации различного диаметра с минимальным размером установочной базы в сочетании с ручной АрДЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никифоров, Г. Д. *Металлургия сварки плавлением алюминия и его сплавов* / Г. Д. Никифоров. – М.: Машиностроение, 1972. – 164 с.
2. Алов, А. А. *Пористость сварных соединений алюминиевых сплавов* / А. А. Алов, Ю. А. Филатов, Л. А. Левченкова // *Автоматическая сварка*. – 1973. – № 1. – С. 70-71.
3. Рабкин, Д. М. *Металлургия сварки плавлением алюминия и его сплавов* / Д. М. Рабкин. – Киев: Наукова думка, 1986. – 256 с.



4. Никифоров, Г. Д. Условия возникновения пор при сварке алюминия и его сплавов / Г. Д. Никифоров, А. Г. Махортова // Сварочное производство. – 1961. – № 3. – С. 5-8.
5. Никифоров, Г. Д. Кинетика диффузионного увеличения объема пузырьков газа в расплаве / Г. Д. Никифоров, С. В. Радченко, В. С. Виноградов // Сварочное производство. – 1980. – № 5. – С. 1-4.
6. ГОСТ 7871-75. Проволока сварочная из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия. – Введ. 1976-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 13 с.
7. ГОСТ 4784-97. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки. – Введ. 2000-07-01. – Минск: Изд-во стандартов, 2001. – 20 с.

Евстигнеев А.И., Свиридов А.В., Дмитриев Э.А., Петров В.В.
A. I. Yevstigneev, A. V. Sviridov, E. A. Dmitriev, V. V. Petrov

ПРОБЛЕМЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ В ЛИТЬЕ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ

THE PROBLEMS OF METAL FORMIGN IN HOT INVESTMENT CASTING

Евстигнеев Алексей Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры «Машиностроение и металлургия» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mim@knastu.ru.

Mr. Alexei I. Yevstigneev – D.Sc. in Engineering, Professor, Department of Mechanical Engineering and Metallurgy, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. E-mail: mim@knastu.ru.

Свиридов Андрей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение и Металлургия» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: mim@knastu.ru.

Mr. Andrei V. Sviridov – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering and Metallurgy, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. E-mail: mim@knastu.ru.

Дмитриев Эдуард Анатольевич – доктор технических наук, профессор, ректор Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: rector@knastu.ru.

Mr. Eduard A. Dmitriev – D.Sc. in Engineering, Professor, Rector, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. E-mail: rector@knastu.ru.

Петров Виктор Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология переработки нефти и газа» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: tpng@knastu.ru.

Mr. Victor V. Petrov – D.Sc. in Engineering, Professor, Department of Crude Oil and Natural Gas Processing, Komsomolsk-on-Amur State Technical University. E-mail: tpng@knastu.ru.

Аннотация. В статье изложены основные направления развития и совершенствования технологических методов литья по выплавляемым моделям. Приводятся результаты исследований напряженно-деформированного состояния оболочковых литейных форм с глубоким анализом возможных причин возникновения дефектов. Описано влияние порообразующих веществ на свойства литейных форм и образование брака на отливках. Отдельное внимание уделено исследованиям влияния пористости на прочность слоистых оболочковых форм в литье по выплавляемым моделям.

Summary. The paper reviews the key lines of developing and improving industrial hot investment casting methods. We present the results of a study on shell moulds' stress-strain behaviour with a deep analysis of the possible causes of defects. We describe the impact of pore-forming agents upon the properties of casting moulds and the appearance of cast faults. Particular attention is being paid to studies on laminated investment moulds, their porosity and strength, when used in hot investment casting.

Ключевые слова: литье по выплавляемым моделям, напряженно-деформированное состояние, оболочковая литейная форма, порообразующие материалы.

Key words: hot investment casting, stress-strain state, investment mould, pore-forming materials.

УДК 621.74.045

Введение

Тенденции развития и совершенствования технологических процессов изготовления металлоизделий показывают, что качество металла, точность и чистота поверхности отливок являются основными критериями развития литейного производства.

Литье по выплавляемым моделям (ЛВМ) – передовой технологический метод, позволяющий получать отливки, по геометрической точности и чистоте поверхности максимально приближенные к готовой детали, не требующие в некоторых случаях механической обработки. ЛВМ – многооперационный метод получения отливок с широким диапазоном используемых материалов, что определяет высокую себестоимость литой продукции и недопустимость брака в ее производстве. В частности, изготовление керамических оболочковых форм (КОФ), удаление моделей, термообработка и заливка форм металлом обуславливаются деформационными процессами, протекающими вследствие технологических особенностей производства и свойств, используемых для КОФ материалов. Формирование литейных форм по выплавляемым моделям сопровождается усадочными процессами используемых материалов; удаление ВМ из КОФ – силовым воздействием расширяющегося при нагревании модельного состава (МС) на керамическую оболочку; термообработка КОФ – расширением МС и температурными деформациями в ее структуре при неравномерности полиморфных превращений; заливка КОФ – термоударом и гидродинамическим воздействием расплава металла [1].

Одним из перспективных в данном направлении является метод электрофоретического формообразования, особенностью которого является то, что КОФ изготавливают не послойным нанесением огнеупорных материалов, а посредством электрофоретического перемещения частиц огнеупорного наполнителя к модельному блоку в течение 2 – 3 мин. Получение форм для точного литья с помощью электрофореза, сокращает и в ряде случаев полностью исключает применение дорогостоящего этилсиликата, а монослойность электрофоретического осадка обеспечивает равномерное распределение физико-механических свойств по сечению формы [2, 3].

1. Исследования напряженно-деформированного состояния оболочковых литейных форм

Исследованиями напряженно-деформированного состояния (НДС) КОФ из кристаллического кварца на этилсиликатной связке определен характер деформационных процессов в ее слоях при сушке и выплавлении моделей. Характер изменения деформаций в слоях КОФ дает представление о механизме их протекания в оболочке, что позволяет судить о возникающих напряжениях. Напряжения, возникающие в КОФ, инициируют появление трещин и приводят к нарушению ее целостности, а в некоторых случаях – и к разрушению оболочки. Установлено, что в процессе сушки огнеупорных слоев происходит накопление деформаций в КОФ (см. рис. 1).

Одной из причин зарождения трещин в КОФ является давление МС на оболочку в результате температурного расширения при выплавлении модели (см. рис. 2). При погружении КОФ в выплавляющую среду происходит резкое снижение (релаксация) напряжений, накопленных на стадии формирования оболочки. Затем в результате температурного расширения модели и, как следствие, распирающего воздействия на стенки оболочки в ней возникает резкое увеличение деформаций, которые снижаются по мере расплавления модельного материала. Одновременно с силовым воздействием модельного материала на стенки оболочки в ней возникают деформации в результате температурного расширения самой оболочки.

Таким образом, при сушке КОФ НДС имеет длительный характер, на стадии выплавления скачок деформаций происходит за меньший промежуток времени. При таком характере изменения деформаций в КОФ на стадии выплавления ВМ повышается возможность трещинообразования в структуре оболочки, т.е. при выплавлении ВМ из КОФ возникающие максимальные деформации могут достигать критических значений, приводящих к разрушению КОФ.

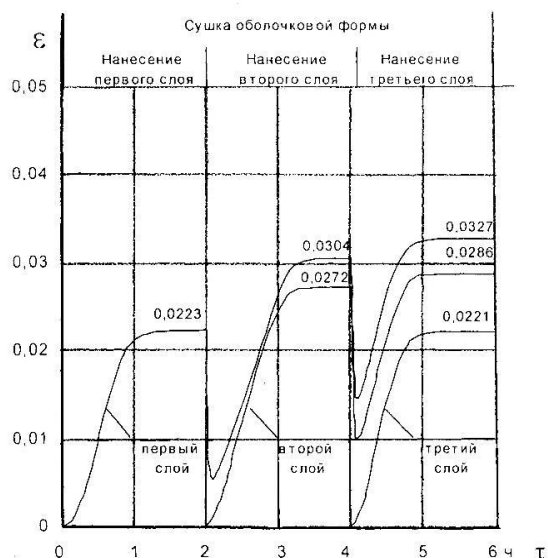


Рис. 1. Деформации в слоях КОФ при изготовлении

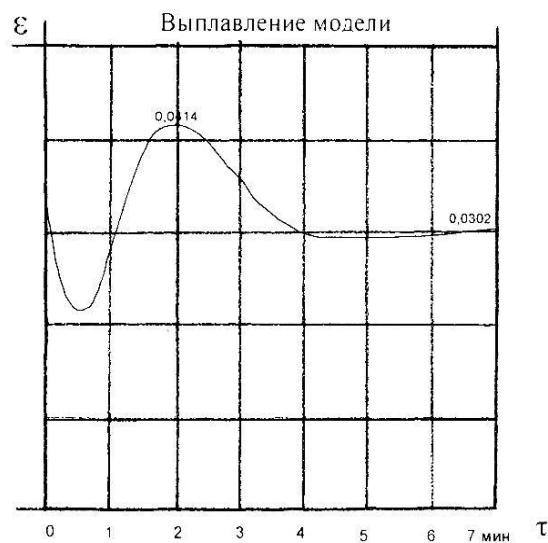


Рис. 2. Деформации в первом слое КОФ при выплавлении ВМ

В результате удара струи расплава (в данном случае моделирующей жидкости) (см. рис. 3) о зумпф КОФ при заливке происходит резкое изменение гидродинамического давления, значительно превышающее гидростатическое. Кроме того, во время заливки КОФ наблюдается повтор гидродинамического удара, что является следствием отражения струи от поверхности зумпфа и ее повторного падения. Такое воздействие на КОФ в совокупности с термоударом приводит к возникновению в структуре последней критических напряжений, в некоторых случаях приводящих к разрушению формы.

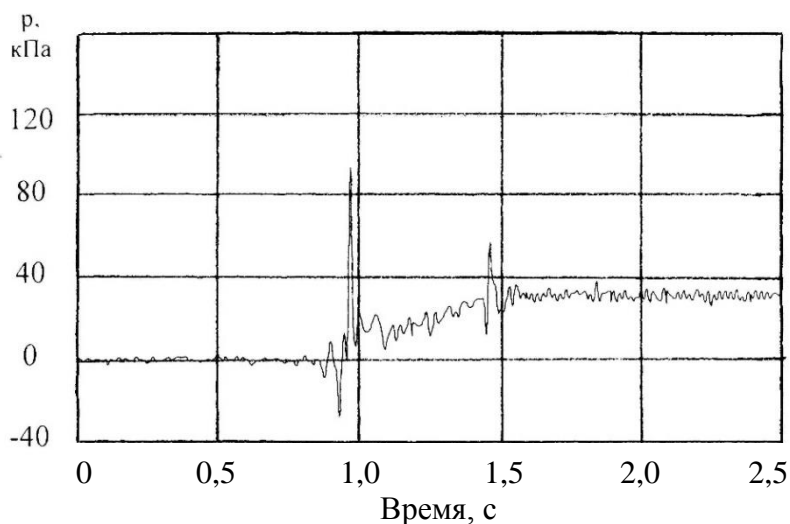


Рис. 3. Изменение гидромеханического давления при заливке КОФ струей моделирующей жидкости

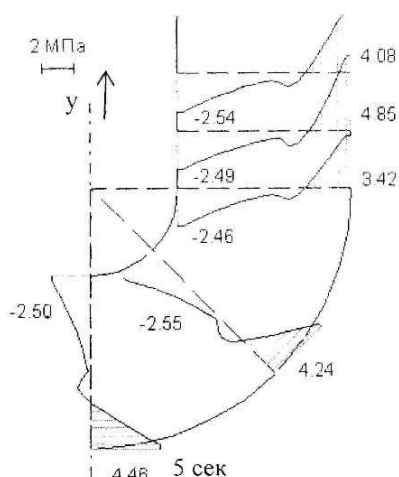


Рис. 4. Эпюры напряжений σ_y в КОФ при затвердевании отливки

Теоретическое исследование НДС КОФ при затвердевании отливок (см. рис. 4) показало, что возникающие в ее структуре напряжения σ_y имеют установленное распределение по толщине и по длине оболочки вследствие гидростатического давления. При этом численные значения напряжений значительно превышают предельно допустимые: $[\sigma_p] = 2,5 - 3,0$ МПа; $[\sigma_{сж}] = 3,0 - 3,5$ МПа. На пятой секунде происходит образование затвердевшей металлической корочки, которая принимает гидростатическое давление на себя и воздействие на КОФ оказывается только тепловым потоком. Характер распределения других напряжений (σ_x, σ_z) в структуре традиционной КОФ подчиняется отмеченной закономерности и по численным значениям значительно меньше σ_y . Анализ НДС

показал вероятность растрескивания внутренних слоев КОФ, приводящего к браку отливок.

Основными свойствами материалов КОФ, определяющими физико-механические свойства последних на стадиях технологической обработки, являлись КТР (α) и модуль упругости (E) [4]. Поэтому использование в формировании оболочек материалов с низкими КТР и требуемым модулем упругости, как предполагалось ранее, могло быть решением возникших проблем.

Наибольшее распространение в ЛВМ отечественной промышленности нашел кристаллический кварц [4], наиболее часто встречающийся в природе. Однако КОФ, изготавливаемые на его основе, обладают неудовлетворительной прочностью, трещиностойкостью, в том числе и формируемых слоев, термостойкостью. Для повышения эффективности использования кристаллического кварца было разработано множество технологий изготовления КОФ.

Увеличением относительной толщины КОФ достигнуто некоторое повышение надежности технологического процесса литья, а именно: увеличением количества слоев без изменения их структуры; использованием более крупного обсыпочного материала без изменения количества слоев [5]. Недостатками методов увеличения толщины КОФ является их растрескивание при сушке, что подтверждает их нерациональность.

Требуемого качества КОФ можно достичь повышением собственной прочности связующего, с увеличением количества контактных поверхностей (перемычек) зерен основы на единицу площади поперечного сечения оболочки, а также при уменьшении толщины пленки связующего на зернах [5]. Повышение собственной прочности связующего осуществляется выбором оптимальной рецептуры, режимом и способом приготовления связующего, а также соблюдением соответствующего режима сушки слоев огнеупорного покрытия. Кроме того, увеличение количества контактных поверхностей в единицу площади поперечного сечения оболочки можно осуществить уменьшением дисперсности огнеупорного наполнителя и повышением его количества в суспензии [5]. Рассмотренные методы повышения качества КОФ просты в осуществлении и не требуют существенных дополнительных затрат. Однако прочностные характеристики получаемых оболочек, их трещиностойкость на стадии формирования не удовлетворяют предъявляемым требованиям.

Повышение технологических свойств КОФ можно достичь пропиткой различными упрочняющими составами, заполняющими капилляры оболочки, что позволяет достигнуть их упрочнения на 20 – 30 %, но не предотвращает потери при изготовлении. Повышение прочности КОФ, их устойчивость к растрескиванию на всех этапах технологического процесса можно достичь армированием, при котором в структуру огнеупорных слоев вводится

прочная и пластичная арматура. В ЛВМ для армирования КОФ могут использоваться органические и неорганические материалы как синтетические, так и природного происхождения.

Прочность КОФ при воздействии высоких температур обеспечивают неорганические материалы: рубленая стальная проволока или порошок, аглопорит, керамзит, зольный графит, шамот, асбест, различные термостойкие волокна, нитевидные кристаллы ряда металлов, сульфидов и оксидов, дробленая или молотая слюда, вспученный вермикулит, отходы абразивной обработки отливок, графит, шлак от сгорания каменного угля и т.д. Армирование КОФ термостойкими неорганическими материалами повышает прочность, но не предотвращает растрескивание последних при прокаливании и заливке металлом как в опорном наполнителе, так и без него. Растрескивание КОФ происходит по причине различия КТР арматуры и материала матрицы. В матрице возникают напряжения, приводящие к зарождению и развитию трещин.

Органические армирующие материалы, а также некоторые неорганические способны обеспечить повышение прочности оболочек лишь до воздействия высоких температур, после чего они либо выгорают, либо деструктируют со снижением прочности и увеличением пластичности, что особенно предпочтительно при формировании КОФ. Кроме перечисленных, для армирования применяют материалы, обеспечивающие повышение податливости КОФ и трещиностойкости при снижении прочности на всех технологических этапах, например, вспученный перлит.

На основании проведенного анализа методов повышения технологических свойств КОФ наиболее перспективным представляется армирование выгорающими при термообработке и пористыми материалами. Эти материалы имеют низкий КТР либо понижают его в самой форме (последнее справедливо для выгорающих материалов), создавая пористость. Преднамеренное создание достаточно частых трещин в виде пор замедляет растрескивание КОФ на стадиях ее изготовления и технологической обработки. Зародившаяся и развивающаяся трещина останавливается при слиянии с порой, затупляясь в ней. Для дальнейшего продвижения этой трещины необходим дополнительный энергетический импульс. Важным условием для остановки прогрессирующей трещины является размер поры, который должен превышать радиус скругления острия (кончика) трещины [6 – 8]. При этом немаловажное значение имеет дисперсность пор в структуре, а именно, с уменьшением их размера при увеличении степени пористости наблюдается менее интенсивное снижение прочности керамики, чем для крупных пор. В работе [9] уделяется внимание и геометрической форме поры. Предпочтительной является пора округлой формы, т.к. при нагружении напряжения вокруг нее распределяются равномерно.

При исследовании пористых электрофоретических литейных форм в суспензию вводили бумажное волокно [10], серебристый графит [11], а также использовали способ барботажной обработки суспензий для ее насыщения мелкими пузырьками воздуха [12]. Было установлено, что использование бумажного волокна и графита улучшает термостойкость и газопроницаемость литейных форм из-за образования большого количества мелких пор в оболочке при их сгорании.

Исследование термической стойкости образцов оболочковых форм проводили согласно ГОСТ 7875.0-94 и ГОСТ 7875.2-94, определяя количество циклов теплосмен. В суспензиях меняли только концентрации бумажного волокна и графита, с соответствующей корректировкой влажности смеси, содержание остальных компонентов не варьировалось. Как было установлено, образцы КОФ, изготовленные из суспензий, содержащих бумажное волокно в количестве 0,2 % и более, выдерживают 1 – 2 теплосмены, что позволяет изготавливать качественные отливки. Для суспензий с применением графита его концентрация должна быть в интервале 3 – 6 % от массы смеси [10 – 13].

Совокупность всех перечисленных факторов снижает склонность керамики к растрескиванию при теплосменах. В данном случае, пористость снижает КТР и модуль упругости оболочки. Обуславливается это возможностью достаточно свободного расширения и пере-

мещения элементов структуры посредством наличия пор. Независимо от разупрочняющего действия пористости, она может применяться для релаксации напряжений, например, в структуре КОФ на стадиях изготовления и технологической обработки без присущих для ранее рассмотренных методов недостатков. Образование пористости в структуре КОФ представляется целесообразным [1].

2. Влияние пористости на прочность слоистых оболочковых форм в ЛВМ

Пористые слои вводят в структуру литейных оболочковых форм по выплавляемым моделям для повышения трещиностойкости и термопрочности [14 – 17]. При определении механических характеристик таких форм, получаемых обычно послойным формированием, необходимо учитывать их слоистость [14 – 16].

Для определения механических характеристик материала оболочковых форм рекомендуется схема испытаний образцов-пластин при трехточечном изгибе (см. рис. 5, а) [17].

