

Олейников А. И., Бормотин К. С.
A. I. Oleinikov, K. S. Vormotin

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ КРЫЛОВЫХ ПАНЕЛЕЙ В РЕЖИМЕ ПОЛЗУЧЕСТИ С ДЕФОРМАЦИОННЫМ СТАРЕНИЕМ В РЕШЕНИЯХ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ

MODELING THE PROCESS OF FORMING WING PANELS IN THE CREEP MODE WITH STRAIN AGING IN THE SOLUTION OF INVERSE PROBLEMS



Олейников Александр Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского», (Россия, Жуковский). E-mail: a.i.oleinikov@mail.ru.

Mr. Alexander I. Oleinikov – Dr.habil. of Physics and Mathematics, Professor, Chief Researcher, Professor N.E. Zhukovsky Central Aero&hydrodynamic Institute, town of, Moscow Region (Russia, Zhukovsky). E-mail: a.i.oleinikov@mail.ru.



Бормотин Константин Сергеевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Механика и анализ конструкций и процессов» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: cvmi@knastu.ru.

Mr. Konstantin S. Vormotin – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Mechanics and Analysis of Structures and Processes, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia Komsomolsk-on-Amur). E-mail: cvmi@knastu.ru

Аннотация. Рассматриваются обратные задачи моделирования формообразования крупногабаритных монолитных разнотолщинных панелей двойной кривизны в режиме термофиксации в пределах упругости в температурно-временном диапазоне деформационного искусственного старения и установившейся ползучести материала. Учёт данного старения производится заданными линейными зависимостями изменения деформационных свойств. Проведено прямое сравнение и анализ решений при постоянных и переменных деформационных характеристиках формируемого материала.

Summary. The paper considers the inverse problems of modeling the process of forming large solid various-thickness double-curvature panels in the heat-setting mode within the limits of elasticity in the temperature-time range of artificial-aging deformation and steady-state creep. This aging is taken into consideration through a set of linear relationships of the change of deformation properties. We make a direct comparison and analysis of the solutions both for fixed and variable deformation characteristics of the material being formed.

Ключевые слова: релаксация, ползучесть, формовка, пружинение, обратная задача, вариационные принципы, метод конечных элементов.

Key words: relaxation, creep, forming, springback, inverse problem, variational principles, finite element method.

УДК 519.853.6

Введение

Настоящая работа посвящена актуальной проблеме постановки серийного формообразования крыловых панелей с использованием эффектов ползучести и деформационного старения [5; 13; 27] в условиях «КнААЗ» филиала ПАО «Компания «Сухой». Режим такого

формообразования должен одновременно обеспечивать получение точности обвода панели крыла и требуемого комплекса свойств и структуры материала панели [24].

В работе авторов [2] рассматривался процесс формообразования при температурно-временном диапазоне, при котором старением сплава можно было пренебречь. В данной работе рассматривается диапазон, соответствующий ступени искусственного старения алюминиевого сплава.

Первые обоснования использования явления ползучести в технологических процессах обработки металлов давлением принадлежат Н. Н. Малинину [11; 12], А. А. Поздееву [3], Б. Д. Копыскому [7] и О. В. Соснину [17]. Первые итоги исследований в этом направлении изложены в [10; 11; 18]. В работах [1; 6; 17; 19; 20; 21; 22; 23] экспериментально показано, что формовка в «режиме ползучести» под воздействием напряжений, не превосходящих предела упругости материала, обеспечивает детали более высокий остаточный прочностной ресурс и меньшую поврежденность по сравнению с обычной «холодной» штамповкой. Медленное деформирование, когда значительную часть необратимых деформаций составляют деформации ползучести, приводит к снижению усилий формообразования.

К настоящему времени процесс формообразования верхних панелей крыла из алюминиевых сплавов в режиме ползучести, совмещенный с процессом искусственного старения, является наиболее приемлемым [26; 28; 29].

Для расчёта пружинения панели после данного формообразования использовалась концепция так называемого эквивалентного модуля [26]. В данной работе предлагается учитывать непрерывные изменения деформационных характеристик материала, которые происходят в процессе деформационного старения.

Вариационная формулировка задачи формообразования

Рассмотрим квазистатическую задачу кинематического формообразования в общей лагранжевой формулировке (TL) [9], включающую деформирование в ползучести и упругую разгрузку. Данную задачу можно сформулировать методом штрафа в виде вариационного принципа с функционалом [4]

$$J(\dot{u}, \ddot{u}) = \frac{1}{\varepsilon_1} \|\dot{u} - \dot{u}^*\|_S^2 + a(u, u) + a(\ddot{u}, \ddot{u}) + \frac{1}{\varepsilon_2} \|\ddot{u} - \ddot{u}^*\|_S^2, \quad (1)$$

$$\varepsilon_1 > 0, \quad \varepsilon_1 \rightarrow 0, \quad \varepsilon_2 > 0, \quad \varepsilon_2 \rightarrow 0,$$

где \dot{u}_i^* – заданные остаточные скорости перемещений; \dot{u}^* – произвольное приближённое

решение; $a(\dot{u}, \dot{v}) = \int_V \frac{\partial E(\dot{u}_{i,j})}{\partial \dot{u}_{i,j}} \dot{v}_{i,j} dV$ и $a(\ddot{u}, \ddot{v}) = \int_V \left(\frac{\partial \tilde{E}(\ddot{u}_{i,j})}{\partial \ddot{u}_{i,j}} \right) \ddot{v}_{i,j} dV,$

$E(\dot{u}_{i,j}) = \frac{1}{2} c_{ijkl} \dot{\varepsilon}_{ij} \dot{\varepsilon}_{kl} - c_{ijkl} \dot{\varepsilon}_{ij} \eta_{kl} + \frac{1}{2} \sigma_{ij} \dot{u}_{k,i} \dot{u}_{k,j}$, $\tilde{E}(\ddot{u}_{i,j}) = \frac{1}{2} c_{ijkl} \ddot{\varepsilon}_{ij} \ddot{\varepsilon}_{kl} - c_{ijkl} \ddot{\varepsilon}_{ij} \eta_{kl} + \frac{1}{2} \rho_{ij} \ddot{u}_{k,i} \ddot{u}_{k,j}$ – потенциальные функции, здесь c_{ijkl} – компоненты тензора упругих констант; $\dot{\varepsilon}_{ij}$, $\ddot{\varepsilon}_{ij}$ – компоненты скорости текущих и остаточных деформаций Грина-Лагранжа; σ_{ij} , ρ_{ij} – компоненты текущего и остаточного второго тензора напряжений Пиола-Кирхгофа; $\eta_{kl} = \eta_{kl}(\sigma_{ij}, q_n)$ – компоненты скорости деформаций ползучести, определяемые, в общем случае, напряжениями и некоторым числом структурных параметров q_n [16], $i, j, k, l = 1, 2, 3$, $n = 1, 2, \dots, p$,

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} (\dot{u}_{i,j} + \dot{u}_{j,i} + \dot{u}_{k,i} u_{k,j} + u_{k,i} \dot{u}_{k,j}), \quad \ddot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} (\ddot{u}_{i,j} + \ddot{u}_{j,i} + \ddot{u}_{k,i} \tilde{u}_{k,j} + \tilde{u}_{k,i} \ddot{u}_{k,j}),$$

здесь \dot{u}_i , \ddot{u}_i – компоненты скорости текущих и остаточных перемещений; по повторяющимся индексам проводится суммирование от 1 до 3, а через запятую обозначено дифференцирование:

$$u_{i,j} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j}.$$

Компоненты скорости текущих и остаточных первых тензоров напряжений Пиола-Кирхгофа имеют вид

$$\dot{\Sigma}_{ij} = \frac{\partial E(\dot{u}_{i,j})}{\partial \dot{u}_{i,j}} = (\delta_{ik} + u_{i,k}) \dot{\sigma}_{kj} + \dot{u}_{i,k} \sigma_{kj}, \quad \dot{P}_{ij} = \frac{\partial \tilde{E}(\dot{\tilde{u}}_{i,j})}{\partial \dot{\tilde{u}}_{i,j}} = (\delta_{ik} + \tilde{u}_{i,k}) \dot{\rho}_{kj} + \dot{\tilde{u}}_{i,k} \rho_{kj}.$$

Для компонент скорости второго тензора напряжений Пиола-Кирхгофа выполняются определяющие соотношения

$$\dot{\sigma}_{ij} = c_{ijkl} (\dot{\epsilon}_{kl} - \eta_{kl}), \quad \dot{\rho}_{ij} = c_{ijkl} (\dot{\tilde{\epsilon}}_{kl} - \eta_{kl}).$$

Стационарное значение вариации функционала (1), с учётом независимости \dot{u}_i , $\dot{\tilde{u}}_i$, даёт два вариационных принципа: вариационный принцип задачи деформирования в ползучести и упругой разгрузки (пружинения).

Применяя основные процедуры метода конечных элементов [9] к данным вариационным принципам, получим систему линейных алгебраических уравнений двух задач (задача деформирования и задача разгрузки) [4]

$$\mathbf{K}\dot{\mathbf{U}} = \dot{\mathbf{R}}, \quad \tilde{\mathbf{K}}\dot{\tilde{\mathbf{U}}} = \dot{\tilde{\mathbf{R}}}(\dot{\mathbf{U}}),$$

где \mathbf{K} , $\tilde{\mathbf{K}}$ – симметричные матрицы касательной жёсткости, определённые в момент t ; $\dot{\mathbf{U}}$, $\dot{\tilde{\mathbf{U}}}$ – вектора скоростей узловых перемещений; $\dot{\mathbf{R}}$ – вектор внутренних и внешних сил; $\dot{\tilde{\mathbf{R}}}$ – вектор сил, обусловленных начальными деформациями и начальными напряжениями.

Оценка влияния изменения деформационно-прочностных свойств в процессе формообразования

Пусть заданы следующие линейные зависимости изменения модуля Юнга, коэффициентов и показателей степенного закона установившейся ползучести:

$$\begin{aligned} E &= (E_\alpha - E_\beta) \cdot \left(1 - \frac{t}{10}\right) + E_\beta, \quad B_1 = (B_{1\alpha} - B_{1\beta}) \cdot \left(1 - \frac{t}{10}\right) + B_{1\beta}, \\ B_2 &= (B_{2\alpha} - B_{2\beta}) \cdot \left(1 - \frac{t}{10}\right) + B_{2\beta}, \quad n_1 = (n_{1\alpha} - n_{1\beta}) \cdot \left(1 - \frac{t}{10}\right) + n_{1\beta}, \\ n_2 &= (n_{2\alpha} - n_{2\beta}) \cdot \left(1 - \frac{t}{10}\right) + n_{2\beta}. \end{aligned} \quad (2)$$

где $E_\alpha = 8158 \text{ ед}/\text{м}^2$, $B_{1\alpha} = 7,67 \cdot 10^{-22} \left(\frac{\text{ед}}{\text{м}^2}\right)^{-n_{1\alpha}} \times \text{ед}^{-1}$, $n_{1\alpha} = 12,5$,
 $B_{2\alpha} = 2,39 \cdot 10^{-19} \left(\frac{\text{ед}}{\text{м}^2}\right)^{-n_{2\alpha}} \times \text{ед}^{-1}$, $n_{2\alpha} = 10$ – модуль упругости, коэффициенты и показатели ползучести в законе Нортона при растяжении и сжатии для материала в исходном состоянии поставки на участок формовки (В95очТФ); $E_\beta = 6027 \text{ ед}/\text{м}^2$,
 $B_{1\beta} = 1,46 \cdot 10^{-31} \left(\frac{\text{ед}}{\text{м}^2}\right)^{-n_{1\beta}} \times \text{ед}^{-1}$, $n_{1\beta} = 20$, $B_{2\beta} = 2,4 \cdot 10^{-25} \left(\frac{\text{ед}}{\text{м}^2}\right)^{-n_{2\beta}} \times \text{ед}^{-1}$, $n_{2\beta} = 15$ – модуль упругости, коэффициенты и показатели ползучести в законе Нортона при растяжении и сжатии для материала после данной термомеханической обработки, соответствующие требуемому комплексу свойств и структуры материала панели (В95очТ2).

Рассмотрим квадратную пластинку толщиной h и с длиной стороны a . Известен прогиб пластинки, моделирующий кручение [8], в виде узловых перемещений по координате, нормальной к поверхности пластинки (см. рис. 1). Были использованы возможности конечно-элементного программного комплекса MSC.Marc вводить нестандартные модели материалов путем программирования пользовательских процедур, и на их основе построены программы, реализующие закон изменения характеристик материала (2).

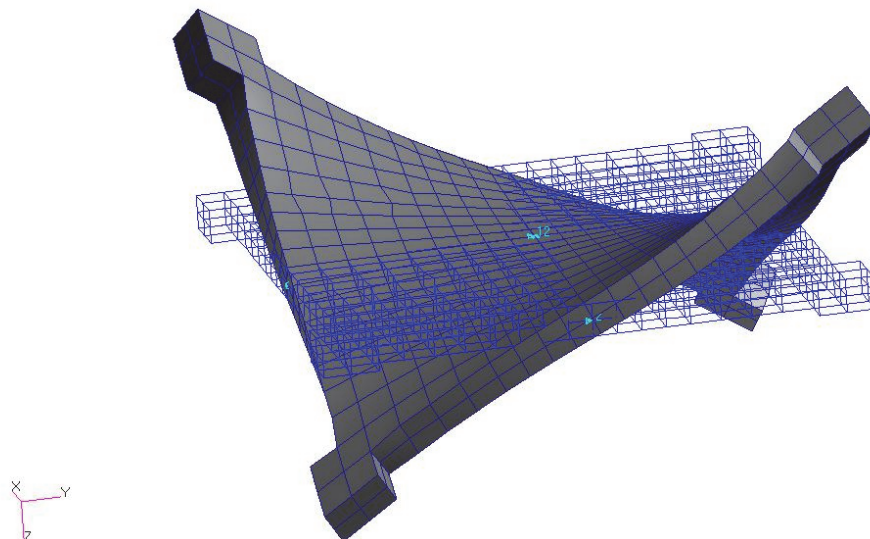


Рис. 1. Заданная конфигурация пластины после кинематического деформирования

На основании расчётов деформирования и разгрузки для материала в исходном состоянии и при (2) можно обнаружить заметные различия значений напряжений и остаточных перемещений u_z в направлении нормали к исходной поверхности пластинки (см. табл. 1).

Таблица 1

Наибольшие значения эффективного напряжения σ_e , возникающие на упреждающем контуре и после разгрузки, наибольшие значения остаточных перемещений для разных характеристик материалов

Материал	Напряжения на упреждающем контуре σ_e , кг/мм ²	Остаточные напряжения σ_e , кг/мм ²	Остаточные перемещения u_z , мм
В95очТФ	52,1	58,2	64,4
(2)	17,1	30	66,7

В табл. 1 эффективное напряжение определяется по формуле

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2}{2} + 3(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)}.$$

Из табл. 1 видно, что максимальные напряжения в заготовке с данной эволюцией деформационных свойств в три раза меньше, чем без учёта их изменения. Для данной пластинки проведён сравнительный расчёт обратной задачи формообразования итерационным методом [2; 4]. Обратная задача изгиба пластины в ползучести формулируется в следующем виде [25]: какие прогибы при $0 < t < T$ нужно сообщать пластине, чтобы в момент снятия внешних нагрузок при $t = T$ получить заданные значения остаточных прогибов?

Итерационный метод представляется в виде

$$u_z^{k+1} = u_z^k + \alpha(\tilde{u}_z^* - \tilde{u}_z^k),$$

где \tilde{u}_z^* – заданные остаточные перемещения в направлении нормали к исходной пластинке; u_z^k – перемещения на k -й итерации, которые задаются в качестве граничных условий;

\tilde{u}_z^k – остаточные перемещения, полученные в результате разгрузки пластинки; α – коэффициент ($0 < \alpha < 2$) [4].

В результате расчётов обратной задачи формообразования пластинки можно обнаружить разницу в величинах напряжений и перемещений (см. табл. 2).

Таблица 2

Наибольшие значения эффективного напряжения σ_e , возникающие на упреждающем контуре, и наибольшие значения перемещений для разных характеристик материалов

Материал	Напряжения на упреждающем контуре σ_e , кг/мм ²	Перемещения до упреждающего контура u_z , мм	Остаточные перемещения u_z , мм
В95очТФ	53,2	73,5	69,1
(2)	17,4	71,4	69,1

Из табл. 2 также видно, максимальные упреждающие перемещения для заготовки, в которой учитывалось данное изменение свойств, уменьшились незначительно.

Рассмотрим расчёт крыловой панели [2]. Заготовка имеет нерегулярные контур и толщину, длина изменяется в диапазоне 13 000...13 500 мм, ширина – 250...1600 мм, толщина – 2,5...10,0 мм, внешняя лицевая сторона гладкая, внутренняя имеет нерегулярную гравюру с продольными и поперечными рёбрами жёсткости, локальными и контурными утонениями и утолщениями.

Неравномерная конечно-элементная сетка формировалась четырёхузловыми тетраэдральными элементами с трилинейной интерполяцией геометрии заготовки и перемещений. Для обеспечения достаточной точности расчёта расстояние между узлами принималось приближённо равным 2 мм, общее число элементов составляло 466 229. В качестве критерия окончания расчёта задавались погрешности $\varepsilon_D = \varepsilon_F = 0,01$. Начальный шаг по времени составлял 0,01. Расчётная схема с указанием закреплений представлена на рис. 2.

Приложение перемещений по итерационному методу для k -й итерации моделирует упругопластический подвод гладкой лицевой стороны «холодной» (температура около 20 °С, предел текучести $\sigma_0 = 51 \text{ ед}/\text{мм}^2$, модуль линейного упрочнения $E_T = 145,3 \text{ ед}/\text{мм}^2$) заготовки к рабочим поверхностям штампов. Затем проводится в течение 10 ч релаксация напряжений в условиях ползучести заготовки при повышенной постоянной температуре ($T = 165 \text{ °С}$) и приложенных к гладкой поверхности компонентах перемещений u_y , которые моделируют термофиксацию «горячей» заготовки на штамповой оснастке. Остаточная конфигурация получается после упругой разгрузки (пружинения) заготовки из предыдущего состояния. Эта разгрузка моделирует освобождение остывшей заготовки от штампов.

На рис. 3, 4 представлено распределение эффективного напряжения в заготовке на рабочей поверхности штамповой оснастки после релаксации для материала В95очТФ и (2) соответственно. В результате расчётов обратной задачи формообразования панели обнаруживаются отличия от упреждающей формы (см. табл. 3).

Таблица 3

Наибольшие значения эффективного напряжения σ_e , возникающие на упреждающем контуре, и наибольшие значения перемещений для разных характеристик материалов

Материал	Напряжения на упреждающем контуре после релаксации σ_e , кг/мм ²	Перемещения до упреждающего контура u_y , мм	Отклонения остаточных перемещений u_y , мм
В95очТФ	27,3	385	0,513
(2)	11,3	709	10,9

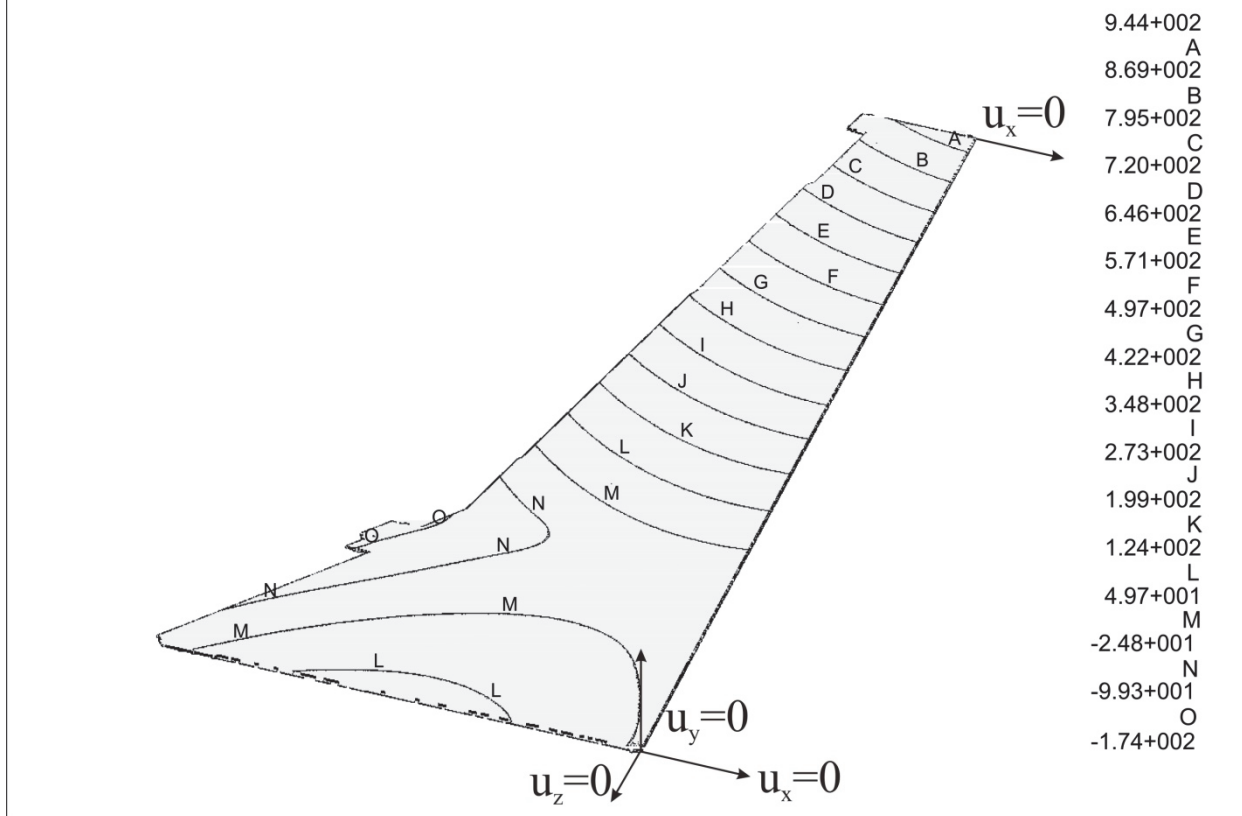


Рис. 2. Расчётная схема задачи о формообразовании панели в режиме термофиксации с полем упреждающих перемещений u_y