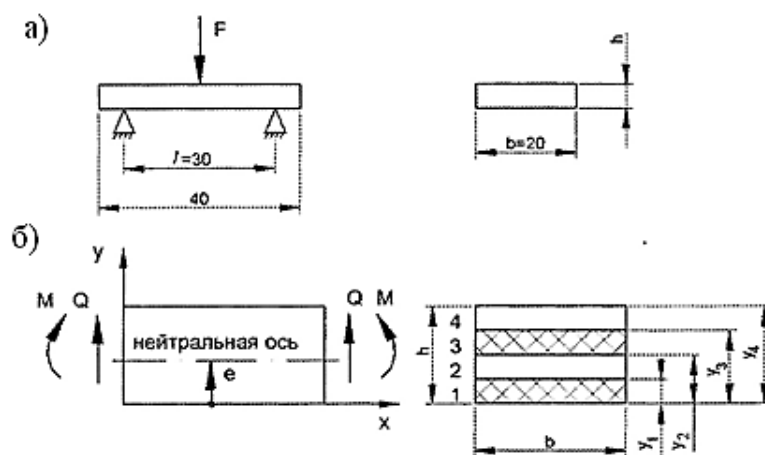


Рис. 5. Слоистый образец-пластина:

а – схема испытаний; б – структура материала; 1...4 – номера слоев

Исследовалась прочность образцов – пластин стандартных размеров ($b = 20$ мм; $l = 30$ мм), с различной пористостью слоев и различными комбинациями расположения слоев по толщине образца (см. рис. 6).

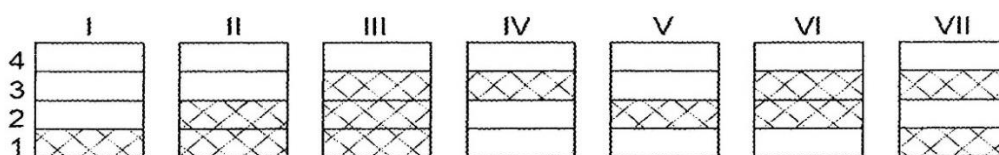


Рис. 6. Исследованные варианты расположения пористых слоев 1...4 по толщине образцов-пластин

Истинная пористость i -го слоя $\Pi_H^{(i)}$ задается в процентах ($0 \leq \Pi_H^{(i)} \leq 100$ %).

Отношение плотности слоев $\eta_i = \rho_i / \rho_0 = (100 - \Pi_H^{(i)}) / 100$. Модуль продольной упругости материала i -го слоя $E_i = \eta_i E_0$, где E_0, ρ_0 - модуль упругости и плотность слоя без порообразующих добавок.

Изгибная жесткость образца-пластины определяется из соотношения:

$$D = I_2 - I_1^2 / I_0,$$

где $I_n = bE_0 \int_0^h \eta_i y^{n+1} dy$; $n=0, 1, 2$.

В общем случае структура материала не симметрична по толщине и координата нейтральной оси e (см. рис. 5, б) определяется из отношения: $e = I_1 / I_0$. Начало координат принимается на нижней поверхности.

Нормальные (σ_x) и касательные (τ_{xy}) напряжения определяются по формулам

$$\sigma_x = \eta_i E_0 \frac{M}{D} (y - e),$$

$$\tau_{xy} = -\frac{QE_0}{D\eta_i b_0} \int_0^y \eta_i (y - e) dy.$$

Пористость слоев изменяется в пределах 10 - 40 %, что соответствует изменению величины коэффициента η в пределах 0,6 - 0,9. Пористость изменялась в слоях, которые заштрихованы на рис. 2, их толщина равна $h = 1,05$ мм.

Величины разрушающих нагрузок в зависимости от пористости слоев для прокаленных образцов приведены на рис. 7 [15]:

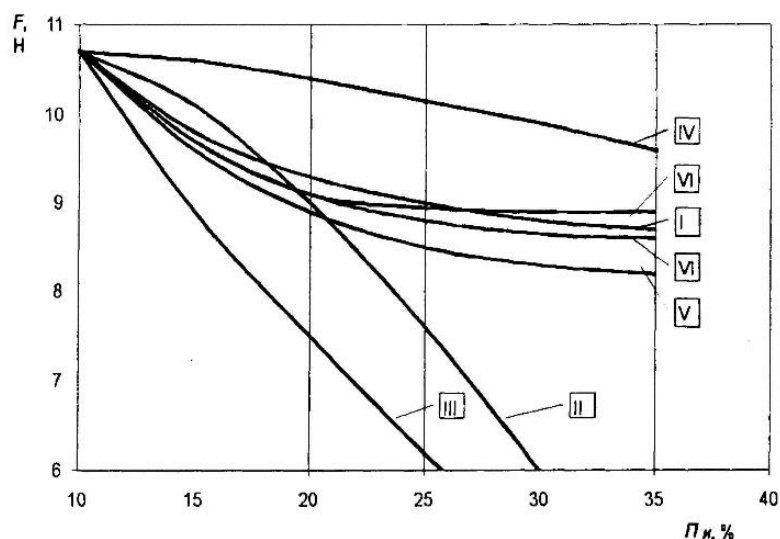


Рис. 7. Зависимость величины разрушающей нагрузки от пористости слоев для различных структур

Номера структур на графиках рис. 7 соответствуют рис. 6.

Было установлено, что разрушение хрупкого материала образцов-пластин начинается в растянутой области. Учитывая различную пористость слоев, определять предел прочности материала по величине разрушающей нагрузки и максимальным напряжениям растяжения на нижней поверхности нельзя. Образец разрушается послойно, на характер разрушения влияет и низкая сдвиговая жесткость слоев с порообразующими добавками. Касательные напряжения по толщине слоистого образца изменяются ступенчато [15]. Эффективная (рабочая) ширина i -го слоя зависит от пористости $b_i = \eta_i b_0$, где b_0 – ширина слоя без порообразующих добавок.

Расчет на прочность слоистых образцов при трехточечном изгибе необходимо производить по предельным нагрузкам, а не по максимальным напряжениям.

На рис. 8 представлены зависимости величины максимальных растягивающих напряжений, вычисленных по величине разрушающей нагрузки в нижней точке образца при $y_i = 0$ для образцов всех структур.

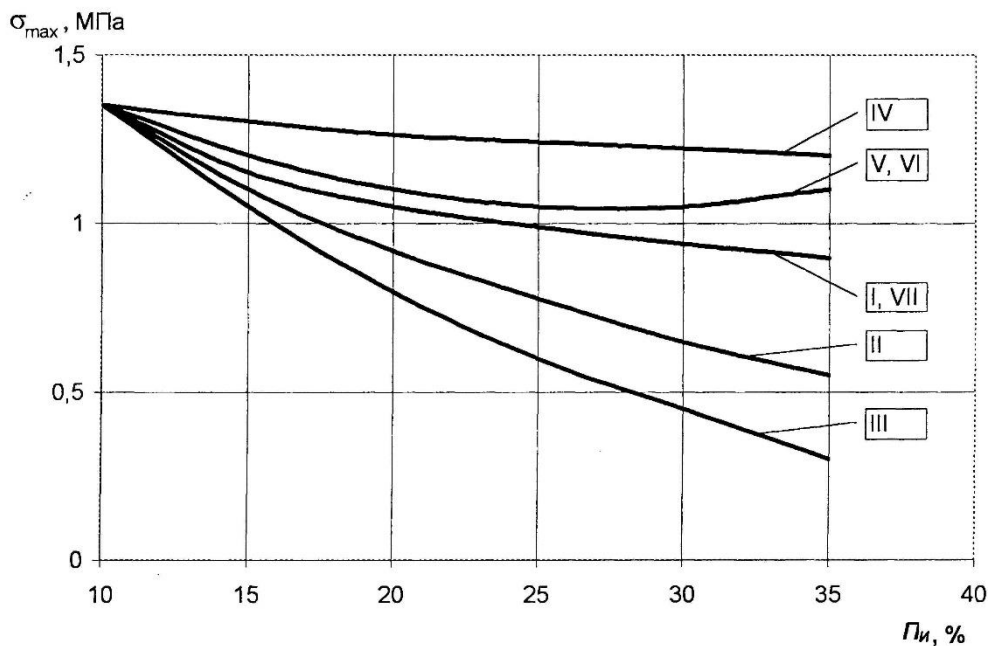


Рис. 8. Зависимость величины максимальных растягивающих напряжений в образцах-пластинах от пористости слоев

График зависимости для образцов со структурой III на рис. 8 определяет зависимость предела прочности исследованного материала от пористости. Эту зависимость можно использовать для оценки прочности слоев различной пористости при формировании оптимальных структур оболочковых форм по выплавляемым моделям [17].

3. Выводы

1. Изучению структур пористых КОФ и их влияния на физико-механические характеристики было уделено недостаточное внимание. Изучению подвергались лишь структуры КОФ с пористостью во внутренних слоях, с пористостью в опорных слоях, с равномерно распределенными по слоям КОФ крупными и мелкими порами: с постепенно возрастающим диаметром пор от облицовочного к опорным слоям.

2. Порообразующими могут считаться огнеупорные материалы с удельной прочностью до термообработки и после нее меньшей прочностью КОФ, каким является, например, вспученный перлит. Истинно пористые оболочки можно получить при использовании, например, барботажного способа приготовления и обработки суспензии.

3. Применение пористости в структуре КОФ позволило изменить характер деформаций в слоях и снизить их на всех технологических этапах получения отливок. Исследование влияния параметров пористости структур на НДС КОФ позволило мобильно управлять технологическим процессом производства отливок высокого качества с низкой себестоимостью, что обуславливает перспективность данного направления формообразования. Однако образование пористых структур при изготовлении КОФ является методом частичного решения проблем, возникающих в процессе формообразования в ЛВМ. Поиск новых технологических решений формообразования керамических оболочек, обеспечивающих предотвращение брака последних на всех этапах обработки и заливки расплавом, является основным и перспективным направлением усовершенствования технологического процесса формообразования в ЛВМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Евстигнеев, А. И. Решение проблем формообразования в литье по выплавляемым моделям / А. И. Евстигнеев, И. Г. Сапченко // Литейное производство. – 2012. – № 9. – С. 40-43.
2. Специальные технологии литейного производства: учеб. пособие. Ч. 2 / под общ. ред. А. И. Евстигнеева, Е. А. Чернышова. – М.: Машиностроение, 2012. – 436 с.

3. Свиридов, А. В. Изготовление оболочковых литейных форм с использованием электрофореза / А. В. Свиридов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № 1. – С. 61-66.
4. Литье по выплавляемым моделям / под ред. Я. И. Шкленника, В. А. Озерова. – М.: Машиностроение, 1984. – 408 с.
5. Дошкарж, И. Точное литье в керамические формы / И. Дошкарж [и др.]; пер. с чеш. – М.: Mashgiz, 1962. – 243 с.
6. Эванс, А. Г. Конструкционная керамика / А. Г. Эванс, Т. Г. Лэнгдоп; пер. с англ. – М.: Metallurgia, 1980. – 255 с.
7. Финкель, В. М. Физические основы торможения разрушения / В. М. Финкель. – М.: Metallurgia, 1977. – 360 с.
8. Стрелов, К. К. Теоретические основы технологии огнеупорных материалов / К. К. Стрелов. – М.: Metallurgia, 1985. – 480 с.
9. Шипулин, Н. В. Упрочнение оболочковых форм в производстве литья по выплавляемым моделям / Н. В. Шипулин // Прогрессивная технология литейного производства: сб. науч. тр. – Горький: ВВКИ, 1962. – С. 512-516.
10. Пат. 2481917 Российская Федерация, МПК В22С 1/02. Суспензия для изготовления форм точного литья методом электрофореза / Дмитриев Э. А., Свиридов А. В.; заявитель и патентообладатель ГОУВПО “КНАГТУ”. – № 2011142658/02; заявл. 19.12.2011; опубл. 20.05.2013. Бюл. № 15. – 2 с.
11. Пат. 2488458 Российская Федерация, МПК В22С 1/02. Способ изготовления выплавляемых моделей для получения оболочковых форм методом электрофореза / Дмитриев Э. А., Свиридов А. В.; заявитель и патентообладатель ГОУВПО “КНАГТУ”. – № 2011142658/02; заявл. 19.12.2011; опубл. 20.05.2013. Бюл. № 13. – 3 с.
12. Пат. 115260 Российская Федерация, МПК В22С 1/02. Устройство для изготовления форм точного литья методом электрофореза / Дмитриев Э. А., Свиридов А. В.; заявитель и патентообладатель ГОУВПО “КНАГТУ”. – № 2011142759/02; заявл. 19.12.2011; опубл. 20.05.2013. Бюл. № 10. – 3 с.
13. Евстигнеев, А. И. Совершенствование технологии формообразования электрофоретических оболочек / А. И. Евстигнеев, А. В. Свиридов, Э. А. Дмитриев, В. В. Петров // Литейное производство. – 2014. – № 9. – С. 32-34.
14. Определение механических характеристик оболочковых форм с учетом их слоистости / А. И. Евстигнеев, И. Г. Сапченко, В. Н. Тышкевич, В. В. Васин, В. И. Куренков // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 1991. – № 2. – С. 51-53.
15. Влияние пористости на прочность оболочковых форм по выплавляемым моделям / А. И. Евстигнеев, И. Г. Сапченко, В. Н. Тышкевич, В. В. Васин // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 1991. – № 8. – С. 51-53.
16. Определение механических характеристик слоистых оболочковых форм / А. И. Евстигнеев, И. Г. Сапченко, В. Н. Тышкевич, Г. И. Тимофеев // Литейное производство. – 1992. – № 8. – С. 25.
17. Тышкевич, В. Н. Влияние пористости на прочность слоистых оболочковых форм по выплавляемым моделям / В. Н. Тышкевич, А. И. Евстигнеев, К. В. Худяков // Современные наукоемкие технологии. – 2011. – № 4. – С. 58-60.

Верхотуров А. Д., Кузьмичев Е. Н., Коневцов Л. А.
A. D. Verkhoturov, E. N. Kuzmichev, L. A. Konevtsov

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫЕ ВОЛЬФРАМОМ СПЛАВЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛЬФРАМСОДЕРЖАЩЕГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

PROMISING TUNGSTEN HIGH ALLOYED STEELS PRODUCED FROM TUNGSTEN- CONTAINING MINERAL RAW

Верхотуров Анатолий Демьянович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института водных и экологических проблем ДВО РАН (Россия, Хабаровск); 680021, г. Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, 40; 89098506891. E-mail: verhoturov36@mail.ru.

Mr. Anatoly D. Verkhoturov – D.Sc. of Engineering, Professor, Senior Researcher Fellow, Institute of Water and Environmental Problems, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; 40, Kim Yu Cheng Str., Khabarovsk, 680021, Russia. E-mail: verhoturov36@mail.ru.

Кузьмичев Евгений Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Локомотивы» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск); 680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47; 89622205080. E-mail: accord@festu.khv.ru.

Mr. Yevgeny N. Kuzmichev – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Locomotives, Far Eastern State Transport University; 47, Serysheva Str., Khabarovsk, 680021, Russia; telephone: +7 (962) 2205080. E-mail: accord@festu.khv.ru.

Коневцов Леонид Алексеевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института материаловедения Хабаровского научного центра ДВО РАН (Россия, Хабаровск); 680021, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 153, 89241059746. E-mail: konevts@ya.ru

Mr. Leonid A. Konevtsov – PhD in Engineering, Senior Research Fellow, Institute of Materials Technology, Khabarovsk Research Centre, Far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences; 153, Tikhookeanskaya Str., Khabarovsk, 680021, Russia; telephone: + 7 (924) 1059746. E-mail: konevts@narod.ru.

Аннотация. Способом электрошлакового переплава низкоуглеродистой стали с использованием керамических флюсов на основе шеелитового концентрата получены высоколегированные вольфрамом стали. Физико-механические свойства вольфрамсодержащих сталей приближаются к свойствам инструментальных сталей.

Summary. High-alloyed tungsten steels are obtained by electroslag remelting of carbon alloy welding wire using ceramic flux based on scheelite concentrates. The physical mechanical properties of such steels obtained by our technology correspond to those of instrumental steels.

Ключевые слова: шеелитовый концентрат, восстановление вольфрама, электрошлаковый переплав, высоколегированные сплавы, износостойкость, твердость.

Key words: high tungsten alloy, tungsten steel, electroslag remelting, ceramic flux, scheelite concentrated ore, technology, instrumental steel

УДК 621.791–03

Введение

Концепция устойчивого и безопасного развития Дальневосточного региона предполагает, прежде всего, доминирование в долгосрочной перспективе ресурсного сектора экономики, которое будет являться безальтернативным компонентом его экономической стратегии [10, 12], а высокая зависимость ресурсного сектора от международных рынков сырья “по-

тенциально создаёт ситуацию “ресурсного проклятия” – эффекта деиндустриализации”. При этом для ДВ-региона предлагается компромиссное решение:

1. Создание комплекса высокотехнологических производств по переработке регионального и транзитного сырья с экспортом и межрегиональным возвратом продукции переработки.

2. Формирование промышленных кластеров высокотехнологического характера (аэрокосмического, судостроительного, биотехнологического, нефте- и газохимического и т.д.).

Создаются авиасудостроительный и аэрокосмический кластеры, которые позволяют решить только часть задач по экономическому, а также промышленному росту и дальнейшему развитию региона.

Однако промышленные производства в рамках созданных кластеров не могут обойтись без современных высокотехнологичных материалов, которые должны производиться в регионе добычи минерального сырья.

В настоящее время основой промышленности ДВ региона являются добывающие, сырьевые производства с низкой долей добавленной стоимости. Большинство экономистов [8, 10, 12] сходятся во мнении, что “по крайней мере, в первой половине XXI века российская экономика сохранит сырьевую направленность, т.к. предприятия, входящие в состав минерально-сырьевого комплекса, обеспечивают более 50 % ВВП и до 70 % экспортных поступлений”.

Следовательно, сырьевая экономика для ресурсодобывающих регионов требует нового подхода, основанного на использовании последних достижений промышленности, применения высокотехнологических процессов – “новой индустриализации” [12].

Основой решения проблемы получения новых материалов в рамках концепции устойчивого развития может стать циклический круговорот вещества и материалов (ЦКВМ). Впервые подобный подход был предложен в рамках концепции устойчивого развития в 1978 г. [1] “радикальное улучшение всего спектра взаимодействия общества с окружающей средой возможно только на пути перехода к принципиально новой технологии, которая позволила бы обществу вписаться в “замкнутый круг” естественных процессов на планете”. В Германии уже более 10 лет изучается, так называемый, “цикл материалов” [13]. При этом отмечается значительное влияние нового подхода на формирование новой обобщающей науки о материалах – “интегрального материаловедения”, то есть прослеживается “жизнь материалов” всех групп при их использовании в виде средств человеческой деятельности от “зарождения до смерти” и повторного использования в виде других средств деятельности.

Такой подход с учетом экологической безопасности приобретает большое значение в будущем. Анализ движения на начальном участке вещества и материалов (геология – горное дело – металлургия – материаловедение) (см. рис.1) показывает, что эффективность процесса получения материалов повышается, если расстояние между циклами L_i и время каждого цикла t_i будут минимальными.