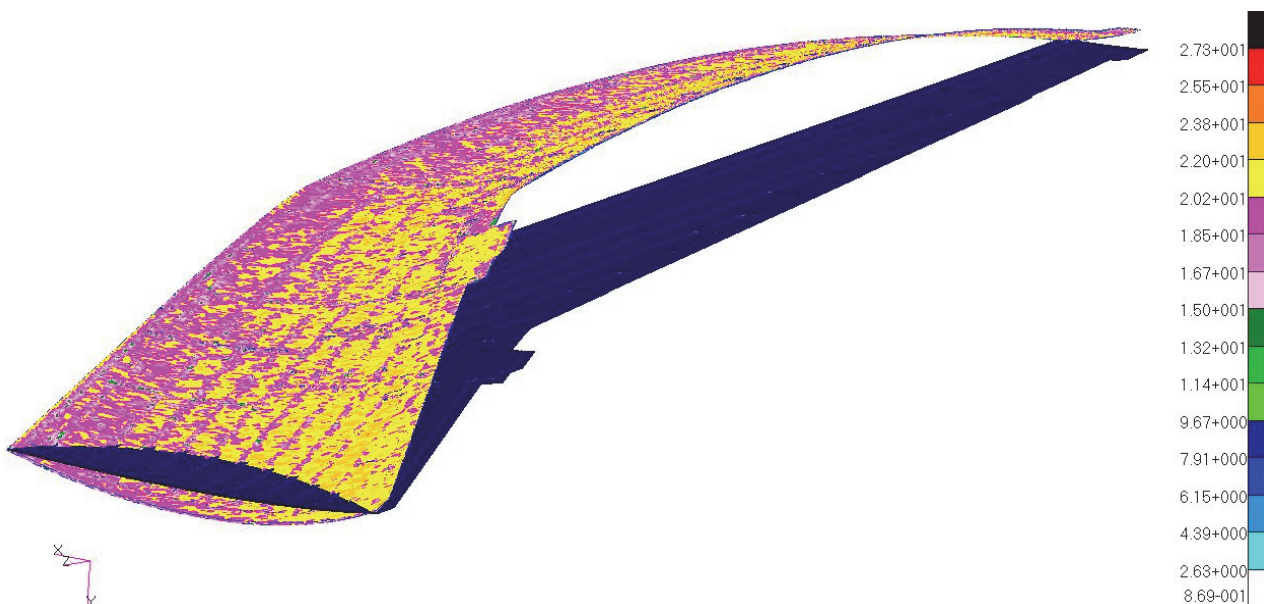


Рис. 3. Распределение эффективного напряжения в заготовке на рабочей поверхности штамповой оснастки для материала B950чТФ



Рис. 4. Распределение эффективного напряжения в заготовке на рабочей поверхности штамповой оснастки для материала по (2)

В результате рассмотрения обратных задач моделирования формообразования панелей двойной кривизны в режиме термофиксации при деформационном старении с учётом изменения деформационных свойств установлены значительные уменьшения максимальных напряжений в заготовке и увеличение упреждающих перемещений. Данный вывод учитывается при постановке серийного формообразования крыловых панелей с использованием эффектов ползучести и деформационного старения в условиях «КнААЗ» филиала ПАО «Компания «Сухой». Вариационная формулировка задачи формообразования и итерационный метод применяются также для определения упреждающей кривизны рёбер жёсткости при клёпке [14].

ЛИТЕРАТУРА

1. А.с. № 933790 СССР, С22F 1 / 04, С 21 D 9 / 46. Способ формообразования деталей из высокопрочных алюминиевых сплавов / Г. А. Раевская, О. В. Соснин, И. П. Поспелов, Б. В. Горев [и др.] – Пр-т 12.11.80.; Бюл. изобрет. – 1982. – № 21. – 122 с.
2. Аннин, Б. Д. Моделирование процессов формообразования панелей крыла самолета SSJ-100 / Б. Д. Аннин, А. И. Олейников, К. С. Бормотин // ПМТФ. – 2010. – Т. 51. – № 4. – С. 155-165.
3. Баакашвили, В. С. Исследование сопротивления деформации методами теории наследственности / В. С. Баакашвили, А. А. Поздеев, В. И. Тарновский // Сообщения АН Груз. ССР. – 1962. – Т. 19. – № 3. – С. 269-274.
4. Бормотин, К. С. Итеративный метод решения геометрически нелинейных обратных задач формообразования элементов конструкций в режиме ползучести / К. С. Бормотин // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2013. – Том 53. – № 12. – С. 145-153.
5. Горев, Б. В. К вопросу об использовании ползучести в технологии формирования изделий / Б. В. Горев, Г. А. Раевская, О. В. Соснин // Динамика сплош. среды. Новосибирск, ИГ СОАН СССР. – 1977. – Т. 38. – Вып. 30. – С. 141-145.
6. К вопросу обработки материалов давлением в режиме ползучести / Б. В. Горев, И. Д. Клопотов, Г. А. Раевская, О. В. Соснин // ПМТФ. – 1980. – № 5. – С. 185-191.
7. Копыский, Б. Д. Применение явления ползучести при обработке давлением / Б. Д. Копыский // Вестник машиностроения. – 1997. – № 9. – С. 76-78.
8. Математическое моделирование процессов ползучести металлических изделий из материалов, имеющих разные свойства при растяжении и сжатии / С. Н. Коробейников, А. И. Олейников, Б. В. Горев, К. С. Бормотин // Вычислительные методы и программирование. – 2008. – Т. 9. – С. 346-365.
9. Коробейников, С. Н. Нелинейное деформирование твёрдых тел / С. Н. Коробейников. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000.
10. Малинин, Н. Н. Ползучесть в обработке металлов / Н. Н. Малинин. – М.: Машиностроение, 1986. – 225 с.

11. Малинин, Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н.Н. Малинин. – М.: Машиностроение, 1968. – 400 с.
12. Малинин, Н. Н. Технологические задачи теории ползучести / Н. Н. Малинин // Тез. докл. на III съезде по теор. и прикл. механике. – М., 1968. – С. 203.
13. Олейников, А. И. Математическое моделирование анизотропной ползучести металлов при деформационном старении / А. И. Олейников // Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике: тез. докл. – Новосибирск: ИГиЛ СО РАН, 2010. – С. 139-140.
14. Олейников, А. И. Моделирование и расчёт процесса клёпки панелей / А. И. Олейников, К. С. Бормотин, А. М. Ноговицын // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2013. – № II-1(14). – С. 41-48.
15. Применение теории ползучести при обработке металлов давлением / А. А. Поздеев, В. И. Тарновский, В. И. Еремеев, В. С. Баакашвили. – М.: Metallurgy, 1973. – 192 с.
16. Работнов, Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций / Ю. Н. Работнов. – М.: Наука, 1966. – 752 с.
17. Раевская, Г. А. Термомеханическая обработка сплава АК4-1 / Г. А. Раевская, О. В. Соснин // Наука – производству: докл. науч.-практ. конф. – Новосибирск, 1974. – Ч. 4. – С. 106-109.
18. Романов, К. И. Механика горячего формоизменения металлов / К. И. Романов. – М.: Машиностроение, 1993. – 241 с.
19. Соснин, О. В. К вопросу обработки материалов давлением в медленных температурно-скоростных режимах деформирования / О. В. Соснин, Б. В. Горев // Тр. IX конференции по прочности и пластичности. – М., 1996. – С. 94.
20. Соснин, О. В. Обработка материалов давлением при медленных режимах деформирования / О. В. Соснин, Б. В. Горев, Г. А. Раевская // Новые материалы и технологии. Теория и практика упрочнения материалов в экстремальных условиях. – Новосибирск: Наука, 1992. – С. 168-181.
21. Обработка металлов давлением в режиме ползучести и сверхпластичности / О. В. Соснин, Б. В. Горев, Г. А. Раевская, А. А. Ратничкин // Изв. СО АН СССР. – 1987. – № 11. – Сер. техн. наук. Вып. 3. – С. 98-105.
22. Соснин, О. В. Ползучесть в обработке металлов давлением / О. В. Соснин, Б. В. Горев, И. В. Любашевская // Математическое моделирование систем и процессов: межвуз. сб. науч. тр. Перм. гос. техн. ун-т. Пермь. – 2001. – № 9. – С. 169-176.
23. Формообразование подкреплённых панелей двойной кривизны в режиме ползучести / И. В. Сухоруков, Б. В. Горев, И. Д. Клопотов, С. Н. Веричев // Тр. XVI Междунар. конф. по теории пластин и оболочек, Нижний Новгород. – 1994. – Т. 3. – С. 199-207.
24. Фридляндер, И. Н. Высокопрочные сплавы системы Al-Zn-Mg-Cu / И. Н. Фридляндер, О. Г. Сенаторова, Е. А. Ткаченко // Энциклопедия. Машиностроение. Т. II-3. Цветные металлы и сплавы. – М.: Машиностроение, 2001. – С. 94-128.
25. Цвелодуб, И. Ю. Постулат устойчивости и его приложения в теории ползучести металлических материалов / И. Ю. Цвелодуб. – Новосибирск: Институт гидродинамики СО АН СССР, 1991. – 202 с.
26. Adachi, T. Age Forming Technology for Aircraft Wing Skin / T. Adachi, S. Kimura, T. Nagayama, H. Takehisa, M. Shimanuki // MATERIALS FORUM. – 2004. – Vol. 28. – P. 202-207.
27. Bakavos, D. Microstructural Interactions During Stress Ageing a 7475 Aerospace Alloy / D. Bakavos, P. B. Pragnell, B. Bes, F. Ebert, J. G. Grossmann // Proc. of ICAA-10. – 2006. – P. 333-338.
28. Hambrick, D. M. Age Forming Technology Expanded in an Autoclave / D. M. Hambrick // General Aviation Aircraft Meeting and Exposition. – April 1985.
29. Holman, M. C. Autoclave Age Forming Large Aluminium Aircraft Panels / M. C. Holman // Journal Mechanical Working Technology. – 1989. – № 20. – P. 477-488.