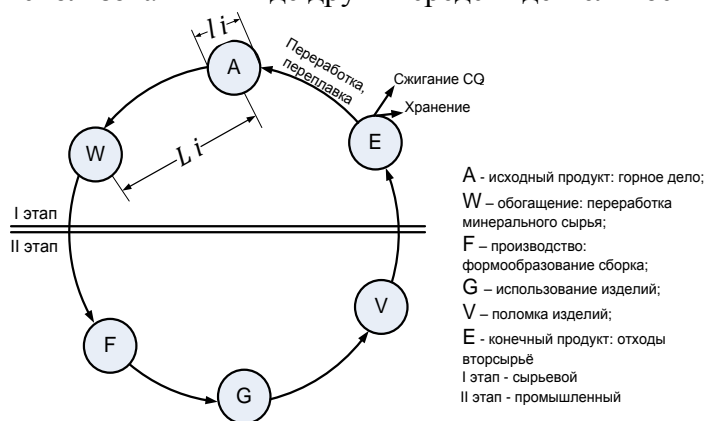


Рис. 1. Циклический круговорот вещества в природе

В связи с этим для устойчивого развития региона необходимо организовать переработку минерального сырья в регионе добычи при использовании высоких технологий, обеспечивающих обработку сырья и материалов в экологически приемлемых условиях [11], что способствует минимальному повышению энтропии как внутри цикла, так и между циклами.

В ряде работ [2 - 4] отмечается перспективность использования концентрированных потоков энергии для получения материалов и изделий из минерального сырья в регионе его добычи. Исследования основаны на комплексном использовании минерального сырья при

воздействии на него концентрированными потоками энергии, с целью извлечения легирующих элементов и оксидов, что соответствует предлагаемой теории уменьшения энтропии при получении конечного материала, минуя стадию первичного обогащения и переработки. Сокращение периода производства материала происходит за счет использования современных технологий, исключающих применение экологически опасных пиро-, гидрометаллургических процессов. Использование таких технологий позволит обеспечить не только комплексную и рациональную переработку, но и выполнение экологических требований, превращение ресурсодобывающих – в развитые регионы, в поставщиков материалов, изделий, продуктов.

В данной работе для получения новых легированных вольфрамом сплавов на основе минерального сырья используется технология электрошлакового переплава (ЭШП), обладающая рядом таких преимуществ, как высокая производительность (по скорости плавления электрода вне конкуренции с другими способами), хорошая защита шлаковой ванны, возможность формирования швов практически неограниченных размеров, сокращение объема последующей механической обработки и ряд других [9]. В связи с этим в работе поставлена задача по повышению эффективности ЭШП за счет использования различных восстановителей.

Оборудование и материалы

Для решения задач получения легированного металла авторами использовался динамический подход, в рамках которого предполагалось за счет задания начальных условий (формирование шихты флюса) и факторов, влияющих на поведение шлаковой ванны (ток, напряжение, диаметр переплавляемой стали и др.) иметь представление о всех последующих состояниях системы.

В качестве легирующего минерального сырья был принят шеелитовый концентрат, производимый Лермонтовским горнообогатительным комбинатом Приморского края, масс. %: WO_3 - 59,5; CaO - 26,8; MgO - 1,65; SiO_2 - 2,9; TiO_2 - 0,2; Fe_3O_4 - 1,84; Fe_2O_3 - 3,78; FeO - 0,61; Na_2O - 0,24; K_2O - 0,15; S - 0,2; P - 0,31; прочие - 1,86. Кроме того, использовались известняк, флюорит и гранит месторождений Хабаровского края.

Флюсы изготавливались по стандартной технологии. В качестве присадочного материала принята низкоуглеродистая сварочная проволока Св-08 диаметром 3 мм.

Эксперименты осуществлялись по двум направлениям:

- 1) исследование и выбор наиболее рационального восстановителя в составе флюса для обеспечения максимального перехода легирующего элемента в переплавляемый присадочный материал;
- 2) выбор начальных условий факторов, влияющих на поведение сварочной ванны, с целью получения сплавов с высоким содержанием вольфрама и свойствами, близкими к распространенным инструментальным сталям.

Для проведения исследований использовалось как типовое, так и оригинальное оборудование. Электрошлаковая наплавка и переплав выполнялись на спроектированной и изготовленной авторами установке на режимах: $I = 350 \dots 1000$ А, $U = 20 \dots 90$ В. Образцы для анализа формировались в водоохлаждаемом медном кристаллизаторе.

Металлографический анализ сплавов проводился с помощью микроскопов Лабомет-2 и агрегатного ЕС МЕТАМ РВ-21 при увеличениях до 1000 \times . Микротвердость определялась на приборе ПМТ-3М. Дифференциально-термический анализ осуществлялся на дериватографе Q-1000. Фазовый состав полученных материалов изучался на рентгеновском дифрактометре «ДРОН-7». Исследование элементного состава полученных сплавов проводилось на рентгеновском флуоресцентном кристалл-дифракционном сканирующем спектрометре «Спектроскан МАКС-JV» и растровом электронно-зондовом микроскопе ISM-35C (JEOL, Япония) с приставкой электронно-зондового микроанализатора – рентгеновского спектрометра 35-SDS с волновой дисперсией.

Для анализа физико-механических и эксплуатационных свойств сплавов использовались следующие приборы: для измерения твердости – ТШ-2М, ТК-14, ТП-2; для исследова-

ния износостойкости – машина ИИ-5018 в условиях трения без смазки при нагрузке 50 кгс и контртелом из сталей У10, Р6М5, Р9.

Результаты и обсуждения

В результате проведенных исследований установлено, что для повышения текучести шлака и улучшения его отделимости в состав флюса помимо шеелитового концентрата необходимо вводить флюорит, широко применяемый для обозначенных целей в металлургии [7]. При введении в состав флюса 20 % флюорита Ярославского месторождения Приморского края в слитке полностью исчезают поры и раковины. Шлак становится менее вязким, что приводит к выравниванию температуры в различных областях ванны, лучшей ее дегазации, более низкой скорости кристаллизации жидкого металла, исключая возникновение закалочных фаз.

Кроме того, указывается на неспособность флюорита обеспечить условия для полного перехода вольфрама из шеелитового концентрата в металл и делается вывод о необходимости дополнительного введения восстановителя, который бы повысил степень восстановления и еще более активизировал микрометаллургические процессы [9].

В качестве восстановителей вольфрама из оксида WO_3 необходимо использовать элементы, имеющие большее сродство к кислороду, чем вольфрам. Химическая активность элементов (по мере её уменьшения), используемых самостоятельно либо входящих в состав наплавочных материалов, при реакции с кислородом следующая: $Al \rightarrow Zr \rightarrow Ti \rightarrow Si \rightarrow B \rightarrow V \rightarrow Mn \rightarrow Nb \rightarrow Cr \rightarrow Mo \rightarrow W \rightarrow Fe \rightarrow Co \rightarrow Ni \rightarrow Cu$ [7].

Известно, что элементы, стоящие в ряду сродства к кислороду левее железа, в той или иной степени окисляются, поэтому степень восстановления легирующего элемента из оксидов тем ниже, чем левее находится элемент от железа. Вольфрам в этом ряду располагается рядом с железом, что создает хорошие предпосылки для восстановления последнего из оксида. Для восстановления вольфрама могут использоваться элементы, находящиеся левее его в ряду активности.

В качестве восстановителей вольфрама были приняты широко используемые в настоящее время при производстве сварочно-наплавочных материалов ферросплавы (ферромарганец и ферросилиций), а также высокоактивные по отношению к кислороду элементы – углерод в виде порошка графита и алюминий в виде пудры.

Шихта флюсов формировалась на основе шеелитового концентрата с введением 20 масс. % флюорита и 4 - 16 масс. % восстановителя, содержание которого увеличивалось за счет уменьшения основы.

В ходе проведенных исследований (см. рис. 2), установлено, что наибольший переход вольфрама в переплавляемый металл наблюдается при содержании восстановителя в шихте флюсов в пределах 8 - 10 масс. %.

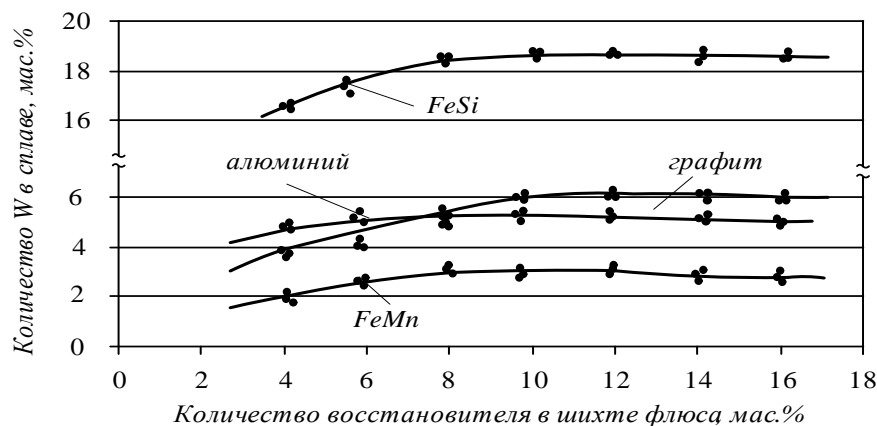


Рис. 2. Зависимость содержания вольфрама в сплаве от количества восстановителя в шихте флюса

Как видно из полученных зависимостей, дальнейшее увеличение содержания восстановителя не приводит к увеличению перехода вольфрама в наплавляемый металл, а в некоторых случаях даже снижает его.

Электрошлаковый процесс при использовании разработанных флюсов идет стабильно, шлак распределяется по всей поверхности наплавленного металла равномерно, хорошо формирует поверхность слитка и защищает расплавленный металл от доступа воздуха.

В результате спектрального анализа сплавов, полученных с использованием разработанных флюсов, установлено, что все исследуемые восстановители раскисляют вольфрам из шеелитового концентрата с различной степенью эффективности.

Применение в качестве восстановителя ферромарганца позволило получить в сплаве 2,87 % вольфрама, что незначительно превышает результаты, полученные при использовании флюса, не содержащего в своем составе традиционных восстановителей (0,05 % W) и в 6,5 раз ниже, чем при флюсе с ферросилицием. На наш взгляд, это вызвано тем, что в ряду активности к кислороду марганец располагается близко к вольфраму и по отношению к нему не имеет достаточных восстановительных способностей.

Проведенные исследования дали возможность установить, что наиболее эффективными восстановителями вольфрама из шеелитового концентрата являются алюминий, ферросилиций и графит.

Особый интерес представляют алюминий и графит, которые являются наиболее активными восстановителями. Однако при их использовании в разработанных флюсах переход вольфрама в переплавляемую сталь оказался меньше, чем при использовании ферросилиция. В связи с этим было выдвинуто предположение, что такое явление вызвано технологическими факторами – восстановители вводились в опытные флюсы в виде порошков очень мелкой фракции и малым удельным весом. В результате в процессе переплава они всплывали на поверхность шлаковой ванны, не растворяясь и частично окисляясь кислородом воздуха.

Для проверки данной гипотезы были созданы экспериментальные флюсы, в которых при сохранении состава была увеличена фракция восстановителей. Для этого использовались соответственно алюминиевая стружка с размером зерна 0,2 - 0,4 мм и крупка графита с фракцией 0,4 - 0,5 мм. Результаты исследования химического состава и физико-механических свойств сплавов, полученных с использованием различных флюсов, приведены в табл. 1.

В результате исследования химического состава полученных слитков установлено, что за счет увеличения фракции алюминия количество восстановленного вольфрама возросло в 3,5 раза, а графита в 2 раза и составило соответственно 20,6 и 11,4 масс. %.

Таблица 1

Физико-механические и эксплуатационные свойства сплавов

Номер плавки	Восстановитель	Содержание вольфрама в сплаве	Твердость, НВ	Износостойкость относительно сталей		
				У10	Р6М5	Р9
1	FeMn	2,5 – 2,8	158-174	0,192	0,12	0,0187
2	FeSi	17,8 - 18,6	370-390	2,48	1,73	0,812
3	Al	18,7 – 20,6	156-172	1,43	0,647	0,431
4	С (графит)	10,6 – 11,4	280-300	3,62	2,08	0,842
5	нет	0,03 – 0,05	102-106	0,087	0,0029	0,0052

Оставшиеся после переплавов шлаки, содержали: при использовании алюминия – 1,53 % вольфрама, а с применением графита – 8,38 %, что подтвердило состоятельность выдвинутой гипотезы. В то же время использование алюминия и графита в качестве восстановителей вольфрама затруднено в связи с их высокой электропроводностью, что отрицательно сказывается на технологических свойствах флюсов и технологии электрошлакового переплава, так как увеличивается вероятность возникновения дуги на границе между проволокой и флюсом.

В качестве основного восстановителя вольфрама из шеелитового концентрата в керамических флюсах для электрошлакового переплава рекомендуется использование FeSi.

Как показал рентгенофазовый анализ (см. рис. 3) основными фазами в сплавах являются легированный вольфрамом феррит и интерметаллиды Fe₂W.

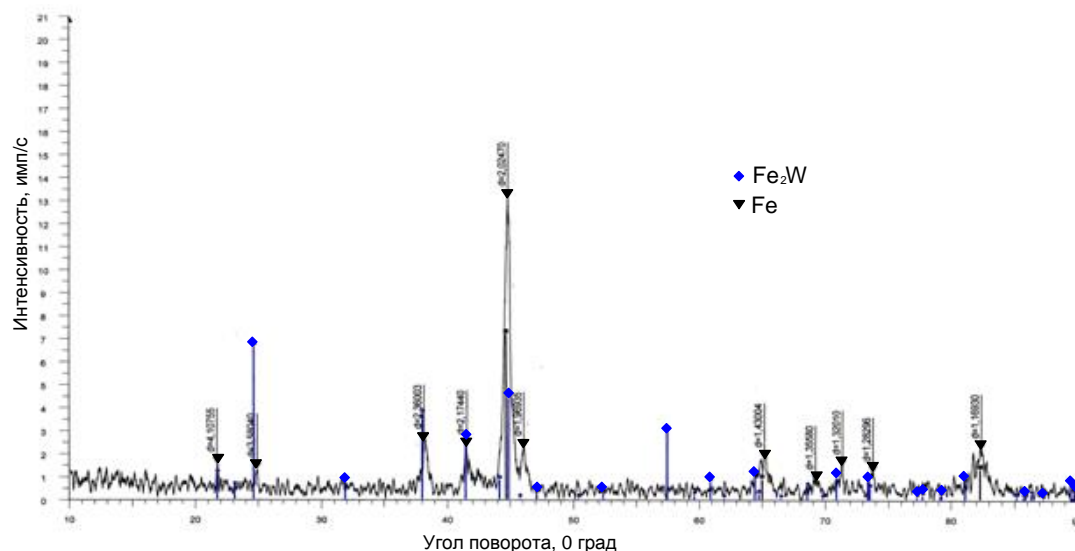


Рис. 3. Рентгендифракционный спектр сплава Сп.2

Полученные сплавы исследовались на твердость и износостойкость относительно инструментальных сталей У10, Р6М5 и Р9 (см. табл. 1). В результате исследований было установлено, что наибольшей твердостью обладают сплавы, полученные при переплаве с флюсом, содержащим в качестве восстановителя FeSi. Что, на наш взгляд, объясняется дополнительным легированием низкоуглеродистого присадочного материала кремнием за счет взаимодействия жидкого металла со шлаковой ванной. Таким образом, можно говорить, что использование FeSi в качестве восстановителя вольфрама позволяет дополнительно осуществлять комплексное легирование переплавляемой низкоуглеродистой стали.

Износостойкость опытных сплавов относительно инструментальных сталей достаточно высокая и в некоторых случаях, при использовании в качестве восстановителя FeSi и графита, превышает износостойкость инструментальной стали типа У12 и быстрорежущей стали типа Р6М5 и приближается к износостойкости быстрорежущей стали типа Р9.

В результате проведенных исследований можно говорить о возможности получения электрошлаковым переплавом с использованием флюсов на основе шеелита комплексно легированных сплавов, близких по химическому составу и физико-механическим свойствам к быстрорежущим инструментальным сталям.

Выводы

1. Экспериментально обоснована теория уменьшения энтропии получения материалов непосредственно из минерального сырья в регионе его добычи, отличительной особенностью которой является отказ от использования экологически опасных пиро-, гидрометаллургических процессов.

2. Разработан и апробирован ряд керамических флюсов на основе шеелитового концентрата, позволяющих при электрошлаковом переплаве низкоуглеродистой стали получать вольфрамовые инструментальные стали.

3. Установлено, что варьированием различных восстановителей имеется возможность комплексного легирования низкоуглеродистой стали через шлаковую систему.

4. Электрошлаковым переплавом низкоуглеродистой стали получены сплавы с содержанием вольфрама до 20 масс. %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анучин, В. А. Основы природопользования. Теоретический аспект / В. А. Анучин. – М.: Мысль, 1978. – 293 с.
2. Бабенко, Э. Г. Разработка новых сварочных материалов на основе минерального сырья Дальневосточного региона: моногр. / Э. Г. Бабенко, А. Д. Верхотуров. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС; Владивосток: ДВО РАН, 2000. – 144 с.
3. Бабенко, Э. Г. Основные аспекты транспортного минералогического материаловедения / Э. Г. Бабенко, А. Д. Верхотуров, В. Г. Григоренко. – Владивосток: Дальнаука, 2004. – 224 с.
4. Бабенко, Э. Г. Разработка и исследование легированных сталей, полученных электрошлаковым переплавом низкоуглеродистой стали с использованием минеральных ассоциаций / Э. Г. Бабенко, А. Д. Верхотуров, Е. Н. Кузьмичев // Перспективные материалы. – № 1. – 2003. – С. 67-72.
5. Верхотуров, А. Д. Основы материаловедения. Т. 1 / А. Д. Верхотуров, А. М. Шпилев, А. И. Евстигнеев. – Владивосток: Дальнаука, 2012. – 654 с.
6. Верхотуров, А. Д. Основы материаловедения Т. 2 / А. Д. Верхотуров, А. М. Шпилев, А. И. Евстигнеев. – Владивосток: Дальнаука, 2012. – 270 с.
7. Дакуорт, Д. Электрошлаковый переплав / Д. Дакуорт, Д. Хойл. – М.: Металлургия, 1973. – 283 с.
8. Касимов, Н. С. Концепция устойчивого развития: восприятие в России / Н. С. Касимов, Ю. Л. Мазуров, В. С. Тикунов // Вестник РАН. – 2004. – Т. 74. – № 1. – С. 28–36.
9. Кусков, Ю. М. Электрошлаковая наплавка / Ю. М. Кусков; под ред. А. Ф. Пименова. – М.: ООО "Наука и технологии". – 2001. – 180 с.
10. Минакир, П. А. Региональная экономическая динамика / П. А. Минакир, О. М. Прокопенко. – РАН, ДВО, Ин-т экономич. исслед. – Хабаровск: ДВО РАН, 2010. – 304 с.
11. Пегов, С. А. Устойчивое развитие в условиях глобальных изменений природной среды / С. А. Пегов // Вестник РАН. – 2004. – Т. 84. – № 12. – С. 1082–1089.
12. Синтез научно-технических и экономических прогнозов: Тихоокеанская Россия – 2050 / ред. П. А. Минакир, В. И. Сергиенко. – РАН, ДВО, Ин-т экономич. исслед.; Владивосток: Дальнаука, 2011. – 912 с.
13. Hornbogen, E. Werkstoffe / E. Hornbogen, G. Eggeler, E. Werner. Springer-varlag Berlin Heidelberg. – 2012. – 486 с.