Хейн Вин Зо
Hein Win Zaw

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ И ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ МЕТОДОМ ОБЖИМА И РАЗДАЧИ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК

PROCESS ANALYSIS AND TEMPERATURE&POWER ENHANCEMENT OF AIR-CRAFT PARTS MANUFACTURING BY THE METHODS OF CRIMPING AND ROUND BILLET EXPANDING



Хейн Вин Зо – кандидат технических наук, кафедры «Технология производства летательных аппаратов» «МАТИ» – Российский государственный технологический университет им. К.Э. Циолковского (Россия, Москва); 121552, г. Москва, ул. Оршанская, д. 3; 89853101319. E-mail: taryar4ever@gmail.com

Mr. Hein Win Zaw – PhD in Engineering, Department of Aircraft Production Engineering, Konstantin Tsiolkovsky Russian State Technological University; 3, Orshanskaya Ave., Moscow, 121552, Russia; telephone: +7 (985) 3101319.

E-mail: taryar4ever@gmail.com

Аннотация. В работе приведен анализ деталей летательных аппаратов, получаемых при помощи обжима и раздачи трубных заготовок, а также рассматриваются методы и способы совершенствования технологических процессов изготовления за счет температурной и силовой интенсификации.

Abstract. The paper analyzes aircraft components produced by crimping and round billet expanding; and discusses the methods and ways to improve the manufacturing processes due to temperature and power enhancement.

Ключевые слова: трубные заготовки, ротационный обжим, локальные деформации, температурная и силовая интенсификация.

Key words: round billets, rotary crimping, local deformations, temperature and power enhancement.

УДК 621.7.04

Важнейшей проблемой современного производства летательных аппаратов является увеличение производительности труда, повышение эффективности производства и качества конечного продукта за счет интенсификации существующих и разработки новых технологических процессов. Особое внимание в этой проблеме отводится повышению эффективности использования процессов листовой штамповки, различными методами которой изготавливается до 75 % деталей планера самолета. Повышаются требования к качеству отдельных деталей, к их весовым характеристикам, что в конечном итоге влияет на массу конечного изделия.

Решение проблемы повышения качества изделия возможно только путем повышения эффективности производства 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.

В гидрогазовых системах современных летательных аппаратах применяются тонкостенные конструкции, получаемые из трубных заготовок (см. рис. 1). К ним относятся: баллоны, обтекатели, корпусные детали с криволинейной образующей, переходники, компенсаторы, тяги управления, а также детали внутреннего набора гидрогазовых систем.

В производстве эти детали получают при помощи вытяжки на прессах в жестких штампах, гидроформовкой, формовкой эластичными и эластосыпучими средами, импульсными методами штамповки, токарно-давилной обработкой сварных заготовок, ротационной вытяжкой, методами обжима и раздачи трубных заготовок (см. табл. 1) и др.

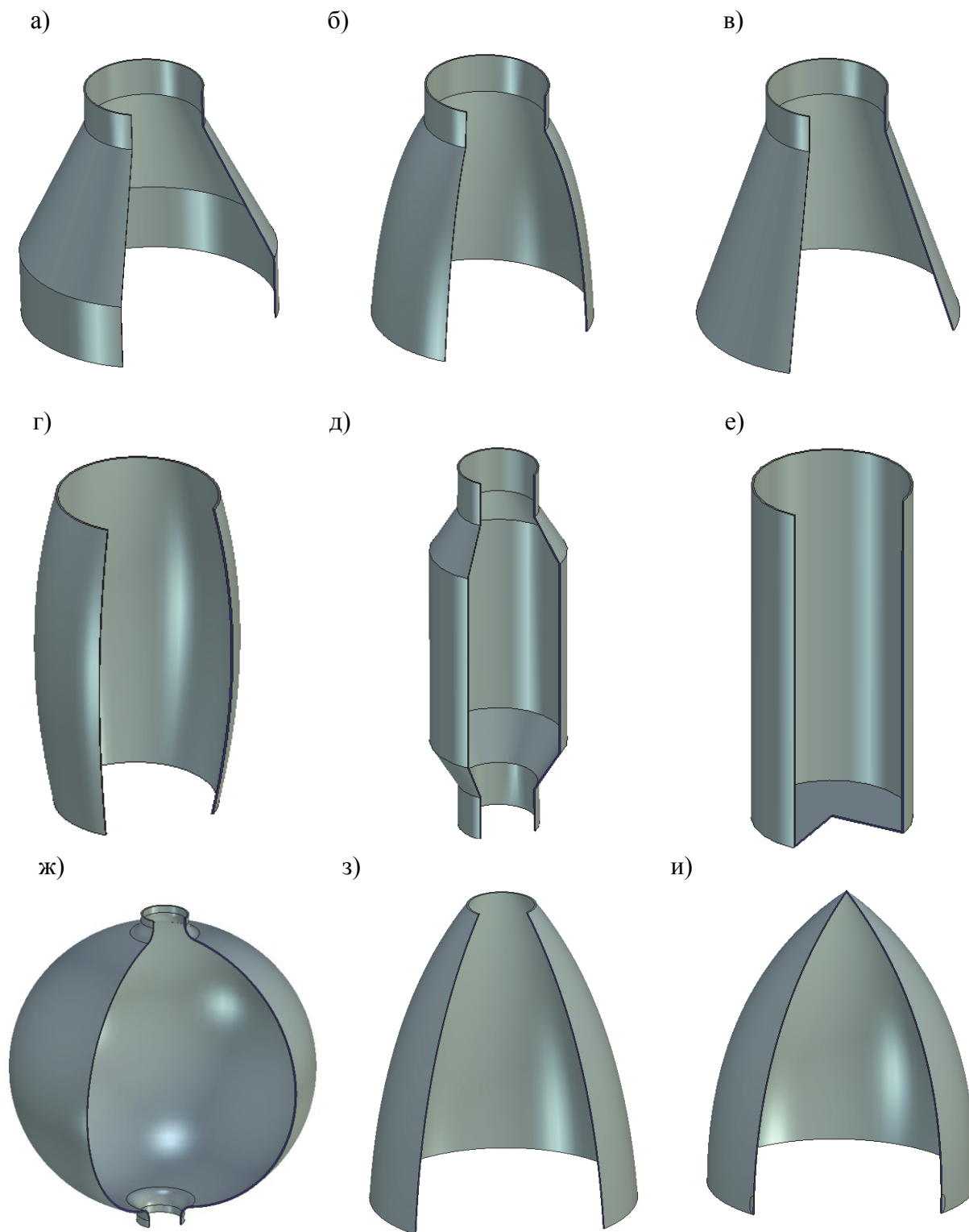
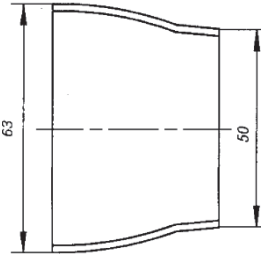
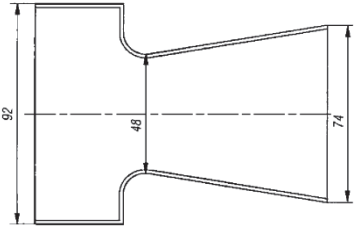
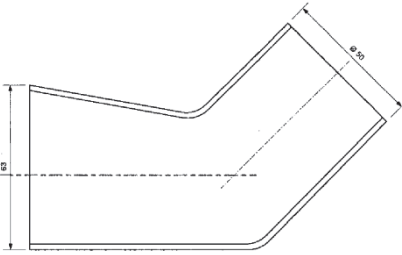
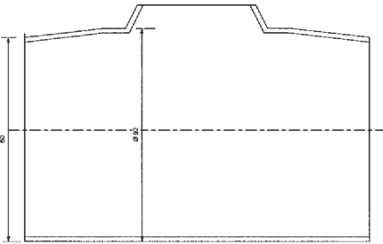
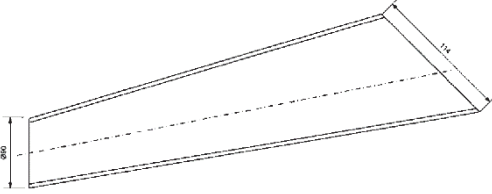


Рис. 1. Формы деталей, получаемых методом раздачи и обжима:
 а, б, в – детали типа переходники; г – деталь типа корпус; д – тяга управления;
 е – емкость с дном; ж – шар-баллон; з, и – обтекатели различного типа

Таблица 1

Некоторые детали самолета, получаемые обжимом и раздачей

Наименование детали	Эскиз детали	Материал
1. Переходник		12X18H10T
2. Датчик Вентури		АК-4-1
3. Полупатрубок системы расхода воздуха		12X18H10T
4. Полупатрубок системы отбора воздуха		12X18H10T
5. Труба системы отбора		АМг6М АМг3М

Процессы обжима и раздачи труб ротационными методами заключаются в изменении диаметра трубы с помощью ролика, который непосредственно контактирует с вращающейся заготовкой (см. рис. 2). Данный процесс используется для труб относительно небольших размеров. При этом возможно формоизменение как концевых участков труб, так и средней части. Возможно получение радиальных гофров. Процесс можно выполнить с нагревом заготовки.

Негативные и ограничивающие факторы процесса заключаются в том, что в случае процесса раздачи возможно разрушение заготовки в зоне максимального утонения, в случае обжима возможна потеря устойчивости.