Тарануха Н. А., Васильев А. С.
N. A. Taranukha, A. S. Vasiliev

АНАЛИЗ КРИТЕРИЕВ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ДЛЯ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

AN ANALYSIS OF LIMIT STATE CRITERIA FOR THE CONSTRUCTION OF COMPOSITE MATERIALS

Тарануха Николай Алексеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой кораблестроения Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел. 8 (4217) 54-30-74. E-mail: taranukha@knastu.ru.

Mr. Nikolay A. Taranukha – D.Sc. of Engineering, Professor, Head of the Department of Shipbuilding, Komsomolsk-on-Amur State Technical University; 27, Lenin Ave., Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia; telephone: +7 (4217) 543074. E-mail: taranukha@knastu.ru.

Васильев Алексей Сергеевич – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: vasil-grunt@mail.ru.

Mr. Alexei S. Vasilyev – PhD student, Komsomolsk-on-Amur State Technical University; 27, Lenin Ave., Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia. E-mail: vasil-grunt@mail.ru.

Аннотация. Данная статья посвящена критериям предельных состояний конструкций из композитных материалов. Представлены блок-схемы, характеризующие расчёт конструкций из композитных материалов по различным критериям. Блок-схемы содержат критерии разрушения конструкций по нормативным документам, а также согласно различным теориям прочности материалов при расчёте по методу конечных элементов. Приводится анализ методик расчёта по различным критериям прочности. Данные критерии применяются в алгоритмах и моделях для расчётов конструкций из композитных материалов в области их предельных состояний: по раскрытию и образованию трещин, по несущей способности, по деформациям.

Summary. This paper focuses on the limit states criteria in structures made of composite materials. We present a series of flowcharts describing the calculation of structures made of composite materials according to various criteria. The flowcharts contain structure destruction criteria according to current regulations, and according to various theories of materials' strength as calculated by the finite element method. We analyze calculation methods and techniques by various strength criteria. These criteria are used in the algorithms and models for calculating structures made of composite materials in their limit states zone: for the opening and formation of cracks, for bearing capacity, for deformations.

Ключевые слова: композитный материал; критерий прочности; блок-схема; метод конечных элементов; теории прочности, предельное состояние.

Key words: composite material, strength criterion, flowchart, finite element method, theory of strength, limit state.

УДК 69.04

Введение

В зависимости от условий работы конструкции, вида материала и его физико-механических характеристик выбираются критерии, характеризующие её разрушение. Расчёт конструкций из композитных материалов осуществляется согласно критериям предельных состояний как по методикам из нормативных документов, так и при помощи численных

методов строительной механики, в частности метода конечных элементов (МКЭ) с применением итерационных процедур и основных принципов механики деформируемого твёрдого тела.

Одним из наиболее распространённых композитов является железобетон, сочетающий в себе совместную работу бетона и стали. Поведение конструкций из железобетона регламентируется нормативными документами по двум группам предельных состояний. Такие методы зачастую учитывают лишь характерные стадии напряжённо-деформированного состояния работы конструкции, а расчёты всех видов сооружений сводят к линейным (стержневым), балочным элементам [2; 4; 5; 6; 7; 8].

Однако часто необходимо рассматривать конструкции как плоские или пространственные, в которых трудно выделить характерные стадии работы. В таких случаях обычно выполняется моделирование методом конечных элементов. При этом модель должна реально отображать основные свойства материала: физическую нелинейность, неоднородность, способность к образованию трещин. Данные параметры учитываются в расчётах с применением критериев прочности материалов, из которых состоит конструкция.

Ценность и новизна работы состоят в систематизации расчётов конструкций из композитных материалов по различным критериям прочности.

Критерии предельного состояния для конструкций из композитных материалов

Как уже было сказано, в работе рассматриваются методы расчёта конструкций из композитных материалов согласно различным критериям.

Блок-схема на рис. 1 отображает методы расчёта конструкций. На рис. 2 показаны критерии разрушения материалов. Под предельным состоянием конструкции понимается полное её разрушение и потеря несущей способности. При этом физическая нелинейность получается в результате последовательного исключения конечных элементов (КЭ) из модели. Исключение КЭ из модели конструкции характеризует условное разрушение материала и образование трещин. Условное разрушение КЭ характеризуется превышением приведённых напряжений над допустимыми.

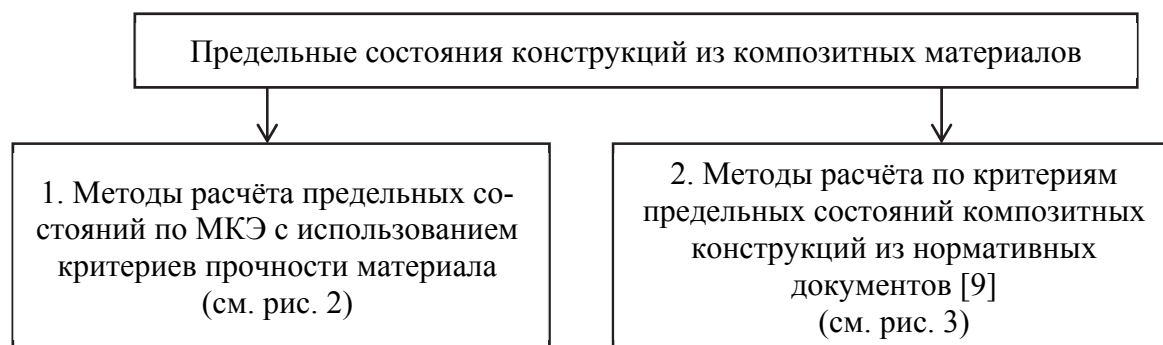


Рис. 1. Методы расчёта предельных состояний конструкций из композитных материалов

Для арматуры и бетона под допустимыми напряжениями понимается соответственно прочность на растяжение R_s и R_b . Однако композитные КЭ характерны совместной работой материалов с разным пределом прочности. В случае с железобетоном один материал, находящийся в растянутой зоне конструкции, превышает свой предел прочности и разрушается, в то время как второй продолжает работать и принимать на себя напряжения. Критерии прочности материала, по которым может определяться его разрушение, представлены на рис. 2 и 3.

1. Методы расчёта предельных состояний по МКЭ с использованием критериев прочности материала

Критерии разрушения композитного материала

1.1. Разрушение по приведённому напряжению $\sigma_{пр} \geq R_{br}$ [1]

1.1.1. Теория наибольших нормальных напряжений
 $\sigma_{пр}^I \geq \sigma_1$

1.1.2. Теория наибольших относительных удлинений
 $\sigma_{пр}^{II} \geq \sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)$

1.1.3. Теория наибольших касательных напряжений
 $\sigma_{пр}^{III} \geq \sigma_1 - \sigma_3$

1.1.5. Теория прочности Мора
 $\sigma_{пр} = \sigma_1 - k\sigma_3$,
 $\frac{\sigma_p}{\sigma_c} = k$

1.1.4. Энергетическая теория $\sigma_{пр}^{IV} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$

1.2. Функции предельной поверхности, описывающие критерий прочности в виде [2] $F(\sigma_0, \tau_0, \theta, m_i) \geq 0$, где σ_0 – октаэдрические нормальные напряжения; τ_0 – октаэдрические касательные напряжения; θ – угол вида напряжённого состояния (угол Лодэ); m_i – характеристики свойств материала, определяемые в результате базовых опытов,

$$\sigma_0 = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3), \tau_0 = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}, \theta = \frac{1}{3} \arccos \left(\sqrt{2} \frac{D_3}{\tau_0^3} \right),$$

где D_3 – третий инвариант девиатора напряжений: $D_3 = (\sigma_1 - \sigma_0)(\sigma_2 - \sigma_0)(\sigma_3 - \sigma_0)$

1.2.1. Критерий прочности William-Warnke [3]. Функция прочности бетона описывается

следующим выражением: $F_y = \sqrt{J_2} + \sqrt{\frac{5}{2}} r(\theta) \left(\frac{1}{3\chi} I_1 - r_c \right) = 0$, где $\chi = \frac{r_{2b} r_t}{r_{b2} r_c - r_t r_c}$,

$$J_2 = \frac{1}{6} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right], I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z,$$

$$r(\theta) = \frac{2r_c(r_c^2 - r_t^2) \cos(\theta) + r_c(2r_t - r_c) \sqrt{4(r_c^2 - r_t^2) \cos^2(\theta) + 5r_t^2 - 4r_c r_t}}{4(r_c^2 - r_t^2) \cos^2(\theta) + (r_c - 2r_t)^2},$$

где r_t – предел прочности при одноосном растяжении; r_{2b} – предел прочности при двуосном сжатии; r_c – предел прочности при одноосном сжатии

Рис. 2. Расчёт предельных состояний конструкций по МКЭ с применением критериев прочности материала

2. Методы расчёта по критериям предельных состояний композитных конструкций по нормативным документам [9]

2.1. Полная непригодность к эксплуатации (предельные состояния 1-й группы)

2.2. Непригодность к нормальной эксплуатации (предельные состояния 2-й группы)

Предел прочности конструкции исходя из расчёта по прочности нормальных сечений

по предельным усилиям (R_s, R_{sc}, R_b). Если $\xi = \frac{x}{h_0} \leq \xi_R$, то

$M_{ult} = R_b b x (h_0 - 0,5x) + R_{sc} A'_s (h_0 - a')$, где b – толщина конструкции, x – высота сжатой зоны, $x = \frac{R_s A_s - R_{sc} A'_s}{R_b b}$; h_0 – расстояние от арматуры в растянутой зоне до верхней

границы конструкции; R_{sc} – расчётное сопротивление арматуры сжатию для предельных состояний первой группы, A'_s – площадь арматуры сжатой зоны, a' – расстояние от арматуры в сжатой зоне до верхней границы железобетонного элемента

2.1.1. Предельные прогибы и перемещения при разрушении: $f_{ult} > f$,

$$f_M = \frac{L^2}{12n^2} \left(\frac{1}{\rho_{0,лев}} + \frac{1}{\rho_{0,прав}} + 6 \sum_{i=1}^{n-1} i \left(\frac{1}{\rho_{i,лев}} + \frac{1}{\rho_{i,прав}} \right) + (3n-2) \frac{1}{\rho_c} \right),$$

где $\frac{1}{\rho_{0,лев}}$ и $\frac{1}{\rho_{0,прав}}$ – кривизны элемента соответственно на левой и правой опорах;

$\frac{1}{\rho_{i,лев}}$, $\frac{1}{\rho_{i,прав}}$,

$\frac{1}{\rho_c}$ – кривизны элементов в сечении i ; n – чётное

число равных участков, на которое разбивается пролёт; $\frac{1}{\rho} = \frac{M}{D}$, где D – изгибная жёсткость при-

ведённого поперечного сечения

2.1.2. Максимальная разрушающая нагрузка $P_{ult} > P$, вычисляемая из уравнения момента

2.2.1. Появление первых трещин (только для определённых видов конструкций) $M_{crc} = R_{bt,ser} W_{pl}$,

где W_{pl} – упругопластический момент сопротивления сечения для крайнего растянутого волокна бетона; $W_{pl} = 1,3W_{red}$, где

W_{red} – упругий момент сопротивления приведённого сечения по растянутой зоне сечения,

$$W_{red} = \frac{I_{red}}{y_t}$$

2.2.2. Ширина раскрытия трещин. Определяется по формуле

$$a_{crc} = \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \psi_s \frac{\sigma_s}{E_s} l_s,$$

где σ_s – напряжение в продольной растянутой арматуре в сечении с трещиной; l_s – базовое расстояние между смежными нормальными трещинами); ψ_s – коэффициент распределения относительных деформаций растянутой арматуры между трещинами; φ_1 – коэффициент продолжительности действия нагрузки; φ_2 – коэффициент, учитывающий профиль продольной арматуры; φ_3 – коэффициент характера нагружения

2.2.3. Предельные допустимые прогибы и перемещения (технологические, конструктивные, эстетико-психологические)

Рис. 3. Критерии предельных состояний конструкций по нормативным документам

Анализ рассмотренных критериев предельного состояния

Нормативные методики (2.1) и (2.2) для расчёта прочности железобетонных конструкций содержат эмпирические зависимости и расчётные модели, которые отражают лишь характерные этапы работы конструкций. Они позволяют осуществлять расчёт конструкций на характерных стадиях напряжённо-деформированного состояния:

– до появления трещин, когда материалы композитной конструкции совместно воспринимают усилия от нагрузки: для этой стадии характерны упругие деформации, связь между напряжениями и деформациями линейна.

– непосредственно перед появлением первой трещины

$$M_{crc} = R_{bt,ser} W_{pl} ;$$

– после появления первых трещин, когда более прочный материал начинает брать на себя больше усилий в результате разрушения менее прочного материала в составе композита

$$a_{crc} = \Phi_1 \Phi_2 \Phi_3 \Psi_s \frac{\sigma_s}{E_s} l_s ;$$

– стадия разрушения, когда напряжения в более прочном материале (арматуре) достигают своего предела прочности (текучести)

$$M_{ult} = R_b b x (h_0 - 0,5x) + R_{sc} A'_s (h_0 - a'),$$

$$f_M = \frac{L^2}{12n^2} \left(\frac{1}{\rho_{0,лев}} + \frac{1}{\rho_{0,прав}} + 6 \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}-1} i \left(\frac{1}{\rho_{i,лев}} + \frac{1}{\rho_{i,прав}} \right) + (3n-2) \frac{1}{\rho_c} \right).$$

При расчёте по МКЭ исключение конечных элементов из модели происходит при превышении в этих элементах приведённых напряжений над пределом прочности материала. Первая теория прочности (1.1.1), по данным опытов, работает только при растяжении хрупких материалов, когда все три главных напряжения не однозначны и различны по величине:

$$\sigma_{пр}^I \geq \sigma_1.$$

Вторая (1.1.2) отображает хрупкое разрушение путём отрыва. Обе эти теории рассматриваются как очень грубое приближение к реальной картине нагружения:

$$\sigma_{пр}^{II} \geq \sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3).$$

Третья теория прочности (1.1.3) отображает наступление текучести в материале, а также разрушение путём сдвигов. Она хорошо подтверждается опытами с пластическими материалами, одинаково сопротивляющимися растяжению и сжатию при условии, что главные напряжения имеют разные знаки:

$$\sigma_{пр}^{III} \geq \sigma_1 - \sigma_3.$$

Четвёртая теория прочности (1.1.4) отображает наступление текучести. Она хорошо подтверждается опытами с пластическими материалами, имеющими одинаковый предел текучести при растяжении и сжатии:

$$\sigma_{пр}^{IV} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}.$$

Теория прочности Мора (1.1.5) полностью базируется на экспериментальных данных и по мере их накопления может уточняться. Однако существуют недостатки этой теории,

связанные с трудностями построения огибающей кругов Мора и не учётом (как и в теории наибольших касательных напряжений) промежуточного главного напряжения σ_2 . Однако для таких материалов, как бетон, существуют различные модификации данной теории.

$$\sigma_{\text{пр}} = \sigma_1 - k\sigma_3, \quad \frac{\sigma_p}{\sigma_c} = k.$$

Концепция предельной поверхности (1.2) использует три независимых параметра материала, соответствующих частным случаям напряжённого состояния: предел прочности при одноосном сжатии, предел прочности при одноосном растяжении, предел прочности при двuosном сжатии. Данные параметры связаны эмпирическими формулами между собой. Условие прочности описывает выпуклую и гладкую поверхность, симметричную относительно диагонали пространства главных напряжений $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$.

$$F_y = \sqrt{J_2} + \sqrt{\frac{5}{2}}r(\theta) \left(\frac{1}{3\chi} I_1 - R_c \right) = 0.$$

В результате получается функция, некоторое приведённое напряжение, которое и будет являться критерием прочности материала. Критерий прочности William-Warnke [3] так же основывается на данной теории и активно используется при расчётах хрупких материалов с большой разницей между пределами прочности на сжатие и растяжение. Функция предельной поверхности в этом случае представляет собой уравнение эллипса:

$$r(\theta) = \frac{2r_c(r_c^2 - r_t^2)\cos(\theta) + r_c(2r_t - r_c)\sqrt{4(r_c^2 - r_t^2)\cos^2(\theta) + 5r_t^2 - 4r_cr_t}}{4(r_c^2 - r_t^2)\cos^2(\theta) + (r_c - 2r_t)^2},$$

где r_c и r_t – радиусы, соответствующие значениям угла вида напряжённого состояния.

Заключение.

1. В работе описаны методы расчёта конструкций из композитных материалов в области их предельных состояний.
2. Рассмотрены, охарактеризованы и систематизированы критерии предельных состояний конструкций из композитных материалов согласно нормативным документам и по МКЭ.
3. Приведены и описаны критерии прочности материалов для расчёта предельных состояний конструкций по МКЭ.
4. Даны рекомендации по применению критериев прочности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров, А. В. Соппротивление материалов / А. В. Александров, В. Д. Потапов, Б. П. Державин. – М.: Высш. шк., 2003. – 561 с.
2. Клованич, С. Ф. Метод конечных элементов в расчётах пространственных железобетонных конструкций / С. Ф. Клованич, Д. И. Безушко. – Одесса: Изд-во ОНМУ, 2009. – 89 с.
3. Пространственный деформационный нелинейный расчёт железобетонных изгибаемых конструкций методом конечных элементов / А. А. Попов, А. А. Хатунцев, И. Г. Шашков, А. В. Кочетков // интернет журнал «Науковедение». – 2013. – № 5(18). URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/prostranstvennyu-deformatsionnyu-nelineynuu-raschet-zhelezobetonyh-izgibaemyh-konstruktsiy-metodom-konechnyh-elementov> (дата обращения 10.05.2015).
4. Математическая модель шарнирной стержневой системы с большими перемещениями / Н. А. Тарануха, К. В. Жеребко, А. Н. Петрова, М. Р. Петров // Известия вузов. Строительство. – 2003. – № 3(531). – С. 12-18.
5. Тарануха, Н. А. Программно-информационное обеспечение задачи о колебаниях стержня с большими деформациями / Н. А. Тарануха, А. Н. Петрова, Н. Н. Любушкина // Информатика и системы управления. – 2007. – № 2(14). – С. 30-39.

6. Тарануха, Н. А. Колебания динамических систем с большими деформациями из нестандартизированного материала / Н. А. Тарануха, А. Н. Петрова, Н. Н. Любушкина // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2010. – № III-1(3). – С. 4-11.
7. Тарануха, Н. А. Определение жёсткостной характеристики нестандартизированного материала упругой связи динамической системы / Н. А. Тарануха, А. Н. Петрова, Н. Н. Любушкина // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2010. – № IV-1(4). – С. 4-11.
8. Тарануха, Н. А. Математическая модель деформирования упругой связи из нестандартизированного материала для динамической системы с большими деформациями / Н. А. Тарануха, А. Н. Петрова, Н. Н. Любушкина // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № I-1(5). – С. 4-9.
9. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 / Минрегион России. – М.: ООО «Аналитик», 2012. – 155 с.

Васильев А. С.
A. S. Vasiliev

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ БАЛОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОРТОВЫХ И БЕРЕГОЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

ALGORITHMS FOR THE NUMERICAL MODELING, WHICH WAS DEVELOPED FOR BEAM STRUCTURES MADE OF COMPOSITE MATERIALS FOR PORT AND COAST PROTECTION STRUCTURES

Васильев Алексей Сергеевич – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: vasil-grunt@mail.ru.