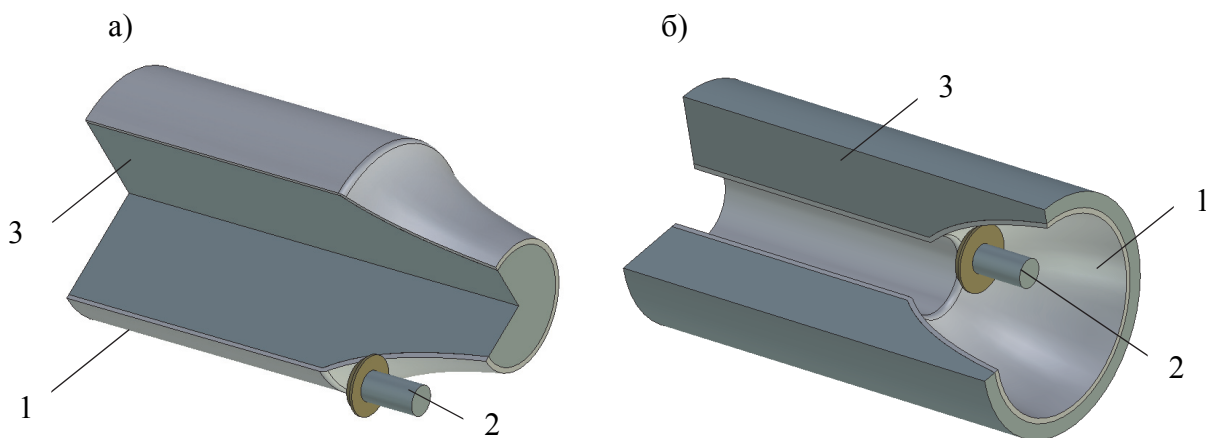


Рис. 2. Ротационный обжим (а) и раздача (б) трубных заготовок
1 – трубная заготовка, 2 – давящий ролик, 3 – жесткий пуансон (матрица)

При изготовлении вышеперечисленных трубчатых деталей более предпочтительно использование метода раскатки, чем применение раздачи, развальцовки и др. В особенности это относится к получению раструбов на концевых участках (см. рис.3). С помощью раскатки можно получить большую степень деформации без потери устойчивости и разрушений за счет повышения пластических свойств материала под действием сжимающих напряжений.

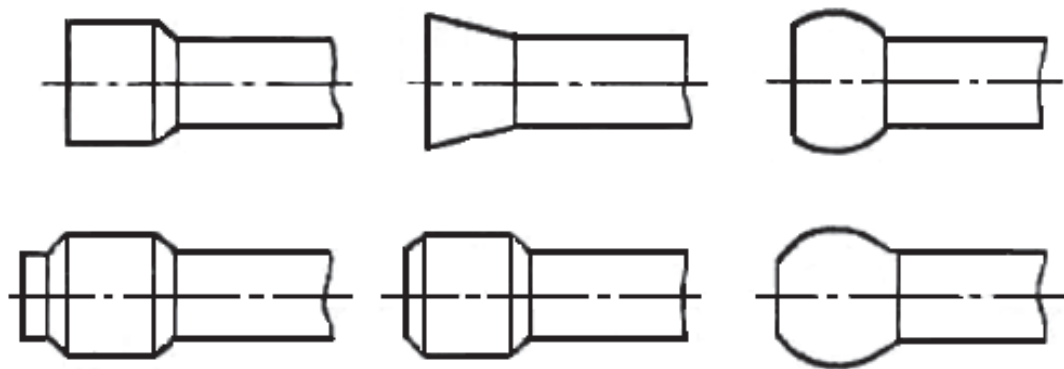


Рис. 3. Детали, получаемые раскаткой

Процессы обжима и раздачи достаточно широко применяются в авиа- и ракетостроении. Следует отметить, что часть этих процессов выполняется с помощью ротационных машин и токарно-давяльных станков.

Обжим труб на ротационных станках или редуцирование заключается в следующем. Сначала труба помещается в объемную матрицу. Матрица состоит из двух половинок, которые ударяют по заготовке в процессе возвратно-поступательных движений. Каждый удар сопровождается пластической деформацией заготовки. Для создания возвратно-поступательного движения используется центробежная сила, которая отбрасывает половинки матрицы от оси вращения по направляющим, возврат происходит за счет соударения с роликами (см. рис. 4). Частота обработки составляет для заготовок диаметром 7...17 мм – 6000 ударов в минуту, до 7 мм – свыше 11000 ударов в минуту.

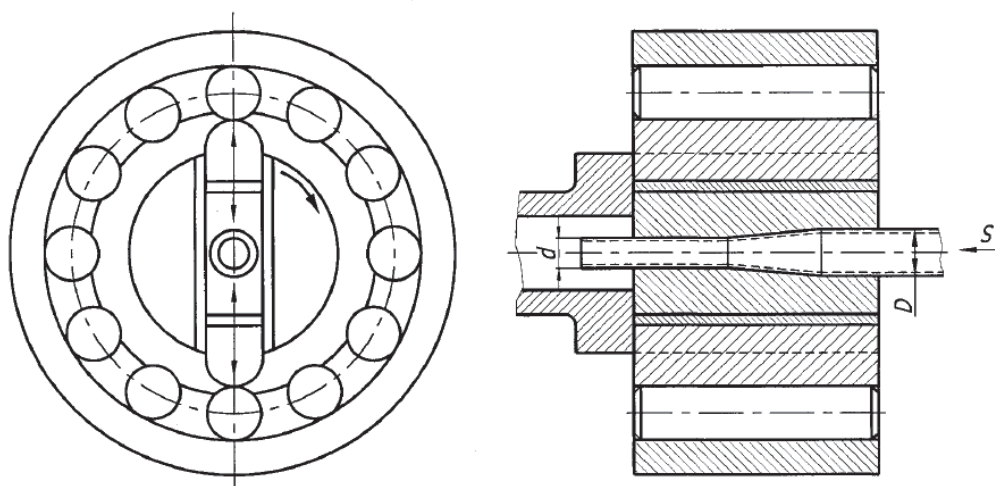


Рис. 4. Схема обжима при помощи ротационной машины

Формообразование труб можно проводить двумя способами. Первый способ – свободный обжим (см. рис.5, а), а второй – с внутренним вкладышем (см. рис. 5, б). В случае свободного обжима форма матрицы на участке обжима (сомкнутая часть) определяет наружный диаметр и другие параметры формируемой трубы. Что касается внутренних размеров, то они зависят от механизма деформирования. Для выдерживания диаметра внутренней обжатой части необходима дополнительная операция разделки. В случае проведения операции с вкладышем внутренний диаметр определяется диаметром вкладыша. При этом вкладыш может иметь не только цилиндрическую форму (см. рис 5, б), но и более сложную (коническую, профильную и т.д.)

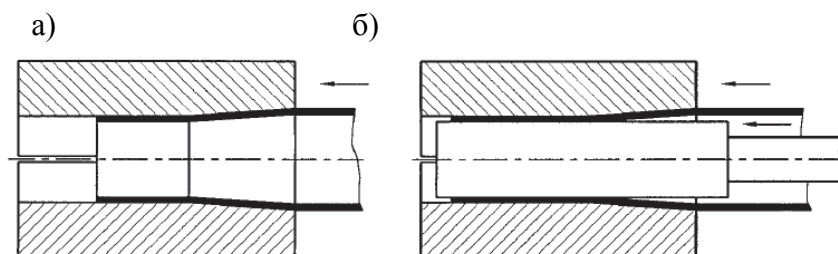


Рис. 5. Формообразование трубных заготовок методом свободного обжатия (а) и при помощи вкладыша (б)

Сдерживающим фактором широкого применения данного процесса в производстве является то, что в результате холодной деформации происходит упрочнение металла. Поэтому при значительном формоизменении применяют промежуточные термические обработки для снятия упрочнения. В зависимости от пластичности материала заготовки коэффициент обжима может составлять 1,25...1,40.

В мелкосерийном производстве также применяется обжим на токарно-давильных станках, поскольку позволяет снизить объем затрат на предварительную подготовку производства (см. рис.6).

Суть метода заключается в том, что давильные операции совмещаются с вращением заготовки. Деформация идет по контуру матрицы при помощи деформирующего ролика (давильника), что приводит к появлению локального очага деформации. Данный способ успешно применяется для формообразования труб из труднодеформируемых и тугоплавких сплавов.

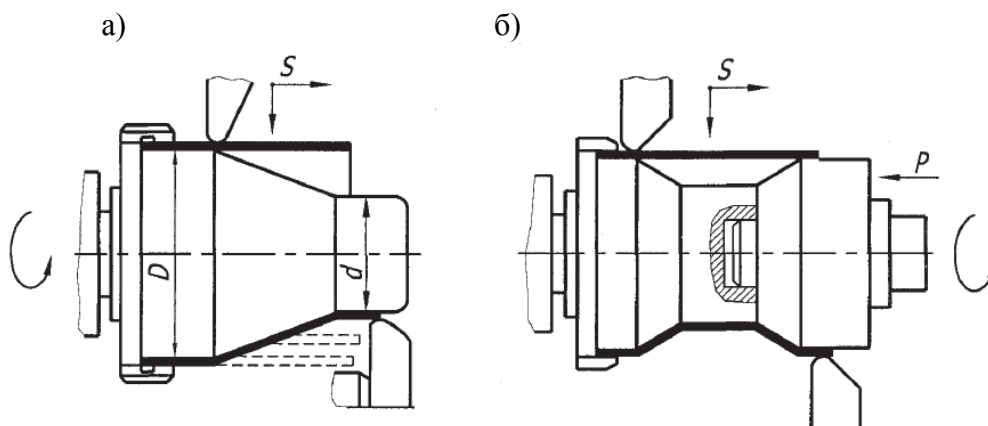


Рис. 6. Использование токарно-давилочного станка при обжиге с одним конусом (а), двойным конусом (б)

При помощи токарно-давилочного станка можно получать детали типа «воронки», детали с двойным конусом. Деформирующие ролики перемещаются по траектории дуги окружности при помощи поворотного суппорта.

Негативным фактором данного процесса является то, что в зоне деформации материал заготовки значительно утоняется и наклепывается. В связи с этими явлениями прибегают к промежуточному отжигу, а сам процесс происходит в несколько этапов.

Другим недостатком является то, что если процесс не автоматизирован, то он характеризуется относительно невысокой производительностью и высокими требованиями к опыту рабочего.

При помощи накатных станков (см. рис. 7) можно получить гофры на полых изделиях. Процесс осуществляется при помощи специального шнека и патрона с роликами.

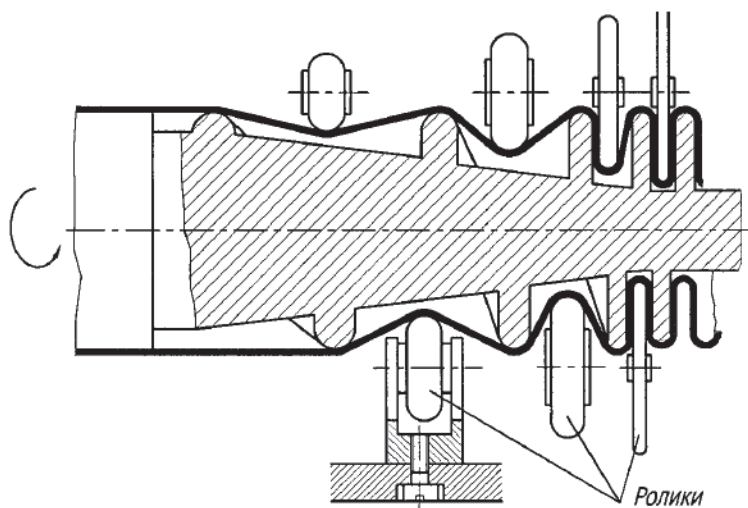


Рис. 7. Накатный станок

Перечисленные выше способы характеризуются типовыми недостатками, связанными либо с упрочнением и утонением в зоне холодной деформации, либо с большими локальными деформациями в зоне соприкосновения деформирующего инструмента. Это приводит к появлению проблем, связанных, с одной стороны, с потерей устойчивости, с другой, с разрушением деталей в зоне деформации, что в значительной степени сдерживает применение данных процессов, требует проведения их в несколько этапов и в конечном итоге делает их малоэффективными.

Данные проблемы могут быть решены за счет совершенствования имеющихся технологических процессов, а также за счет разработки новых. При этом в совершенствовании текущих процессов можно выделить два пути. Первый связан с температурной интенсификацией (изотермический или дифференцированный нагрев материала заготовки) и силовой интенсификацией (дополнительная нагрузка к заготовке). Но наиболее эффективно совместное их применение, т.е. температурно-силовая интенсификация.

Температурное воздействие (дополнительный нагрев) позволяет в большинстве процессов формообразования регулировать толщину стенки, а также повышать коэффициенты обжима и раздачи.

Силовое воздействие заключается в распределении локальных деформаций при критических степенях деформирования по всему очагу деформации. Совмещение этого процесса с температурным нагревом приводит к расширению предельных степеней формоизменения. Также к силовому способу можно отнести подпор заготовки в процессе раздачи.

При этом необходимо отметить, что проблема потери устойчивости полностью не решена, особенно при обжиме и раздаче трубных заготовок переменной толщины.

Рассмотренные способы формообразования трубчатых заготовок позволяют перейти к следующим выводам:

1. В производстве гидрогазовых систем летательных аппаратов широко применяются процессы обжима и раздачи трубных заготовок.

2. Процессы ротационного обжима и раздачи трубных заготовок применяются для деталей типа баллоны, обтекатели, корпусные детали с криволинейной образующей, переходники, компенсаторы, а также детали внутреннего набора гидрогазовых систем.

3. Основные способы интенсификации процессов обжима и раздачи концевой части трубной заготовки – дифференцируемый нагрев материала заготовки, поэтапное деформирование при распределении локальных деформаций по всему очагу деформации.

4. Проблема потери устойчивости заготовки приводит к ограничению возможности формообразования и требует дополнительных доводочных операций. Также это ограничивает возможность регулировать толщины стенок. В комплексе данные проблемы приводят к повышению трудоемкости, низкому коэффициенту использования материала и к повышению массы готовых изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хейн Вин Зо. Экспериментальные исследования внеконтактной деформации при раскатке труб/ Хейн Вин Зо // Интернет-журнал "Науковедение": электронное научно-техническое издание. – 2014. № 1 (20) январь-февраль. Идентификационный номер статьи в журнале: 87TVN114, <http://naukovedenie.ru>.
2. Шпорт, Р. В. Интенсификация процессов обжима и раздачи трубных заготовок при изготовлении тонкостенных деталей летательных аппаратов / Р. В. Шпорт, К. А. Макаров // Научные труды МАТИ. Выпуск 14 (86). – М.: ИЦ МАТИ, 2009. – С.132-136.

Зайков В. И., Крупский М. Р.
V. I. Zaykov, M. R. Krupsky

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УГЛОВОЙ РАСХОДИМОСТИ ДИФРАКЦИОННО-ОГРАНИЧЕННОГО ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА

A METHOD FOR THE ASSESSMENT OF THE DIFFRACTION-LIMITED LASER BEAM'S ANGULAR DIVERGENCE



Зайков Валерий Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление недвижимостью и кадастры» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Комсомольск-на-Амуре, ул. Котовского, д. 8, кв. 17.
E-mail: valerii_zaykov@mail.ru.

Mr. Valery I. Zaykov – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Real Estate Management and Cadastre, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, 8-17, Kotovskogo Str., Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia. E-mail:

valerii_zaykov@mail.ru



Крупский Максим Романович – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681023, Комсомольск-на-Амуре, ул. Юбилейная 9, кор. 3, кв. 122. E-mail: max_krupskiy@rambler.ru.

Mr. Maxim R. Krupsky – PhD Student, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, 9/3-122, Yubileynaya Str., Komsomolsk-on-Amur, 681023, Russia. E-mail : max_krupskiy@rambler.ru

Аннотация. Разработана методика оценки угловой расходимости дифракционно-ограниченного лазерного пучка, представлено теоретическое обоснование, и выполнена обработка результатов исследования.

Abstract. We propose a method for determining the angular divergence of the diffraction-limited laser beam, we set forth theoretical grounds for this and offer the results of data processing.

Ключевые слова: лазерный пучок, дифракционное ограничение, угловая расходимость, интерференционная структура.

Key words: laser beam, diffraction limit, spatial parameters, angular divergence, interference structure.

УДК 535.8:621.373.8

Постановка задачи

Методы аналитического исследования амплитудно-фазового преобразования электромагнитного поля в поперечном сечении коллимированного лазерного пучка интерференционной структуры, анализ которых достаточно полно представлен в [1], обычно предполагают использование модели абберационного лазерного излучателя, который по своему функциональному назначению эквивалентен действию реальной оптической системы. В физическом смысле модель абберационного лазерного излучателя должна представлять собой совокупность элементарных когерентных источников монохроматического излучения, расположенных в каждой точке поверхности волнового фронта, которая образуется сразу за последней преломляющей сферической поверхностью оптической системы. Таким образом, исходное пространственное положение абберационного лазерного излучателя следует рассматривать в плоскости апертуры выходного элемента оптической системы, а поперечные

размеры его поля излучения будут соответствовать диаметру выходного элемента. Аберрационные свойства такого лазерного излучателя будут определяться характером искажений поверхности волнового фронта.

Фотометрический анализ изображений поперечного сечения протяжённого лазерного пучка, представленный в [2], позволяет утверждать, что рассматриваемая поверхность волнового фронта не является сферической, а обладает переменным по величине радиусом кривизны.

В этом случае формирование интерференционного поля в плоскости поперечного сечения протяжённого лазерного пучка будет осуществляться за счёт суперпозиции монохроматического когерентного излучения элементарных когерентных источников с поверхности волнового фронта аберрационного лазерного излучателя. При этом направление распространения излучения от этих элементарных источников в виде монохроматических волн относительно оси лазерного пучка должно совпадать с направлением нормали к поверхности волнового фронта в данной точке и определяется функцией $\sigma'_i = f(h'_i)$ – углом наклона нормали к оси преобразованного лазерного пучка интерференционной структуры (h'_i – величина радиального расположения точки пересечения нормали с поверхностью волнового фронта относительно оси лазерного пучка).

Цель настоящей работы состоит в экспериментальном исследовании зависимости между высотой элементарного светового луча в плоскости выходного зрачка, направлением его дальнейшего распространения и углом наклона к оптической оси. Для выполнения такого рода исследования разработана экспериментальная установка, принципиальная схема которой показана на рис. 1. В качестве источника излучения использован полупроводниковый лазер инжекционного типа (модель DLDPM12-655-25) с угловой расходимостью в диапазоне $40 \dots 60^\circ$. Генерация излучения у данного типа полупроводниковых лазеров осуществляется в непрерывном одномодовом режиме на длине волны $\lambda = 0,655$ мкм. Мощность излучения при оптимальном токе инжекции составляет 25 мВт. Формирование лазерного пучка осуществлялось при помощи одиночной плосковыпуклой линзы с фокусным расстоянием, равным $f = 60$ мм, и относительным отверстием $D_\varepsilon / f' = 1/3$. В соответствии со схемой, представленной на рис. 1, выпуклая поверхность линзы установлена в направлении падающего лазерного пучка, а его ограничение осуществляется на световом диаметре линзы $D_\varepsilon = 2\lambda$ в соотношении $a/w \leq 1,0$.

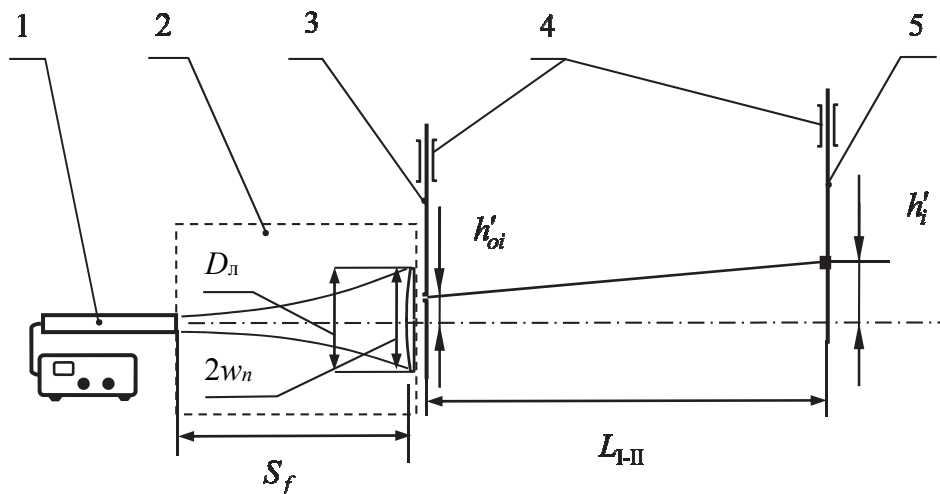


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – полупроводниковый лазер; 2 – аберрационная оптическая система; 3 – экран с диафрагмой; 4 – механизм перемещения экранов с отсчётным устройством; 5 – экран с индексом

В данных условиях влияние волновой аберрации усиливается и в поперечном сечении сформированного лазерного пучка происходит перераспределение интенсивности. При этом ближняя зона (зона дифракции Френеля) характеризуется изменением вида относительного амплитудно-фазового распределения энергии в зависимости от положения плоскости анализа, а в дальней зоне (зона дифракции Фраунгофера) характер амплитудно-фазового распределения энергии остаётся неизменным.