Mr Alexei S. Vasiliev – a post-graduate student of Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenina pr. E-mail: vasil-grunt@mail.ru.

Аннотация. Статья посвящена численному моделированию конструкций из композитных материалов для портовых и берегозащитных сооружений в области их предельных состояний. Под предельными состояниями в данной работе понимается потеря несущей способности конструкции вследствие статической нагрузки и появление максимальных перемещений. В работе представлены основные составляющие математической модели, используемой в расчетах. Приведен алгоритм для расчета конструкций из композитных материалов методом конечных элементов и его блок-схема. Показаны результаты расчета предельного состояния статически-определимых железобетонных балок берегозащитных конструкций.

Summary. The article is devoted to numerical modeling structures made of composite materials for the port and hydropower installations in their marginal conditions. The loss of the bearing capacity of the structure due to static load and the appearance of the maximum displacements are understood in this work under extreme conditions. The paper presents basic components of the mathematical model used in the calculations. An algorithm for calculating the structures of composite materials by method of finite element and its block diagram. The results of the calculation of the limit state statically determinate reinforced concrete beams of bank protection structures. The paper deals with a homogeneous concrete beam, reinforced beams one or two bars of reinforcement.

Ключевые слова: берегозащитные сооружения; композит; алгоритм; блок-схема; математическая модель; критерий прочности; предельное состояние.

Key words: coast protection structures; composite; algorithm; a block diagram; mathematical model; strength criterion; ultimate state.

УДК 627.41; 519.711.3

Введение

Композитные материалы активно применяются в строительстве, машиностроении, кораблестроении. Композиты из нестандартизированного материала используют в морских динамических системах [5, 7, 8, 9]. Так же композитные материалы используют для портовых и берегозащитных сооружений. Балочные элементы в виде ригелей и бортовых балок используют при монтаже конструкций верхнего строения причалов эстакадного типа, оградительных, портовых и берегозащитных сооружений [10]. Прочность балочных элементов – достаточно важная составляющая прочности всей берегозащитной конструкции. При этом в качестве основного материала для таких конструкций используется железобетон – композитный материал, сочетающий в себе совместную работу бетона и стальной арматуры.

Существует много программных продуктов, позволяющих моделировать и производить расчет композитных конструкций, в частности из железобетона. К ним относятся NAS-TRAN, ANSYS, ЛИРА. Данные программные продукты выполняют расчеты методом конечных элементов с использованием современных теорий прочности, соответствующих специфике работы конкретного материала.

В работе автором предложены и применены алгоритмы для расчета балочных конструкций из композитных материалов. Расчет проводился на примере балок из железобетона, используемых для берегозащитных сооружений.

Математическая модель для расчета конструкций из композитных материалов

Здесь будут приведены основные аспекты математической модели, используемой при программировании и алгоритмизации. Моделирование будет осуществляться методом конечных элементов (МКЭ) с применением критерия прочности William-Warnke для бетона и теории наибольших касательных напряжений для арматуры.

В расчетах использовался специальный объемный композитный конечный элемент (КЭ) в виде параллелепипеда, способный сочетать в себе совместную работу материалов с разными модулями упругости и пределами прочности. Стандартный блок матрицы жесткости вычисляется по формуле [3]:

$$[K]_{ij}^{(k)} = \iiint_{V_i} ([B]^{(j)})^T [D]_{np} [B]^{(k)} dV .$$

Здесь $[B]$ – так называемая матрица деформаций, которая для КЭ в виде прямоугольного параллелепипеда содержит 8 блоков по числу узлов [4]; k и j – номера узлов КЭ, i – номер КЭ; $[D]_{np}$ – приведенная матрица упругости, состоящая из приведенных модулей упругости и коэффициентов Пуассона.

Разрушение КЭ, содержащих бетон, будет осуществляться согласно критерию прочности William – Warnke [6]:

$$F_i = \sqrt{D_2} + \sqrt{\frac{5}{2}} \rho(\theta) \left(\frac{R_{2c} R_c - R_p R_c}{3 R_{2c} R_p} I_1 - R_c \right) \geq 0 ,$$

где R_c и R_p - прочность бетона при одноосном сжатии и растяжении; R_{2c} - прочность при двухосном равномерном сжатии; I_1 – первый инвариант тензора напряжений; D_2 – второй инвариант девиаторной части тензора напряжений. Функция $\rho(\theta)$ описывает сегмент девиаторного сечения поверхности прочности в виде эллипса при $0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$, θ – угол вида напряженного состояния (угол Лодэ).

С учетом того, что объем композитного КЭ остается прежним, но материал № 1 в нем уже разрушен, и работает только материал № 2(арматура), напряжения в этом материале увеличиваются пропорционально уменьшению площади поперечного сечения:

$$\sigma_{np} = \frac{S_1 + S_2}{S_2} \sigma_1 - \frac{S_1 + S_2}{S_2} \sigma_3 \geq R_s ,$$

где R_s – предел прочности арматуры на растяжение (сжатие); S_1 и S_2 – соответственно площади поперечных сечений для 1-го и 2-го материалов в составе композита; σ_{np} – напряжение, характеризующее предел текучести арматуры согласно третьей теории прочности; σ_1 и σ_3 – главные напряжения, полученные согласно теории упругости.

Физическая нелинейность в расчетах учитывается путем постепенного исключения КЭ из конструкции в результате последовательного и равномерного увеличения статической нагрузки на конструкцию. В результате жесткость конструкции уменьшается, матрица жесткости системы перестраивается. Итерационный процесс сопровождается постоянным увеличением нагрузки на конструкцию с шагом ΔP и сопровождается постепенным разрушением и уменьшением жесткости конструкции. Расчет прекращается при разрушении материала в поперечном сечении балки.

Алгоритм расчета конструкций из композитных материалов

Расчет велся с помощью алгоритмов программ Composit [1], Strength [2] и Ultimate State, основанных на языке Matlab. Программы Composit и Strength зарегистрированы в Реестре программ для ЭВМ и имеют свидетельства об официальной регистрации. Сборка глобальной матрицы жесткости выглядит следующим образом:

$$\sum_{z=1}^n K_{W_{i_z, \alpha}, W_{i_z, \beta}} = K_{W_{i_z, \alpha}, W_{i_z, \beta}} + K_{\alpha, \beta}^{i_z},$$

где z – множество i -х КЭ, принадлежащих промежутку $1:n$; W – матрица индексов конструкции, состоящая из n строк и p столбцов; $\alpha, \beta = 1, \dots, p$; p – количество перемещений в КЭ. Для данной задачи $n = 4$, так как при стыковке элементов суммируются матрицы жесткости КЭ бетона, композитные КЭ бетона и арматуры, КЭ арматуры без учета бетона, КЭ не имеющие в своем составе материала, когда матрица упругости $D = 0$.

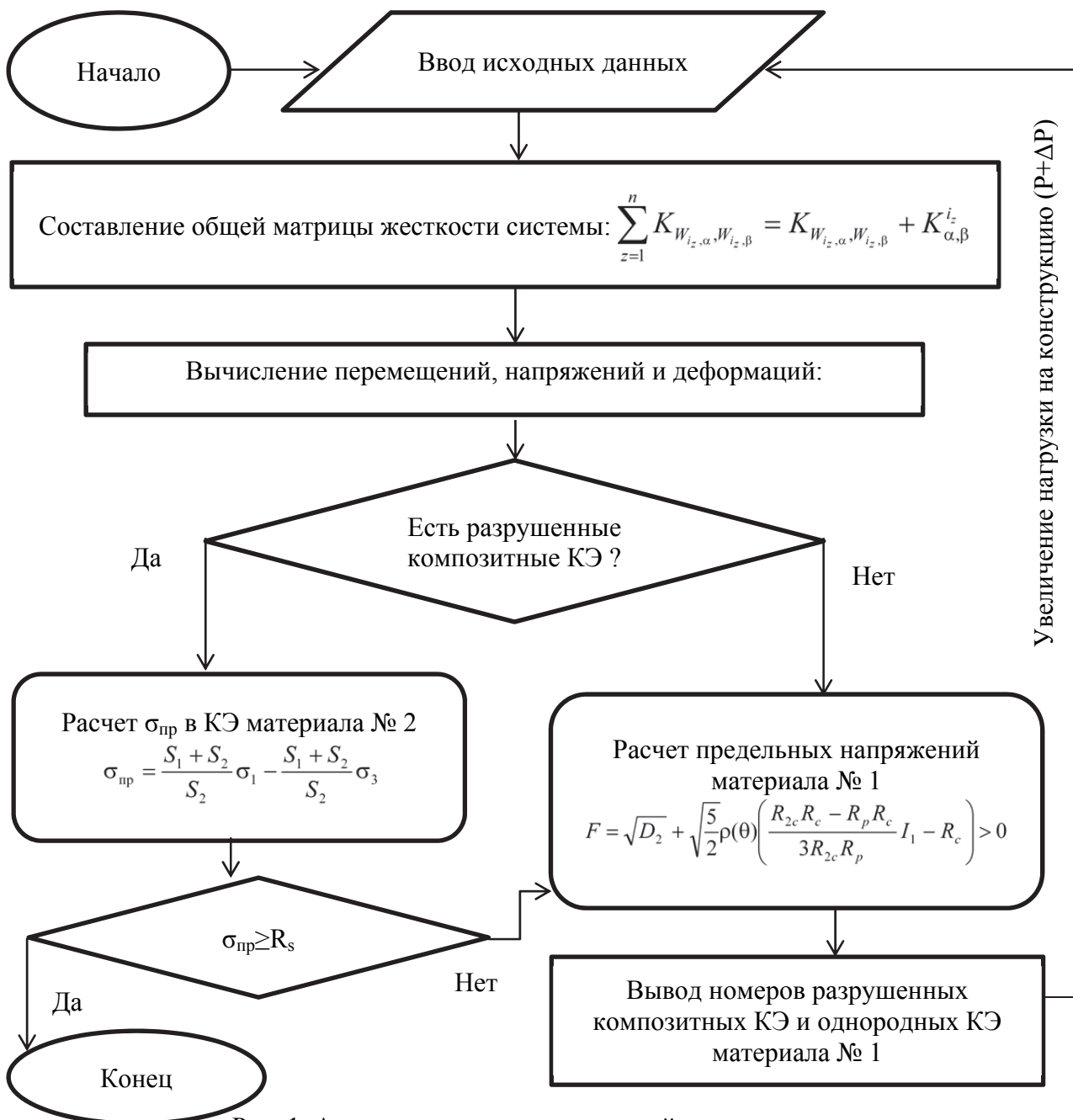


Рис. 1. Алгоритм расчета конструкций из композитных материалов

Анализ расчетов статически определимых балок, однородных и укрепленных стержнями более прочного материала

Предельные состояния конструкций, рассматриваемых в работе, предполагают потерю несущей способности вследствие статической разрушающей нагрузки, а так же появление максимальных перемещений конструкции в момент разрушения, то есть максимальных прогибов. Композитный материал – железобетон. Бетон будем называть материалом № 1, арматуру – материалом № 2.

В данном пункте будут осуществляться нелинейные расчеты как однородных балок, так и балок, укрепленных стержнями более прочного материала. Вычисления производятся с помощью разработанных программ, а также в программном комплексе Concord [4]. Результаты расчета сравниваются со СНиП [11]. Расчетная схема для трех балок приведена ниже на рис. 2.

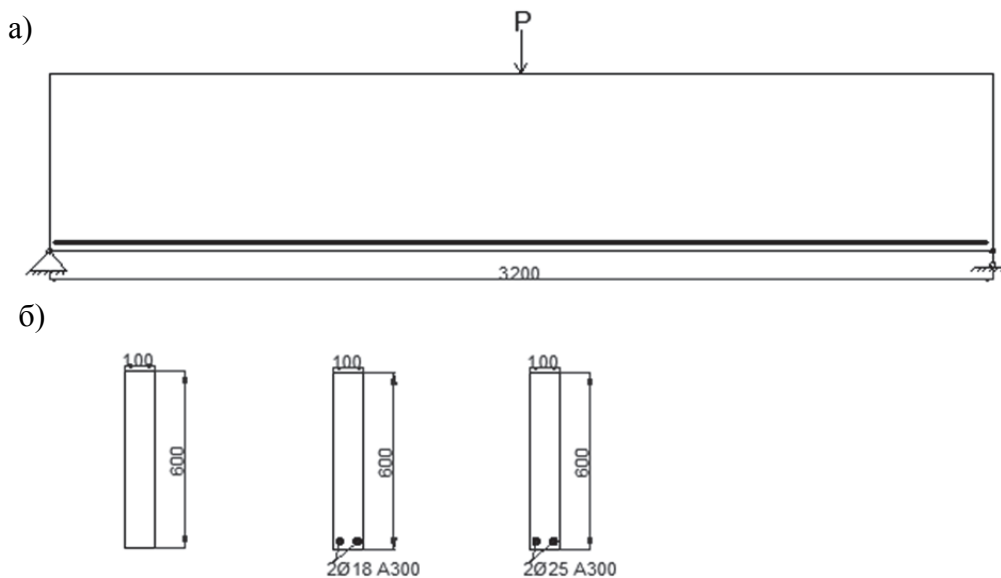


Рис. 2. Размеры и расчетная схема балок (а); сечение каждой балки (б)

Первый образец рассматривается как однородный из сплошного бетона, во втором в растянутую зону помещены два стержня арматуры диаметром 18 мм, в третьем – также два стержня арматуры диаметром 25 мм в растянутой зоне. Исходные характеристики материалов: бетон - $R_b = 20$ МПа, $R_{bt} = 1,75$ МПа, $E_b = 30\ 000$ МПа, $\nu = 0,2$; арматура $R_s = 400$ МПа, $E_s = 200\ 000$ МПа.

R_b – расчетное сопротивление сжатию бетона для предельных состояний второй группы; R_{bt} – расчетное сопротивление осевому растяжению для предельных состояний второй группы; E_b – модуль упругости бетона; R_s – расчетное сопротивление арматуры для предельных состояний второй группы. При этом R_b и R_{bt} связаны с R_c , R_p и R_{2c} эмпирическими зависимостями [3, 4]. На рис. 3 приведена схема разбивки модели балки на конечные элементы.

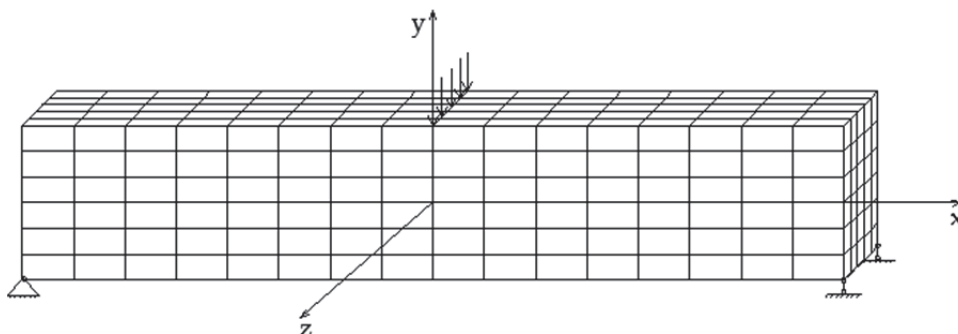


Рис. 3. Схема разбивки на КЭ

На модели образцов действует постоянно увеличивающаяся нагрузка с шагом $\Delta P = 10$ кН. Действие нагрузки происходит до потери несущей способности и разрушения балки.

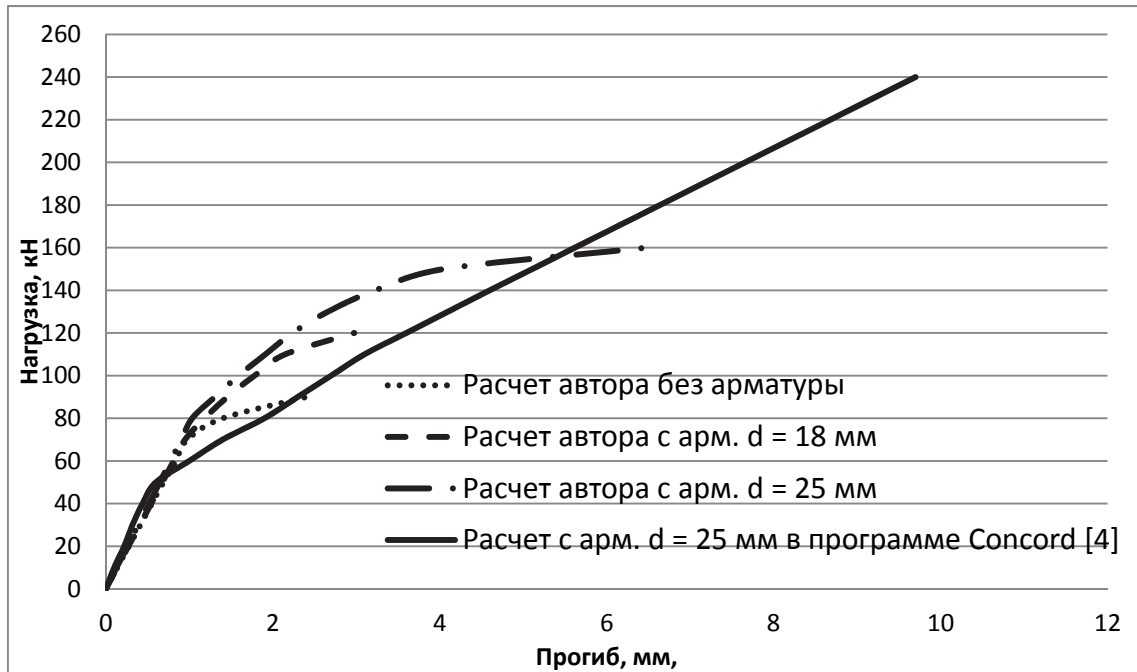


Рис. 4. Расчет автора образцов из бетона, железобетона, укрепленного арматурой диаметров 18 мм и 25 мм. Расчет балки с диаметром 25 мм в программе Concord [4]

На рис. 4 приведены расчеты для каждого из образцов. Как видно из рисунка, несущая способность балки с двумя стержнями арматуры значительно больше. Результаты численного исследования образцов показаны в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчетов предельных состояний композитных балок и балок из однородного материала в расчете автора

Образец	Нагрузка-разрушение (несущая способность), кН	Прогиб при разрушении (максимальный прогиб), мм
Балка из однородного материала	90	2,40
Балка с арматурой 18 мм	120	2,98
Балка с арматурой 25 мм	160	6,48

Из табл. 1 видно, что композитные конструкции, укрепленные более прочными материалами, имеют большую разрушающую нагрузку и максимальные перемещения при разрушении. В табл. 1 и 2 приводятся результаты расчета автора, Concord и СНиП для балки с арматурой диаметром 25 мм на изгиб до достижения ею предельного состояния.

Таблица 2

Несущая способность и прогиб в момент разрушения балки

Максимальный прогиб	Расчет автора	Расчет Concord	СНиП
	Δ , мм	Δ , мм	Δ , мм
	6,5	9,7	9,2
Несущая способность	Расчет автора	Расчет Concord	СНиП
	P, кН	P, кН	P, кН
	160	240	200

Заключение

Проведено численное исследование конструкций из композитных материалов в области их предельных состояний. Представлены, сформулированы и применены алгоритмы для расчета конструкций из композитных материалов. Показаны некоторые возможности программ [1, 2] для расчетов.