В дальней зоне такое распределение интенсивности носит явно выраженный интерференционный характер и реализуется в виде структуры тёмных и светлых кольцевых полос, радиус которых уменьшается в направлении центра поперечного сечения. В плоскости выходного зрачка оптической системы установлен экран I с диафрагмой $\phi = 0,5$ мм. На расстоянии L_{I-II} от плоскости экрана I установлен экран II с индексом на поверхности. Экраны I и II снабжены механизмами перемещения и измерительными шкалами.

Методика исследования состоит из последовательного выполнения нескольких контрольно-измерительных операций.

На подготовительном этапе (при отсутствии экрана I) положение индекса на экране II совмещается с центром поперечного сечения лазерного пучка. Затем в плоскости выходного зрачка оптической системы размещается экран I с диафрагмой. При размещении экрана I необходимо установить диафрагму на оси преобразованного лазерного пучка так, чтобы центр светового луча, проходящего через отверстие, попадал в центр индекса на экране II. Этот цикл контрольно-измерительных операций необходим для регистрации исходного расположения центра диафрагмы и индекса на одной оси, совпадающей с осью преобразованного лазерного пучка.

Далее диафрагма на экране I перемещается в меридиональной плоскости выходного зрачка оптической системы с определённым интервалом, что позволяет фиксировать величину h'_{0i} – радиального расположения элементарного светового луча в плоскости выходного зрачка относительно оси лазерного пучка. Затем путём совмещения индекса на плоскости экрана II с центром светового луча, прошедшего сквозь диафрагму на экране I, регистрируется величина h'_i , определяющая его положение в плоскости экрана II относительно оси лазерного пучка.

Угол наклона и направление распространения элементарных световых лучей определяется из выражения

$$\sigma'_i \cong \text{tg } \sigma'_i = \frac{h'_{0i} - h'_i}{L_{I-II}},$$

где L_{I-II} – расстояние между экранами по оси преобразованного лазерного пучка. Результаты экспериментальных исследований в графическом виде представлены на рис. 2.

Изменение угла элементарных световых лучей, формирующих структуру преобразованного лазерного пучка, на рис. 2 представлено в плоскости выходного зрачка оптической системы.

Анализ результатов исследования

Анализ полученных результатов показывает, что изменение исходного значения S_f на величину $\pm \Delta S_f$ в целом не влияет на характер изменения функции $\sigma'_i = f(h'_i)$. Так, в параксиальной области с ростом величины h'_{0i} угол наклона элементарных световых лучей возрастает по абсолютной величине и достигает экстремума. Затем, при дальнейшем увеличении h'_{0i} , угол наклона элементарных световых лучей относительно оси лазерного пучка начинает уменьшаться по абсолютной величине и на определённом расстоянии от оси в плоскости выходного зрачка становится равным нулю.

Экспериментально установлено, что высота h'_{0i} в плоскости выходного зрачка, на которой элементарные световые лучи направлены параллельно оптической оси, соответствует радиусу перетяжки лазерного излучения, преобразованного данным типом абберационной оптической системы.

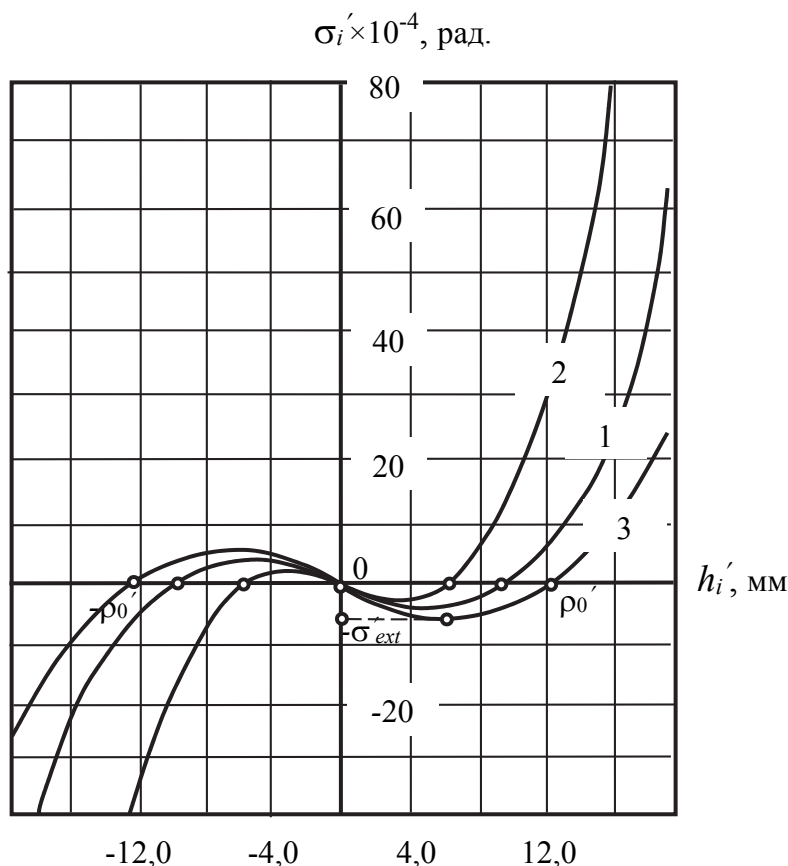


Рис. 2. График функции $\sigma'_i = f(h'_i)$: 1 – при значении S_f , соответствующем исходному состоянию; 2 – при значении $(S_f - \Delta S_f)$; 3 – при значении $(S_f + \Delta S_f)$

В плоскости выходного зрачка оптической системы на участке, где величина h'_{0i} превышает радиус перетяжки лазерного пучка, угол наклона световых лучей начинает возрастать по абсолютной величине, а направление их распространения изменяется на противоположное.

Максимальное значение угла наклона наблюдается в периферийной зоне для краевых лучей. В свою очередь, абсолютное значение экстремума функции $\sigma'_i = f(h'_i)$ при уменьшении величины S_f также несколько увеличивается наряду с изменением пространственных параметров преобразованного лазерного пучка интерференционной структуры. Ширина интерференционных кольцевых полос в поперечном сечении лазерного пучка уменьшается, что можно объяснить увеличением угла схождения элементарных световых лучей.

Характер изменения распределения интенсивности излучения и закономерность формирования интерференционной структуры в ближней и дальней зонах вдоль оси распространения свидетельствует о том, что направление излучения от элементарных когерентных источников вносит определяющий вклад в процесс формирования пространственных параметров протяжённого лазерного пучка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Климков, Ю. М. Прикладная лазерная оптика / Ю. М. Климков. – М.: Машиностроение, 1985. – 128 с.
2. Зайков, В. И. Распределение интенсивности в поперечном сечении коллимированного лазерного пучка при действии волновой абберации и ограничения на выходном зрачке оптической системы / В. И. Зайков, О. В. Башков. – Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2011. – Т. 77. – № 6. – С. 37.

ПИСЬМО В РЕДАКЦИЮ

В редакцию журнала «Ученые записки КНАГТУ на (№1-1(21)2015) поступило письмо от генерального директора ООО «Реверс-Импекс» А.Н. Бортника с претензиями к автору статьи «Решение задачи Стефана для металла, движущегося в охлаждающей среде» Попову Э.И. на совместность полученных результатов.

Редакция журнала направила данное письмо автору статьи Попову Э.И. с просьбой прокомментировать суть претензий и ответить заявителю по существу.

На разъяснения автора статьи Попова Э.И. ООО «Реверс-Импекс» в лице генерального директора Бортника А.Н. ответила своим несогласием на незаконное, по их мнению присвоение себе результатов теоретических исследований.

Редакция журнала доводит до сведения читателей и подписчиков о наличии конфликта, однако считает себя не вправе судить ту или другую сторону (это не является обязанностью редакции), и рекомендует сторонам по существу взаимных претензий и их разрешению обратиться в Арбитражный суд.

Со своей стороны, редакция журнала надеется на то, что наши творческие связи с авторами продолжаться и далее.

С уважением!
Главный редактор журнала
д.т.н., профессор
Шпилев А.М.

Кулинич Ю. М., Кабалык Ю. С., Духовников В. К.
Yu. M. Kulinitch, Yu. S. Kabalyk, V. K. Dukhovnikov

НОВАЯ СТРУКТУРА УСТРОЙСТВА КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

A NEW DESIGN FOR THE REACTIVE POWER COMPENSATOR

Кулинич Юрий Михайлович – доктор технических наук, профессор Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск). E-mail: kulinitsch@rambler.ru.

Mr. Yuri M. Kulinitch – Dr.habil. of Engineering, Professor, the Far East State University of Transport (Russia, Khabarovsk). E-mail: kulinitsch@rambler.ru.

Кабалык Юрий Сергеевич – кандидат технических наук, доцент Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск).. E-mail: uk_box@mail.ru.

Mr. Yuri S. Kabalyk – PhD in Engineering, the Far East State University of Transport (Russia, Khabarovsk). E-mail: uk_box@mail.ru.

Духовников Вячеслав Константинович – кандидат технических наук, доцент Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск). E-mail: slava_dvk@mail.ru.

Mr. Vyacheslav K. Dukhovnikov – PhD in Engineering, the Far East State University of Transport (Russia, Khabarovsk). E-mail: slava_dvk@mail.ru.

Аннотация. Широкое применение в промышленности, быту и в коммерческих целях силового электронного оборудования имеет существенные недостатки, связанные с генерацией ими в первичную энергосистему высших гармоник тока. Среди множества схемных решений активный фильтр (*APF*) является единственным фильтром, который способен одновременно компенсировать как реактивную мощность нагрузки на основной частоте, так и высшие гармонические искажения. В работе рассматривается новый подход к вопросам компенсации реактивной мощности в однофазных цепях с использованием активного фильтра. В основу принципа его управления положено представление об идеальной активной нагрузке в точке общего подключения (*PCC*). Для этого в указанной точке определяется основная гармоника напряжения и заданный ток источника i_{S_ref} в случае полной компенсации реактивной мощности нагрузки. Принцип управления компенсатором заключается в том, что заданный ток компенсатора рассчитывается как разность между током нагрузки и заданным током источника. Для реализации такого алгоритма в компенсаторе используется модуль фазовой автоподстройки (*ASRF*) и математический аппарат прямого и обратного преобразования Парка. Для определения эффективности работы предлагаемой структуры компенсатора выполнено математическое моделирование его работы в среде *MATLAB-Simulink* и представлены результаты моделирования.