Выполнены и проанализированы расчеты предельных состояний бетонной балки, а также железобетонных с одним и двумя стержнями арматуры в растянутой зоне. Подобные балки могут быть использованы для берегозащитных и портовых сооружений, исходя из условий и критериев их использования.

Приведены результаты расчетов автора, в программе Concord [4] и по методике из нормативных документов [11] для расчета конструкций из композитных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев, А. С. Программное обеспечение для расчета перемещений в конструкциях из композитных материалов методом конечных элементов (ПО «Composit») / А. С. Васильев, Н. А. Тарануха // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2015610761 2015 г.
2. Васильев, А. С. Программное обеспечение для исследования напряженно-деформированного состояния объектов на различных стадиях нагружения (ПО «Strength») / А. С. Васильев, Н. А. Тарануха // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2015610762 2015 г.
3. Клованич, С. Ф. Метод конечных элементов в механике железобетона / С. Ф. Клованич, И. Н. Мироненко. – Одесса, 2007. - 111 с.
4. Клованич, С. Ф. Метод конечных элементов в расчетах пространственных железобетонных конструкций / С. Ф. Клованич, Д. И. Безушко. – Одесса: Изд-во ОНМУ, 2009. – 89 с.
5. Любушкина, Н. Н. Математическое моделирование колебательных процессов в стержне с большими деформациями / Н. Н. Любушкина, А. Н. Петрова, Н. А. Тарануха. – М.: ВИНТИ, 2007, № 902-В2007. – С. 19.
6. Пространственный деформационный нелинейный расчет железобетонных изгибаемых конструкций методом конечных элементов / А. А. Попов, А. А. Хатунцев, И. Г. Шашков, А. В. Кочетков // «Науковедение». – 2013. – № 5 // <http://cyberleninka.ru/article/n/prostranstvennyu-deformatsionnyu-nelineynyy-raschet-zhelezobetonnyh-izgibaemyh-konstruktsiy-metodom-konechnyh-elementov>.
7. Тарануха, Н. А. Программно-аппаратный комплекс по обработке результатов эксперимента колеблющейся системы / Н. А. Тарануха, А. Н. Петрова, Н. Н. Любушкина. – М.: ВИНТИ, 2007, № 903-В2007. - С. 12.
8. Тарануха, Н. А. Колебания динамических систем с большими деформациями из нестандартизированного материала / Н. А. Тарануха, А. Н. Петрова, Н. Н. Любушкина // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2010. – № III-1(3). – С. 4-11.
9. Тарануха, Н. А. Механика морских динамических систем с большими деформациями из нестандартизированного материала / Н. А. Тарануха, А. Н. Петрова, Н. Н. Любушкина // Морские интеллектуальные технологии. – 2010. – № 3 (9). – С. 56-59.
10. ЕНиР. Сборник Е4 - 1988. Монтаж сборных и устройство монолитных железобетонных конструкций. Вып. 2. Портовые и берегозащитные сооружения. – Введ. 1986-12-05. – Госстрой СССР. - М.: Стройиздат, 1988.
11. СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции. – Введ. 2003-06-30. – М.: Госстрой России, 2003. – 22 с.

Сысоев О. Е., Макаренко С. В., Добрышкин А. Ю., Кузнецов Е. А.
O. E. Sysoyev, S. V. Makarenko, A. U. Dobryshkin, Ye. A. Kuznetsov

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ТРУБОБЕТОНА

A STUDY ON THE STRESS-STRAIN BEHAVIOUR OF BENDING ELEMENTS IN CIVIL ENGINEERING STRUCTURES MADE OF TUBE CONFINED CONCRETE (TCC)

Сысоев Олег Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, декан факультета кадастра и строительства Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: fks@knastu.ru.

Mr. Oleg Ye. Sysoyev – D.Sc. in Engineering, Professor, Dean of the Department of Cadastre and Civil Engineering; Komsomolsk-on-Amur State Technical University; 27, Lenin Ave., Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia. E-mail: fks@knastu.ru.

Макаренко Сергей Валерьевич – старший преподаватель кафедры «Механика и анализ конструкций и процессов» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: makapehko@list.ru.

Mr. Sergey V. Makarenko – Senior Lecturer, Department of Mechanics and Analysis of Structures and Processes, Komsomolsk-on-Amur State Technical University; 27, Lenin Ave., Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia. E-mail: makapehko@list.ru.

Добрышкин Артем Юрьевич – аспирант кафедры «Строительство и архитектура» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: wwwartem21@mail.ru.

Mr. Artem Yu. Dobryshkin – PhD student, Department of Civil Engineering and Architecture, Komsomolsk-on-Amur State Technical University; 27, Lenin Ave., Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia. E-mail: wwwartem21@mail.ru.

Кузнецов Егор Александрович – аспирант кафедры «Строительство и архитектура» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: workegor@mail.ru.

Mr. Yegor A. Kuznetsov – PhD student, Department of Civil Engineering and Architecture, Komsomolsk-on-Amur State Technical University; 27, Lenin Ave., Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia. E-mail: workegor@mail.ru.

Аннотация. В статье приведен краткий обзор исследований трубобетонных элементов строительных конструкций, работающих на центральное и внецентренное сжатие. Предложено рациональное сечение для трубобетонного изгибаемого элемента с использованием высокопрочного бетона. Приведен сравнительный анализ несущей способности железобетонной, металлической и предлагаемой трубобетонной балок при чистом изгибе.

Summary. This paper is a summary of research in the field of studying TCC construction elements in centric and eccentric compression. We propose a rational cross-section for a TCC bending element using high-strength concrete. We offer a comparative analysis of the bearing capacity of concrete, metal and the proposed TCC beams in pure bending.

Ключевые слова: трубобетон, напряженно-деформированное состояние, изгибаемый элемент, балка.

Key words: tube confined concrete, stress-strain state, bending element, beam.

УДК 539.3:534.2

В современном строительном производстве разных стран мира все чаще применяются конструкции с использованием элементов из трубобетона [1]. Применение таких конструкций позволяет существенно снизить вес сооружения и стоимость работ (в 2 – 3 раза) по сравнению с аналогичными конструкциями из железобетона. При этом затраты труда уменьшаются в 4 – 5 раз. В сравнении с металлическими конструкциями значительно снижается стоимость (до 40 %) и в 2 – 3 раза уменьшается расход стали при незначительном увеличении веса. В нашей стране в настоящее время использование трубобетонных конструкций не имеет широкого распространения в связи с недостаточностью исследований работы таких конструкций при различных воздействиях.

Металлическая труба в трубобетонных конструкциях одновременно исполняет роль оболочки и продольной и поперечной арматуры; она способна воспринимать возникающие усилия под разными углами и во всех направлениях. Бетон в трубе-оболочке, находясь в условиях трехосного сжатия, выдерживает напряжения, значительно превышающие кубиковую и призмную прочность. Труба препятствует образованию микротрещин в бетонном сердечнике, а за счет наполненности бетоном вероятность местной потери устойчивости стенки трубы и общей потери устойчивости в целом значительно снижается.

В существующих зарубежных стандартах, а также в различных исследованиях предлагаются различные методы расчета стальных оболочек, заполненных бетоном, на внецентренное и осевое сжатие. Широко известна зависимость для оценки несущей способности трубобетонных центрально сжатых колонн круглого сечения:

$$N = cR_bF_b + \alpha F_cR_c, \quad (1)$$

где c – коэффициент совместной работы бетона и стали; α – коэффициент упрочнения; R_b , F_b – предел прочности и площадь сечения бетона соответственно; R_c , F_c – предел текучести стали и площадь сечения трубы соответственно.

Так как упрочняется не стальная труба-оболочка, а бетонное ядро, обжатое оболочкой, где уровень обжатия зависит от отношения толщины стенки оболочки к диаметру бетонного сердечника, формула (1) не совсем точно отражает физическую суть несущей способности трубобетона. Это приводит к занижению расчетной несущей способности материала и удорожанию трубобетонных конструкций.

В настоящее время в Российской Федерации нет официального документа, регламентирующего методику расчета трубобетонных конструкций. В Советском Союзе исследования трубобетона впервые проводились в первой половине XX в. А. А. Гвоздевым [3], Г. П. Передерий [4], В. А. Росновским [5], А. А. Долженко [6]. В середине 90-х гг. XX в. были проведены дополнительные исследования с участием С. В. Коврыги [10], В. И. Ефименко [11]. В этих работах трубобетон использовался в сжатых и изгибаемых элементах, конструктивных элементах сооружений. При этом предлагались модели расчета центрально сжатых элементов (табл. 1).

В этих моделях (см. табл. 1) α^* определяется экспериментально, A_c и A_a – площади бетона и арматуры соответственно в поперечном сечении колонны; f_{cd} , f_{yd} – расчетные значения прочности бетона на сжатие и предела текучести стали; f_c , f_y – нормативные значения прочности бетона на сжатие и предела текучести стали; η_a , η_c – коэффициенты, зависящие от гибкости колонны; $R_{пр}$ – приведенная призмная прочность бетона.

Из табл. 1 видно, что исследования проводились на бетонах класса В15-В40, и только исследования Коврыги С. В. проводились с использованием высокопрочных бетонов В60-В100.

Модели расчета трубобетона

Автор трактовки	Формула	Марка бетона	α, α_1
Гвоздев А. А. [3]	$P_3 = F_{\delta}R_{пр} + 2F_c\sigma_T$	B15-B40	2
Передерий Г. П. [4]	$P_3 = F_{\delta}R_{пр} + 2,2F_c\sigma_T$	B15-B40	2,2
Росновский В. А. [5]	$P_1 = F_{\delta}(R_{пр} + 180) + F_c\sigma_T$	B15-B40	1
Маренин В. Ф., Ренский А. Б. [6]	$P_3 = F_{\delta}R_{пр} + \alpha F_c\sigma_T$	B15-B40	α^*
Долженко А. А. [7]	$P_3 = F_{\delta}R_{пр} + \alpha_1 F_c\sigma_T$	B15-B40	α^*
EN 1994-1-1[8]	$N_{EC4} = \eta_a A_a f_{yd} A_c f_{cd} (1 + \eta_c \frac{t f_y}{d f_c})$	B15-B40	η_a $1 + \eta_c \frac{t f_y}{d f_c}$
Коврыга С. В. [10]	$P_3 = F_{\delta}R_{пр} + \alpha F_c\sigma_T$	B60-B100	$\alpha = 2,2$, если $0,02 \leq \mu \leq 0,1$; $\alpha = 2$, если $0,1 \leq \mu \leq 0,16$

Приведенные модели работы трубобетона отличаются коэффициентами упрочнения бетона или стальной трубы. Напряжения, возникающие в сечении трубобетонного элемента в процессе нагружения, показаны на рис. 1. Работа пограничного слоя между ядром и оболочкой не учитывается.

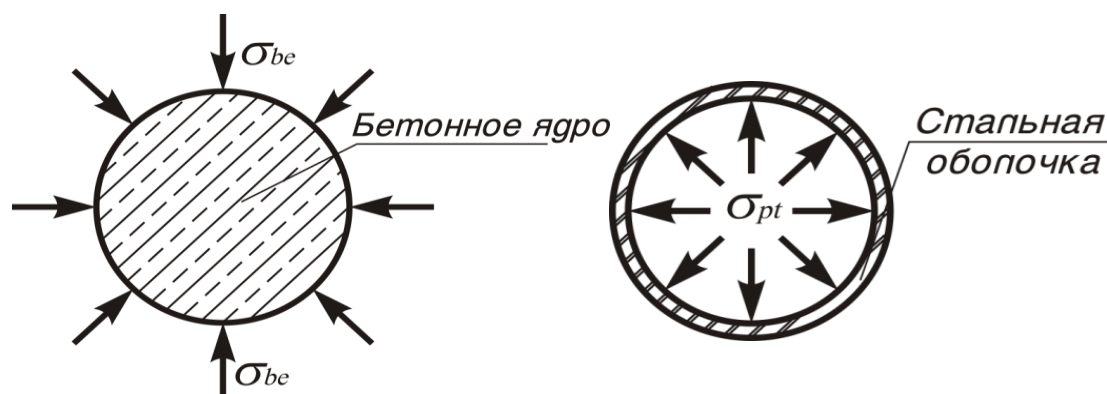


Рис. 1. Напряжения, возникающие в бетонном ядре

В источнике [9] показано, что в стальной трубе вместо ожидаемой усадки происходит расширение высокопрочного бетона, сохраняющееся на протяжении долгого времени. В результате объемного сжатия повышается несущая способность трубобетонного элемента.

Трубобетон идеально подходит для центрально и внецентренно нагруженных элементов, таких как колонны или различного рода стойки, однако вопрос использования его в изгибаемых элементах остаётся открытым. В России вопрос работы изгибаемых элементов из трубобетона исследовался В. И. Ефименко [11]. Получена математическая модель балок из стальных труб, заполненных бетоном класса B15-B40. Эксперименты по испытанию трубобетонных элементов на изгиб проводились в условиях чистого изгиба по схеме, показанной на рис. 2 (BC – зона чистого изгиба).

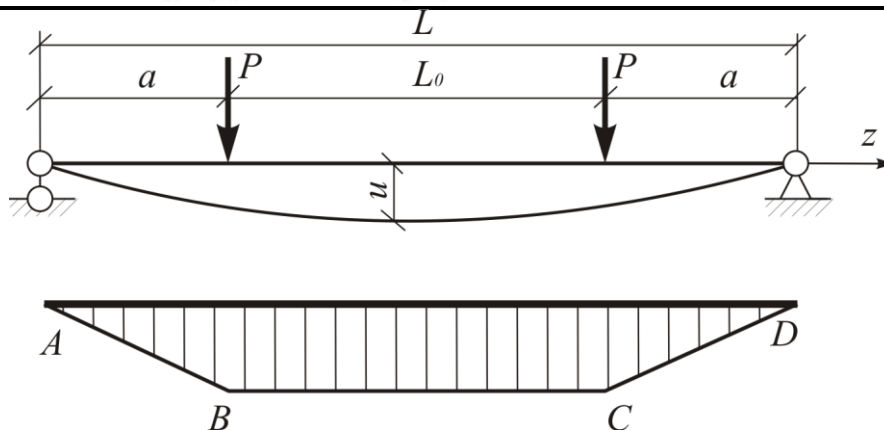


Рис. 2. Расчетная схема

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние в сечении прямоугольного трубобетонного элемента в условиях чистого изгиба (см. рис. 3). В верхней части сечения сжатая зона бетона дополнительно обжата внешней стальной оболочкой, что приводит к смещению нейтральной оси вниз от центра тяжести сечения. Таким образом, высота сжатой зоны, в которой бетон хорошо воспринимает возникающие сжимающие напряжения, увеличивается. Стальная оболочка в верхней части сечения играет роль сжатой арматуры, а в нижней – роль растянутой арматуры.

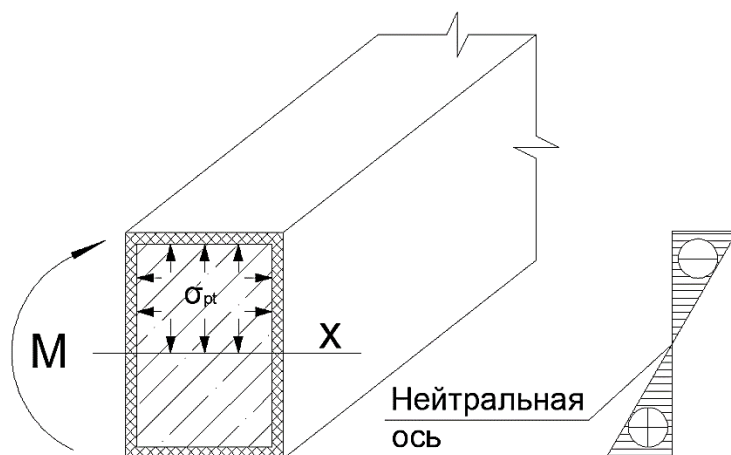


Рис. 3. Схема изгиба балки и эпюра изгибающего момента

На основе рассмотренной модели предлагается более экономичное трубобетонное сечение, получаемое путем установки в растянутой зоне изгибаемого элемента стальной трубы, что приведет к удалению бетона из растянутой зоны и облегчению конструкции. Также для предотвращения потери устойчивости вертикальными стенками металлической обоймы предлагается установить поперечную арматуру на уровне нейтрального слоя с шагом $S = 300$ мм и заменить тяжелый бетон высокопрочным. Предлагаемое сечение трубобетонного изгибаемого элемента показано на рис. 4. Применение высокопрочного бетона позволит значительно увеличить прочность изгибаемого элемента. Для совместной работы бетона, стальной оболочки и внутреннего растягиваемого стального элемента предлагается сваркой закрепить внутреннюю трубу к торцевым фланцам, соединенным с внешней стальной обоймой.

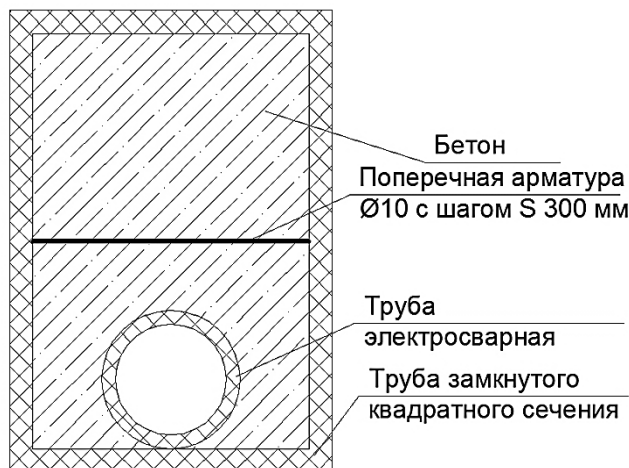


Рис. 4. Схема эффективного сечения для трубобетонных балок

Для заданного сечения трубобетонной балки подбираем геометрические параметры и вычисляем несущую способность по формуле, применяемой для расчета железобетонных балок. Для трехосно сжатого бетона применяем дополнительный коэффициент $\alpha = 2$ [3].

Определяем расположение нейтральной оси:

$$x = (R_s \cdot A_s) / (R_b \cdot \alpha \cdot b) = 6,88 \text{ см.}$$

Определяем максимальный изгибающий момент:

$$M = R_b \cdot b \cdot x \cdot Z = 40,3 \text{ кН} \cdot \text{м.}$$

Расчет произведен по схеме, приведенной на рис. 2. Произведён подбор сечения стального элемента с аналогичной несущей способностью. В работе [12] проводились экспериментальные исследования несущей способности железобетонной балки из высокопрочного бетона. Испытания проводились по той же схеме (см. рис. 2). Все полученные данные сведены в табл. 2.

Если рассмотреть стальную балку с аналогичной несущей способностью, то нужно будет принимать балку из двутавра 20Б1 (ГОСТ 26020-83). При этом количество металла в стальной балке на 40 % выше, чем в трубобетоне.

Таблица 2

Полученные данные

	h , мм	b , мм	R_b , МПа	R_s , МПа	A_s , см ²	A_b , см ²	M , кН·м	m , кг
Фактические характеристики железобетонной балки [12]	120	120	64	355	2,26	141,7	10,1	52
Расчетные характеристики трубобетонной балки	100	70	64	355	18,25	37,82	40	31,07
Расчетные характеристики балки из двутавра 20Б1 (ГОСТ 26020-83)	200	100	–	355	28,49	–	40	29,82

В расчетах изгибаемого элемента из трубобетона не было учтено объемное сжатие высокопрочного бетона, расположенного в сжатой зоне, смещение нейтральной оси, а также остались неисследованными вопросы работы пограничного слоя ядра и обоймы.

Но проведенные расчеты показывают, что при использовании рационального сечения трубобетонная балка легче балки из высокопрочного бетона на 40 % при четырехкратном увеличении несущей способности. В сравнении с металлической балкой трубобетонная балка позволяет снизить металлоёмкость на 40 % при одинаковых прочности и весе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дуванова, И. А. Трубобетонные колонны в строительстве высотных зданий и сооружений / И. А. Дуванова, И. Д. Сальманов // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2014. – № 6. – С. 89-103.
2. Стороженко, И. Л. Расчет трубобетонных конструкций / И. Л. Стороженко, П. И. Пахотный, А. Я. Черный. – К.: Будивэльник, 1991. – 120 с.
3. Гвоздев, А. А. Определение величины разрушающей нагрузки для статически неопределимых систем / А. А. Гвоздев // Проект и стандарт. – 1934. – № 8. – С. 12-16.
4. Передерий, Г. П. Трубчатая арматура / Г. П. Передерий. – М.: Трансжелдориздат, 1945. – 105 с.
5. Росновский, В. А. Трубобетон в мостостроении / В. А. Росновский. – М.: Трансжелдориздат, 1963. – 110 с.
6. Маренин, В. Ф. Вопросы прочности стальных труб, заполненных бетоном / В. Ф. Маренин, А. Б. Ренский // Материалы по металлическим конструкциям. – 1959. – № 4. – С. 58-64.
7. Долженко, А. А. Исследование сопротивления трубобетона осевому сжатию / А. А. Долженко // ВИСИ. – 1964. – № 10. – С. 31-40.
8. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures (BS EN 1994-1-1:2004 published 2005 (EC4), Ref. 1.
9. Берг, О. Я. Исследование неупругих деформаций и структурных изменений высокопрочного бетона при длительном действии сжимающих напряжений / О. Я. Берг, А. Рожков // ЦНИИС. – 1969. – № 70.
10. Коврыга, С. В. Прочность и деформативность при осевом сжатии стальных труб, заполненных бетоном : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Коврыга Сергей Владимирович. – СПб., 1992. – 14 с.
11. Ефименко, В. И. Прочность и деформативность изгибаемых трубобетонных элементов : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ефименко Виктор Иванович. – СПб., 1989. – 127 с.
12. Дзюба, В. А. Применение составной функции диаграммы сжатого бетона для деформационной оценки конструкции / В. А. Дзюба, Ю. С. Глушакова // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2014. – № II-1(18). – С. 109-114.

Макиенко В. М., Соколов П. В., Перваков Д. Г.
V. M. Makienko, P. V. Sokolov, D. G. Pervakov

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ И ОТХОДОВ ГОРНОРУДНОГО ПРОИЗВОДСТВА ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО РЕГИОНА РОССИИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СВАРОЧНО-НАПЛАВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ И РЕМОНТЕ ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

RESEARCH OPPORTUNITIES USE THE WASTE MINING ORE FAR EAST REGION FOR CREATION WELDING MATERIALS FOR USE IN THE CONSTRUCTION AND REPAIR OF RAILWAY TRANSPORT



Макиенко Виктор Михайлович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология металлов» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск). E-mail: mvm_tm@festu.khv.ru

Mr. Viktor M. Makienko – Dr.habil of Engineering, Professor, Head of the Department of Metal Technology, the Far East State Transport University (Russia, Khabarovsk). E-mail: mvm_tm@festu.khv.ru



Соколов Павел Валерьевич – ведущий инженер Института дополнительного образования Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск); 680021, г. Хабаровск, Серышева 47; 8(4212) 61-70-32. E-mail: 617032@gmail.com

Sokolov Pavel V. – Leading engineer of the Institute of additional education, the Far East State Transport University (Russia, Khabarovsk); 680021, Khabarovsk, Serysheva st., 47; 8(4212) 61-70-32. E-mail: 617032@gmail.com



Перваков Дмитрий Геннадьевич – аспирант кафедры «Подвижной состав железных дорог» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск); 680021, г. Хабаровск, Серышева 47; 8(4212) 407-653.

Pervakov Dmitry G. – graduate student " Railway rolling stock ", the Far East State Transport University (Russia, Khabarovsk); 680021, Khabarovsk, Serysheva st., 47; 8(4212) 407-653.

Аннотация. В работе проведен анализ минерального сырья Дальневосточного региона, в том числе отходов предприятий горнорудного производства. Сделаны термодинамические расчеты, в результате которых проведена оценка химического сродства элементов, содержащихся в минеральном сырье, к кислороду, а также изменению свободной энергии Гиббса в зависимости от температуры образования оксидов. На основе экспериментальных исследований разработана шлаковая система для порошковых проволок рутил-карбонатно-флюоритного типа на основе дальневосточного минерального сырья и отходов горнорудного производства. Наплавленный металл имеет высокие сварочно-технологические свойства и качество за счет введения легирующих элементов (Ti, Zr, V), способствующих измельчению зерна и удалению вредных примесей. На основе разработанной шлаковой системы возможно дальнейшее создание порошковой проволоки с требуемыми механическими свойствами наплавленного металла для применения в строительстве и ремонте объектов железнодорожного транспорта.

Summary. In this paper have been made analysis of the mineral raw materials of Far East region, including waste mining production businesses. Thermodynamic calculations have been made, resulting in an assessment of the chemical affinity of the elements contained in mineral raw materials for oxygen, as well as

a change in the Gibbs free energy depending on the temperature of formation of oxides. Developed new slag system designed for flux-cored wires rutile -carbonate- fluorite type based on minerals and mining waste. The weld metal has high welding characteristics and quality due to the introduction of alloying elements (Ti, Zr, B), contributing to grain refinement and removal of contaminants. On the basis of the developed slag system may further creation of cored wire with the desired mechanical properties of the weld metal for use in the construction and repair of railway transport.

Ключевые слова: порошковая проволока, шлаковая система, шихта, минеральное сырье, строительство, ремонт, железнодорожный транспорт.

Key words: cored wire, slag system, charge material, minerals raw materials, construction, repair, railway transport.

УДК 621.791.011

Введение

Создание новых сварочно-наплавочных материалов с использованием рудного сырья без глубокой технологической переработки, а также разработка экономичных и экологически чистых технологий их получения являются важными и актуальными задачами.

Для Дальнего Востока России эти проблемы наиболее ощутимы в силу отсутствия промышленной базы для переработки и производства материалов. В то же время в Дальневосточном регионе имеются большие запасы полезных ископаемых и отходов горнорудного производства, содержащих вещества, пригодные для получения сварочных материалов (оксиды титана, вольфрама, циркония, бора, марганца и других элементов). Однако дальневосточное сырье значительно отличается по составу от сырья других регионов, что требует поиска новых методов и технологий создания материалов, обеспечивающих высокие сварочно-технологические свойства и качество формируемых покрытий.

Анализ показал, что в настоящее время в отечественной и зарубежной промышленности для сварки и наплавки широко применяется порошковая проволока, обладающая рядом преимуществ по сравнению с электродами и проволокой сплошного сечения (возможность легирования наплавленного металла, высокая производительность и экономичность процесса сварки и другие). Поэтому целью данной работы является исследование возможности использования минерального сырья и отходов горнорудного производства Дальневосточного региона для получения сварочных материалов, обладающих высокими физико-механическими и технологическими свойствами.

Применение новых сварочно-наплавочных материалов в строительстве и ремонте объектов железнодорожного транспорта позволит получить значительную экономическую выгоду, повысить безопасность движения поездов, а также повысить технологичность процессов строительства и ремонта элементов пути и подвижного состава.

Методика исследований

Исследования минерального сырья проводились путем определения фазового и химического составов. Анализ фазового состава проводился на рентгеновском дифрактометре MiniFlex II Rigaku, основанном на исследовании структурных характеристик материала при помощи дифракции рентгеновских лучей на порошке или поликристаллическом образце исследуемого материала. Результатом исследования является зависимость интенсивности излучения от угла рассеяния.

Кроме того, выполнялся термодинамический анализ возможных реакций в исследуемых шлаковых системах, построены графики и проведена оценка химического сродства к кислороду элементов по изменению энергии Гиббса и химических потенциалов при образовании оксидов.

Экспериментальные исследования проводились с целью создания шлаковых систем, а также получения на их основе порошковых проволок посредством построения математических моделей, диаграмм влияния параметров электродугового процесса и легирующих элементов на технологические характеристики и качество формируемых покрытий. Основной задачей исследования системы «состав-свойство» является установление функциональной зависимости между входными параметрами – факторами и выходными параметрами – показателями качества функционирования системы, а также определение уровней, соответствующих рациональным выходным параметрам технологического процесса.

Результаты исследований и их обсуждение

На первом этапе работы проводился анализ минерально-сырьевой базы и предприятий горнодобывающей отрасли Дальневосточного региона (см. табл. 1, 2).

Таблица 1

Месторождения рудных ископаемых Дальневосточного региона

Месторождение	Место расположения	Основные элементы	Тип руды
Южно-Хинганское	Еврейская автономная область	MnO, SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , MgO, CaCO ₃	Браунит, Гаусманит
Фестивальное, Правоурмийское	Хабаровский край	WO ₃ , CaO, SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , MgO	Вольфрамит, Шеелит
Лермонтовское	Приморский край	WO ₃ , CaO, SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , MgO	Шеелит
Охотское, Тугуро-Чумиканское, Николаевское, Верхнебуреинское	Хабаровский край	MoO ₃ , SiO ₂ , WO ₃ , CaO, Al ₂ O ₃	Молибденит, Кварцмолибденит, Молибденит шеелитовый
Алданостановое, Баладекское	Хабаровский край	TiO ₂ , Fe ₂ O ₃ , SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , MgO, MnO	Титаномагнетит, Аппатит-ильменит-титаномагнетит
Ариадненское	Приморский край	TiO ₂ , Fe ₂ O ₃ , SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , MgO, MnO	Титаномагнетит
Олёмменское	Амурская область	TiO ₂ , Fe ₂ O ₃ , SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , MgO, MnO	Ильменит, Титаномагнетит
Камчатское	Камчатская область	TiO ₂ , Fe ₂ O ₃ , SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , MgO, MnO	Титаномагнетит
Искинское	Хабаровский край	Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , Fe ₂ O ₃	Алунит
Алгаминское	Хабаровский край	ZrO ₂ , SiO ₂ , WO ₃ , CuO	Бадделеит
Кавалеровское	Приморский край	B ₂ O ₃ , SiO ₂ , CaO	Датолит
Ярославское	Приморский край	CaF ₂ , SiO ₂	Флюорит
Корфовское	Хабаровский край	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , K ₂ O, Na ₂ O, CaO	Гранодиорит
Каффе	Хабаровский край	CaCO ₃	Мрамор
Святогорское	Хабаровский край	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	Туф
Корейанское	Хабаровский край	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CaO	Гранит
Кульдурское	Еврейская автономная область	MgO, SiO ₂ , CaO	Брусит

Таблица 2

Предприятия горнодобывающей отрасли Дальневосточного региона

№	Наименование	№	Наименование	№	Наименование
1	ООО Предприятие "Аимкан"	15	ЗАО "Могот"	29	ЗАО Старателей "Дальневосточные ресурсы"
2	Артель старателей "Александровская"	16	ООО "Нагима"	30	ООО Артель старателей "Заря" (частная)
3	ЗЛО "Амурское золото"	17	ООО Артель старателей "Надежда"	31	НПФ "Компас геосервис"
4	ООО ГК "Апсакан"	18	ООО "Пилос и С"	32	ООО "Многовершинное"
5	Артель старателей "Восток-1"	19	ОАО "Покровский рудник"	33	Артель старателей "Прибрежная"
6	ЗАО "Дальняя"	20	ОАО Прииск "Соловьевский"	34	ОАО Золотодобывающая компания "Приморье"
7	ОАО Прииск "Дамбуки"	21	ООО "Спутник"	35	ЗАО "Колчан"
8	ЗАО Артель старателей "Заря-1"	22	ЗАО "Становик"	36	ООО "Бекчи"
9	ОАО «Золотая корона»	23	ООО "Территория"	37	ТОО АС "Ниман"
10	ООО "Золотая речка"	24	ТОО "Угрюм-река"	38	ООО "Рос-ДВ"
11	ООО Артель старателей "Исток"	25	Старательская Артель "Улунга"	39	ООО "БОР"
12	ООО "Каскад"	26	ЗАО Золотодобывающее предприятие "Утес"	40	Прииск "Болотистый"
13	ООО "Лукинда"	27	ЗАО "Хэргу"		
14	Прииск "Фадеевский рудный узел"	18	Артель старателей "Восток" (частная)		

На основе разработанной методологии и ранее проведенных исследований [5] были выбраны компоненты шлаковой системы порошковой проволоки (см. табл. 3).

Таблица 3

Компоненты основы шлаковой системы

Назначение	Компонент шихты	Основные элементы	Месторождение
Шлакообразующие	Гранодиорит	SiO_2, Al_2O_3	Корфовское, Хабаровский край
	Флюорит	CaF_2	Ярославское, Приморский край
Газообразующие/ Стабилизирующие	Мрамор	$CaCO_3$	Корфовское, Хабаровский край
Легирующие	Бадделеит	ZrO_2	Алгаминское, Хабаровский край
	Датолит	B_2O_3	Кавалеровское, Приморский край
Раскисляющие/ Легирующие	Ферромарганец	марка ФМн-0,5	-
	Ферросилиций	марка ФС-45	-
Шлакообразующие/ Стабилизирующие	Титаномагнетит	TiO_2	Фадеевский рудный узел, Приморский край

За основу данной шлаковой системы был взят состав ранее разработанной порошковой проволоки ПП-ПМС-1-2,8ПС49-А2Н [4], в который дополнительно были введены датолитовый концентрат Кавалеровского месторождения и титаномagnetитовый шликх Фадеевского рудного узла, содержащие оксиды бора и титана, для которых был проведен анализ химического и фазового составов. Результаты исследований приведены на рис. 1 – 2 и табл. 4.

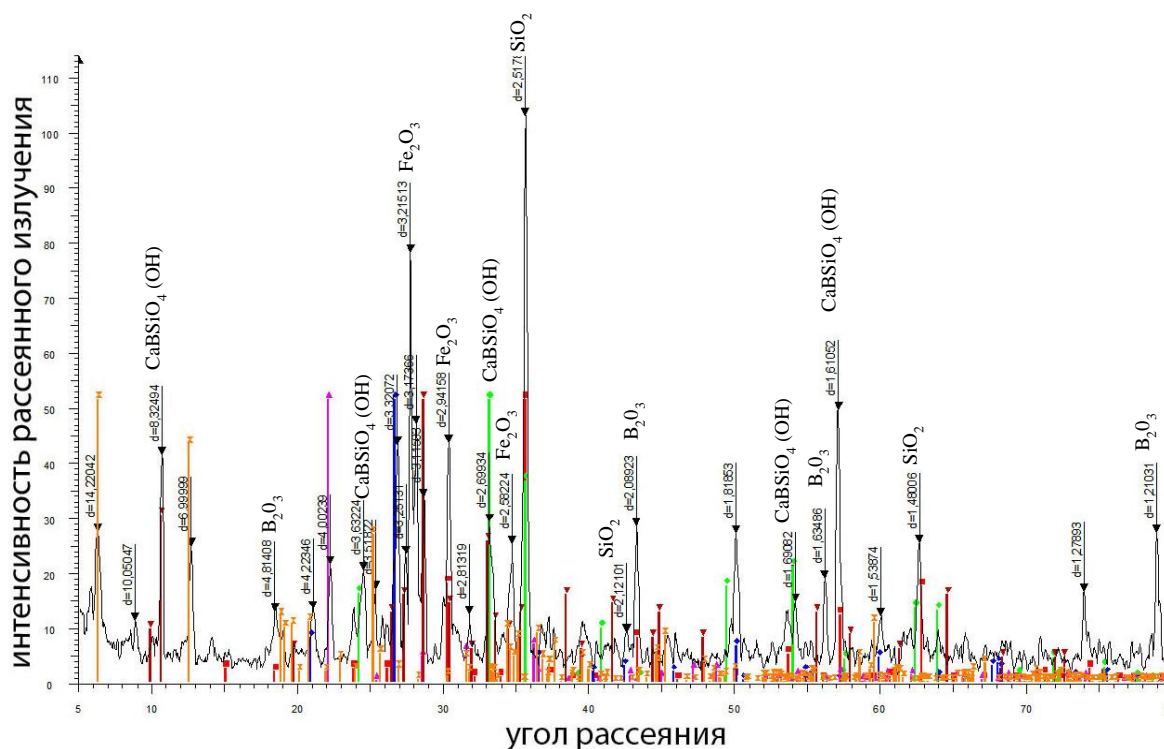


Рис. 1. Фазовый состав датолитового концентрата Кавалеровского месторождения

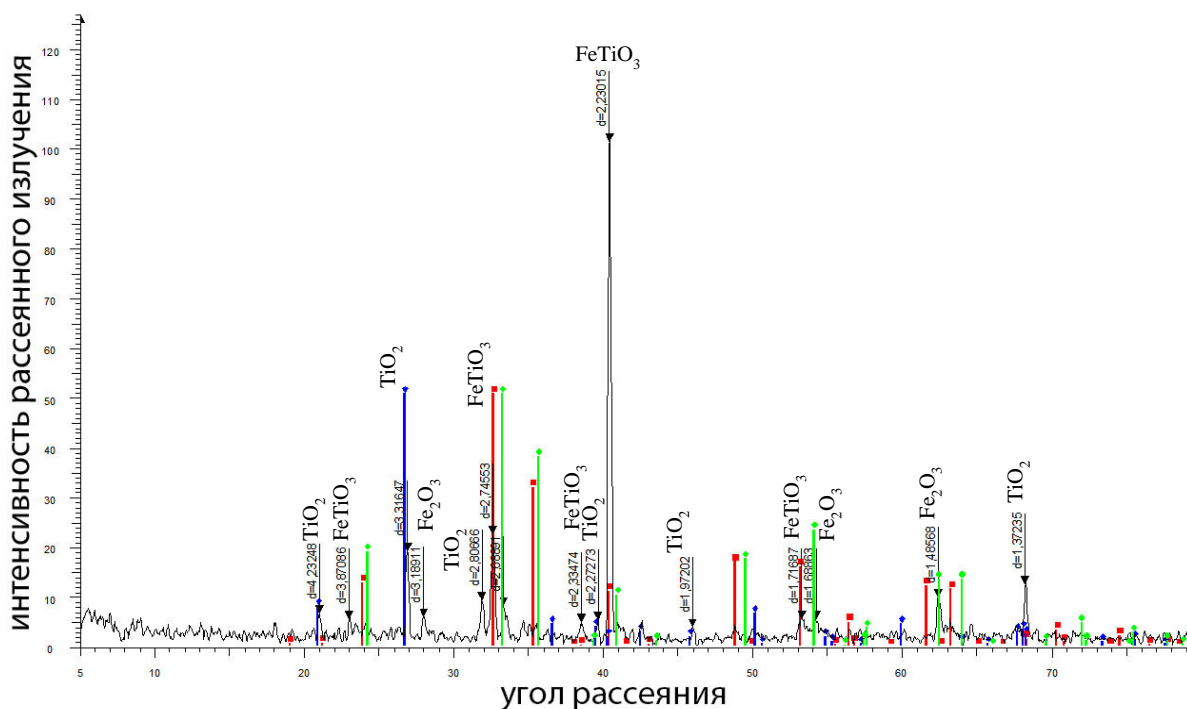


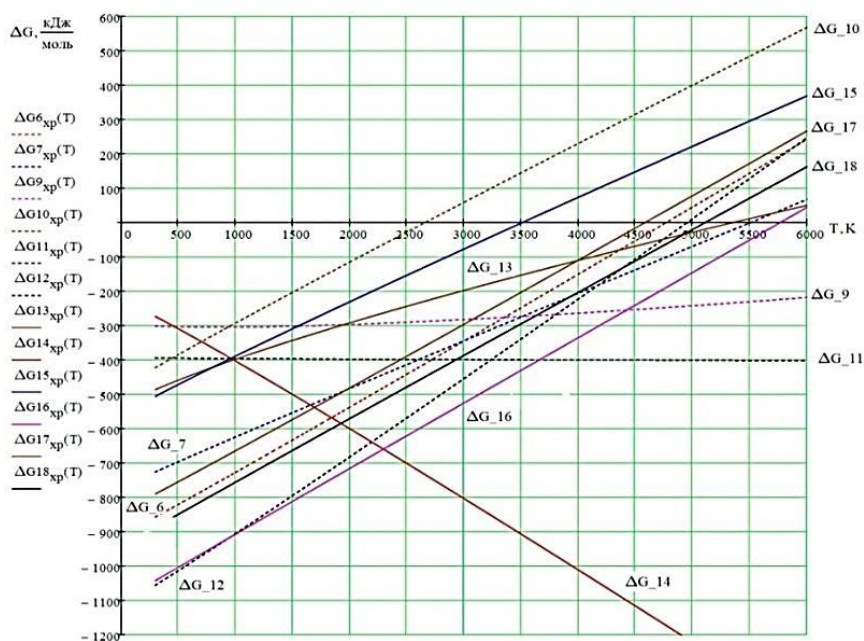
Рис. 2. Фазовый состав титаномagnetитового шликх Фадеевского рудного узла

Результаты анализа химического состава

Титаномагнетитовый шликс				Датолитовый концентрат			
Содержание элементов		Содержание оксидов		Содержание элементов		Содержание оксидов	
Элемент	масс. %	Формула	масс. %	Элемент	масс. %	Формула	масс. %
H	2,40	SiO ₂	18,27	H	2,40	B ₂ O ₃	
Si	7,12	TiO ₂	22,57	Si	13,34	TiO ₂	0,06
Ti	11,27	Al ₂ O ₃	1,41	Ti	0,03	Al ₂ O ₃	0,70
Al	0,62	Fe ₂ O ₃	13,97	Al	0,31	Fe ₂ O ₃	5,08
Fe	8,14	MnO	0,94	Fe	2,96	MnO	0,28
Mn	0,60	CaO	1,81	Mn	0,18	CaO	37,22
Ca	1,08	MgO	0,59	Ca	22,17	MgO	0,32
Mg	0,30	Na ₂ O	0,71	Mg	0,16	K ₂ O	0,03
O	20,74	K ₂ O	0,17	Pb	0,0071	P ₂ O ₅	0,025
Na	0,44	P ₂ O ₅	0,146	O	25,78		
K	0,12			K	0,02		
P	0,053			P	0,009		
S	0,118			S	0,045		
Cr	0,4372			B	11,20		

В результате анализа установлено что, в титаномагнетитовом шликсе содержится рутил (TiO₂) – 22,57 %, а в датолитовом концентрате борный ангидрид (B₂O₃) – 18,9 %. Анализ литературы [1, 2, 3, 6] показал, что рутил улучшает сварочно-технологические свойства, а также способствует повышению качества наплавленного металла. Бор повышает механические свойства вследствие образования боридов.

Результаты термодинамического анализа приведены на рис. 3 –4.



- 6 – Si + O₂ = SiO₂;
- 7 – 2Mn + O₂ = 2MnO;
- 9 – S + O₂ = SO₂;
- 10 – 2Ni + O₂ = 2NiO;
- 11 – C + O₂ = CO₂;
- 12 – 4/3Al + O₂ = 2/3 Al₂O₃;
- 13 – 2Fe + O₂ = 2FeO;
- 14 – 2C + O₂ = 2CO;
- 15 – 2/3W + O₂ = 2/3WO₃;
- 16 – Zr + O₂ = ZrO₂;
- 17 – 4/3B + O₂ = 2/3 B₂O₃;
- 18 – Ti + O₂ = TiO₂

Рис. 3. Химическое сродство элементов к кислороду

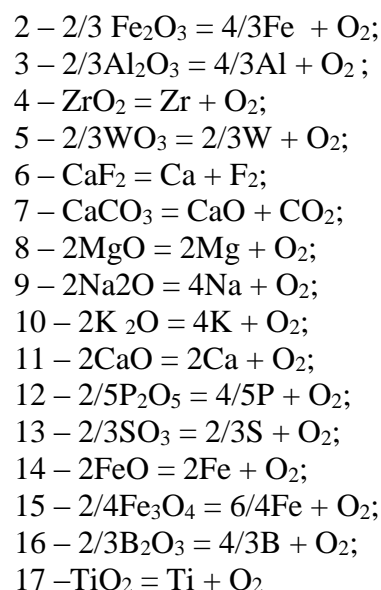
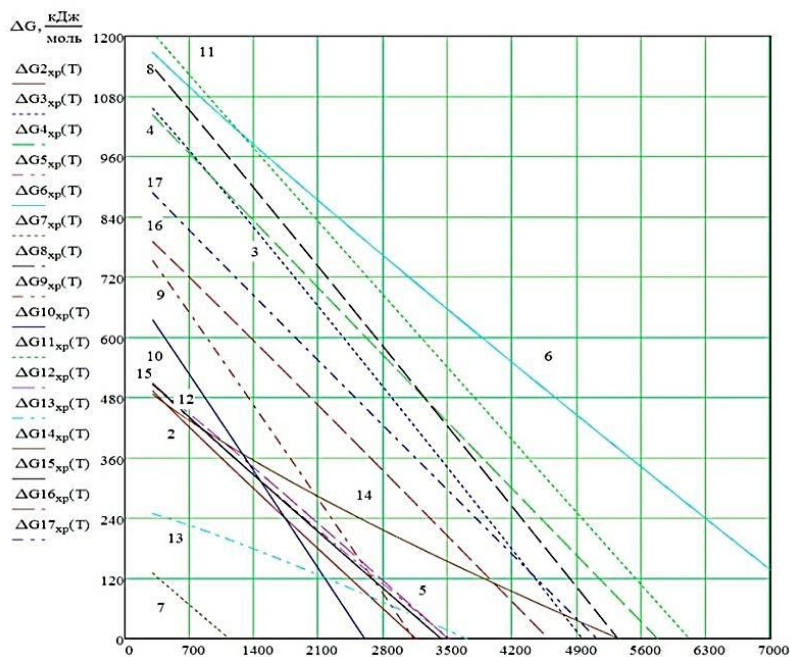


Рис. 4. Изменение свободной энергии Гиббса ($\Delta G_{x.p}^0$) в зависимости от температуры для оксидов

Полученные зависимости (см. рис. 3), позволили судить о возможных химических реакциях, а также провести предварительную оценку воздействия окислительной среды на элементы анализируемой системы. По результатам анализа реакций сделаны следующие выводы:

- при температуре до 2500 К (при взаимодействии с углеродом до 750 К) для всех элементов шлаковой системы энергия Гиббса меньше нуля, это свидетельствует о том, что они должны находиться в виде оксидов;

- при повышении температуры энергия Гиббса увеличивается, это свидетельствует об уменьшении химического сродства элементов к кислороду (кроме реакции образования окиси углерода);

- химическое сродство к кислороду (без учета мольных долей элементов) располагается в порядке уменьшения в следующий ряд: ($\text{Zr} > \text{Al} > \text{C} > \text{Ti} > \text{Si} > \text{B} > \text{Mn} > \text{W} > \text{Fe} > \text{Ni}$).

Также можно сделать вывод о том, что в данной системе при температуре 1700 К наибольшее сродство к кислороду имеет цирконий. Для таких элементов, как алюминий, титан, кремний, бор, марганец, вольфрам, наиболее вероятными термодинамическими процессами будут процессы восстановления, так как энергия Гиббса реакций 12, 16, 18, 6, 17, 7 ниже (по абсолютному значению) свободной энергии для CO, который в данной системе при заданной температуре является восстановителем перечисленных элементов.

Расчет энергии Гиббса показал (см. рис. 4), что если не рассматривать химическое взаимодействие между оксидами, то процесс разложения большинства оксидов (без учета мольных долей) будет происходить при температуре от 2500 до 7000 К, исключение составляют CaCO_3 – 1300 К и CaF_2 – более 7000 К (см. рис. 2). С учетом мольных долей данный процесс смещается в сторону более высоких температур: от 3500 К.

Результаты термодинамических расчетов показали, что данная шлаковая система способствует восстановлению титана, бора и других легирующих элементов.

На следующем этапе были проведены экспериментальные исследования в целях определения наиболее оптимального соотношения массовых долей компонентов и изучения полученных механических и технологических характеристик формируемых покрытий, а

также качества наплавленного металла согласно критериям оценки работоспособности шлаковой системы.

В качестве модели исследования сварочной ванны была выбрана расчетная схема (см. рис. 5.)

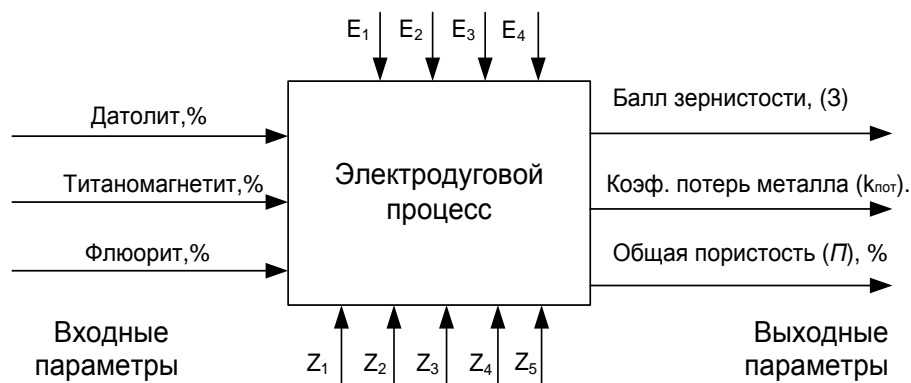


Рис. 5. Модель влияния факторов на критерии работоспособности шлаковой системы при электродуговом процессе

В качестве входных параметров были выбраны датолит, титаномагнетит и флюорит (см. табл. 5). Выходные технологические параметры – балл зернистости, коэффициент потерь, общая пористость. Кроме того, на объект исследования могут оказывать влияние контролируемые параметры $E_1 - E_4$ (см. табл. 6) и неконтролируемые параметры (компоненты основы шлаковой системы) $Z_1 - Z_5$ (см. табл. 7).

Таблица 5

Входные параметры

Обозначение	Компонент	Интервал варьирования, масс. %
X_1	Титаномагнетитовый шлик	0 - 37
X_2	Флюорит	
X_3	Датолитовый концентрат	

Постоянными контролируемыми входными параметрами были коэффициент заполнения, сила тока, напряжение и вылет электрода, которые имели следующие значения (см. табл. 6).

Таблица 6

Постоянные контролируемые входные параметры

Обозначение	Наименование	Значение
E_1	Коэффициент заполнения –	30 – 31 %
E_2	Сила тока	380 – 400 А
E_3	Напряжение	22 – 24 В
E_4	Вылет электрода	30 – 40 мм

Массовые доли компонентов основы шлаковой системы (см. табл. 7) оставались неизменными.

Массовые доли компонентов основы шлаковой системы

Обозначение	Компонент	Значение, мас. %
Z ₁	Гранодиорит	8
Z ₂	Мрамор	37
Z ₃	Бадделейт	1
Z ₄	Ферромарганец	10
Z ₅	Ферросилиций	7

По результатам проведенных экспериментов были получены данные в виде откликов системы, на основе которых рассчитывались значения коэффициентов регрессии, определяемые критериями работоспособности шлаковой системы, и построены математические зависимости для зернистости, пористости и коэффициента потерь.

- для зернистости (y_з):

$$y_z = 12x_1 + 11x_2 + 11x_3 - 2x_1x_2 - 2x_1x_3 + 2,67x_1x_2(x_1-x_2) + 2,67x_1x_3(x_1-x_3) - 8,1x_2x_3(x_2-x_3) + 2,67x_1x_2(x_1-x_3) - 5,33x_1x_2(x_2-x_3) + 8,1x_1x_3(x_1-x_2) + 8,1x_1x_3(x_2-x_3) + 10,67x_2x_3(x_1-x_2); \quad (1)$$

- для пористости (y_п):

$$y_p = 4,23x_1 + 15,61x_2 + 7,25x_3 + 6,12x_1x_2 + 13,48x_1x_3 - 37,12x_2x_3 - 7,44x_1x_2x_3 + 7,38x_1x_2(x_1-x_2) + 4,32x_1x_3(x_1-x_3) + 1,36x_2x_3(x_2-x_3) - 1,87x_1x_2(x_1-x_3) - 9,06x_1x_2(x_2-x_3) - 0,77x_1x_3(x_1-x_2) + 25,01x_1x_3(x_2-x_3) + 2,34x_2x_3(x_1-x_2); \quad (2)$$

- для коэффициента потерь (y_{кпот}):

$$y_{kpot} = 0,35x_1 + 0,22x_2 + 0,33x_3 + 0,3x_1x_2 - 0,6x_1x_3 + 0,02x_2x_3 + 0,82x_1x_2x_3 - 9,22x_1x_2(x_1-x_2) + 5,89x_1x_3(x_1-x_3) - 1,25x_2x_3(x_2-x_3) + 0,05x_1x_2(x_1-x_3) + 0,18x_1x_2(x_2-x_3) - 1,2x_1x_3(x_1-x_2) + 0,48x_1x_3(x_2-x_3) + 0,45x_2x_3(x_1-x_2). \quad (3)$$

На основании полученных зависимостей (1) – (3) строилась совмещенная диаграмма влияния соотношения переменных факторов на критерии работоспособности шлаковой системы в предварительно определённой области факторного пространства (см. рис. 6).

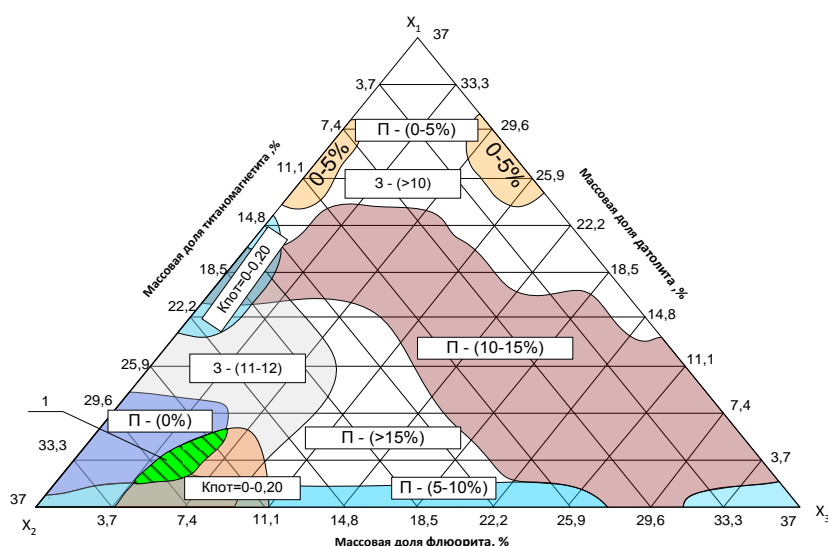


Рис. 6. Совмещенная диаграмма влияния соотношения компонентов состава шихты на критерии работоспособности шлаковой системы:

З – балл зернистости; П – пористость наплавленного металла; К_{пот} – коэффициент потерь; 1 – область факторного пространства с наилучшими показателями работоспособности шлаковой системы

По данной диаграмме была определена область факторного пространства, с наиболее эффективной работоспособностью шлаковой системы (см. табл. 8).

Таблица 8

Соотношение массовых долей компонентов шлаковой системы

№	Компонент шлаковой системы	Содержание, мас. %
1	Гранодиорит	8,0
2	Флюорит	5,0
3	Мрамор	37,0
4	Бадделеит	1,0
5	Ферромарганец	10,0
6	Ферросилиций	7,0
7	Титаномагнетит	27,5
8	Датолит	4,5

После расчета соотношения массовых долей компонентов шлаковой системы производилась опытная наплавка порошковой проволокой с заданным составом и проводились исследования в целях определения химического состава (см. табл. 9) и структуры наплавленного металла (см. рис. 7).

Таблица 9

Химический состав наплавленного металла

Элементы	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	Ti	B	Zr
Содержание	0,062	0,18	0,29	0,03	0,04	0,02	0,002	0,0013	0,0074	0,0036



Рис. 7. Микроструктура наплавленного металла ($\times 160$)

Результатами анализов установлено наличие титана и бора в наплавленном металле, что свидетельствует о их восстановлении из оксидов при электродуговом процессе. При этом структура наплавленного металла феррито-перлитная (балл зерна 10 – 11, пористость 2 – 3 %).

Выводы

1. Исследованиями установлена возможность использования минерального сырья и отходов горнорудного производства Дальневосточного региона России для создания сварочно-наплавочных материалов.
2. Разработанная шлаковая система обеспечивает высокие сварочно-технологические свойства и качество наплавленного металла.
3. На основе разработанной шлаковой системы возможно дальнейшее создание порошковой проволоки с требуемыми механическими свойствами наплавленного металла для применения в строительстве и ремонте объектов железнодорожного транспорта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Получение шлаковой системы порошковой проволоки из минерального сырья Дальневосточного региона / А. Д. Верхотуров, В. М. Макиенко, Д. В. Строителей, И. О. Романов // Химическая технология. – 2007. – № 10. – С. 433-442.
2. Ерохин, А. А. Металлургия сварки / А. А. Ерохин // Сварка в машиностроении : справочник. В 4 т. Т. 1 / Г. А. Николаев [и др.]. – М.: Машиностроение, 1978. – С. 62-97.
3. Лякишев, Н. П. Боросодержащие стали и сплавы / Н. П. Лякишев. – М.: Metallurgy, 1986. – 197 с.
4. Макиенко, В. М. Разработка сварочно-наплавочных порошковых проволок из минерального сырья Дальневосточного региона / В. М. Макиенко, Д. В. Строителей, И. О. Романов // Сварка в машиностроении, приборостроении. – 2009. – № 10 – С. 17-18.
5. Макиенко, В. М. Совершенствование процессов создания шлаковых систем и получение сварочных материалов с использованием минерального сырья Дальневосточного региона: дис. ... д-ра техн. наук / Макиенко Виктор Михайлович. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2011 – 191 с.
6. Походня, И. К. Сварочные материалы. Состояние и тенденции развития / И. К. Походня // Сварочное производство. – 2003. – № 6. – С. 26-39.