Summary. The broad application of power electronic equipment in industry, household and commerce has the essential shortcomings that are connected to the fact that they generate the highest-order current harmonics in the primary power supply system. For the improvement of the consumed current quality, passive LC filters connected in parallel with the nonlinear loading have been conventionally used. However, their rated capacity is calculated only for the nominal load mode, with the change of which efficiency decreases considerably. Besides, a passive compensator is designed for work at the main frequency only, and so the highest current harmonics remain uncompensated. Out of the whole range of circuit designs, the active power filter (*APF*) is the only one which is capable of both compensating the reactive power of load at the main frequency, and the highest harmonious distortions. In the paper, we consider a new approach to the problems of compensating reactive power in single-phase circuits using an active filter. The concept of an ideal active load at the point of common coupling (*PCC*) underlies the principle of the filter's control. For this purpose, we determine the main voltage harmonics and the given source current i_{s_ref} for the case of full compensation of the load's reactive power in a specified point. The principle of controlling the compensator implies that the given current of the compensator is calculated as a difference between the load's current and the given current of the source. To implement the algorithm, there is a auto-adjustable synchronous reference frame (*ASRF*) in the compensator, and the mathematical apparatus of Park and inverse Park transformation. For

determining the overall performance of the suggested compensator design, mathematical modeling of its work is carried out in the *MATLAB-Simulink* environment and the results of the modeling are presented.

Ключевые слова: компенсатор реактивной мощности, активный фильтр (*APF*), вращающаяся система координат (*0-d-q*), точка общего подключения (*PCC*), модуль фазовой автоподстройки (*ASRF*), математическое моделирование.

Key words: reactive power compensator, active filter (*APF*), rotating coordinate system (*0-d-q*), point of common coupling (*PCC*), auto-adjustable synchronous reference frame (*ASRF*), mathematical modeling.

УДК 629.423.1:621.3.025:629.4.016.2

В последние годы рост относительного содержания нелинейных нагрузок в общей установленной мощности потребителей электроэнергии существенно усложнил проблему обеспечения качества потребленной электроэнергии. Применение вентильных электроприводов и других потребителей электроэнергии с несинусоидальными токами приводит к значительному потреблению электрической мощности с искажением питающего напряжения. Традиционно решение этой проблемы осуществлялось посредством применения пассивных фильтров и фильтрокомпенсирующих устройств. Новый Российский ГОСТ 51317.3.2-99 впервые нормирует показатели энергии, связанные не только с напряжением, но и с потребляемым током. Этим стандартом ограничена величина максимально допустимых значений гармоник тока для потребителей с током до 16 А. С другой стороны, широкое развитие силовой и вычислительной электроники позволило по-новому решать вопросы компенсации реактивной мощности. С помощью полностью управляемых силовых *IGBT*-транзисторов и высокопроизводительных микроконтроллеров становится возможной реализация новых алгоритмов управления компенсирующими устройствами, в частности, методами активного управления реактивной мощностью, включая мощность искажения.

В 1984 году Н. Акаги впервые разработана теория мгновенной мощности (*p-q* – теория) [1]. С тех пор эта теория сыграла значительную роль в компенсации реактивной мощности с использованием силовых активных фильтров (*APF*). В соответствии с этой теорией, на входе источника получают синусоидальный и сбалансированный ток с единичным значением коэффициента мощности, а также постоянную мгновенную мощность. При этом в основу теории положен тезис, что напряжение в точке общего подключения (*PCC*) является идеальным: синусоидальным и сбалансированным. При этом применение на практике этой теории связано с некоторыми проблемами: *p-q* – теория разработана только для трехфазной трехпроводной системы; в случае неидеального питающего напряжения такая методика становится неприемлемой, хотя мгновенная мощность источника остается постоянной. В этом случае потребляемый от источника ток не является синусоидальным и сбалансированным.

В отличие от этого, в работе рассматривается новый алгоритм управления активным фильтром при неидеальных условиях эксплуатации, когда напряжение в точке *PCC* является искаженным и несбалансированным. Метод компенсации реактивной мощности основан на понятии идеальной заданной нагрузки [2]. На рис. 1 показана схема параллельного подключения компенсатора *K* к нелинейной нагрузке *LOAD*.

Резистор R_s и индуктивность L_s определяют внутренние параметры источника напряжения V_s . Место соединения компенсатора и нагрузки получило название точки общего подключения (*Point of Common Coupling*) или *PCC*. В случае полной компенсации реактивной мощности нагрузки, сопротивление схемы в точке *PCC* со стороны источника питания V_s представляет собой идеальную заданную нагрузку, которая для однофазной сети является резистивной и линейной. Это означает, что потребляемый от источника V_s ток i_s является синусоидальным и синфазным с напряжением V_s . В этом случае в точке общего подключения будет выполняться следующее соотношение:

$$v_{PCC} = R_e \cdot i_s, \quad (1)$$

где v_{PCC} – напряжение в точке PCC; R_e – эквивалентное сопротивление нагрузки; i_s – ток источника.

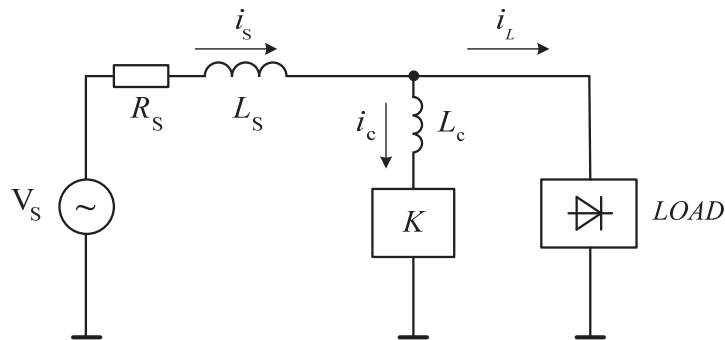


Рис. 1. Схема подключения компенсатора

Если даже источник напряжения V_S является синусоидальным, то напряжение в точке PCC не может быть таковым из-за наличия тока нелинейной нагрузки i_L . Сопротивление эквивалентного резистора R_e определяется активной мощностью нагрузки P_L и действующим значением потребляемого от источника тока I_S :

$$R_e = P_L / I_S^2, \quad (2)$$

т.е. при полной компенсации реактивной мощности от источника V_S потребляется активный синусоидальный ток, величина которого зависит только от активной мощности нагрузки.

Суть метода компенсации заключается в том, что компенсация реактивной мощности нагрузки связана с определением идеального заданного напряжения в точке PCC. В случае полной компенсации напряжение на входе компенсатора (точке PCC) рассчитывается как:

$$v_{PCC} = \frac{P_L}{I_S^2} i_s, \quad (3)$$

где i_s – ток источника.

Иначе говоря, в случае полной компенсации реактивной мощности напряжение v_{PCC} в точке общего подключения совпадает с напряжением источника V_S , а его амплитуда зависит только от активной мощности нагрузки. Таким образом, решение задачи компенсации реактивной мощности сводится к вычислению первой (основной) гармоники напряжения u_{PCC1}^+ прямой последовательности в точке PCC.

Решение этой задачи осуществляется за счет включения в структуру компенсатора модуля фазовой автоподстройки (*Autoadjustable Synchronous Reference Frame*) или ASRF [3], генерирующего синусоидальный сигнал, амплитуда и фаза которого соответствуют основной гармонике входного сигнала, каковым является напряжение v_{PCC} в точке общего подключения.

Принцип работы модуля ASRF, разработанного для трехфазных сетей, состоит в использовании вращающейся системы координат, скорость вращения которой автоматически подстраивается до достижения синхронизации с пространственным вектором основной гармоники напряжения прямой последовательности u_{PCC1}^+ , который вращается с угловой скоростью ω_1^+ . На рис. 2, а показан переходной режим работы ASRF: пространственный вектор напряжения прямой последовательности u_{PCC1}^+ вращается при постоянной угловой скорости ω_1^+ , образуя угол θ_1^+ с неподвижной системой координат $\alpha - \beta$, при этом вращающаяся система координат $0-d-q$ будет вращаться с переменной угловой скоростью ω , образуя с осями $\alpha - \beta$ угол θ . Когда скорость вращения системы $0-d-q$ будет равна ω_1^+ , а также при выполнении условия $\theta = \theta_1^+$, наступает режим синхронизации (рис. 2, б). При этом в процессе регулирования величина угла θ может иметь либо постоянное, либо изменяющиеся

ся значения. В переходном режиме угол θ изменяется произвольным образом, для системы координат $0-d-q$, вращающейся с постоянной угловой скоростью $\omega = \omega_1^+$, угол $\theta = \omega t$ изменяется во времени t линейно в пределах от 0 до 2π .

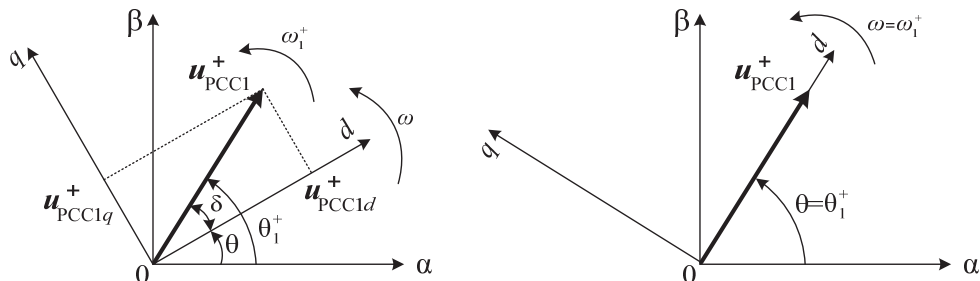


Рис. 2. Пространственный вектор прямой последовательности напряжения PCC при $ASRF$ -синхронизации (в $0-d-q$ осях)

Из рис. 2, *a* следует, что переход к вращающейся системе координат $0-d-q$, повернутой относительно исходной неподвижной системы координат $\alpha-\beta$ на некоторый угол θ может быть выполнен с помощью оператора поворота $e^{-j\theta}$:

$$(u_{PCC1}^+)_{0-d-q} = (u_{PCC1}^+)_{\alpha-\beta} \cdot e^{-j\theta}, \quad (4)$$

т.е. вектор напряжения u_{PCC1}^+ в новой системе координат $0-d-q$ оказывается повернутым на угол θ по часовой стрелке, что учитывается знаком « \rightarrow » в операторе поворота.

Из анализа рис. 2, *a* также следует, что проекции обобщенного вектора u_{PCC1}^+ на координатные оси $0-d-q$ определяются как:

$$u_{PCC1d}^+ = u_{PCC1}^+ \cdot \cos \delta; \quad u_{PCC1q}^+ = u_{PCC1}^+ \cdot \sin \delta. \quad (5)$$

Если синхронную систему $0-d-q$ сориентировать по вектору напряжения u_{PCC1}^+ , то проекция на ось d будет равна длине (модулю) вектора $u_{PCC1d}^+ = u_{PCC1}^+$, а проекция на ось q будет равна нулю.

Таким образом, блок-схема $ASRF$ позволяет по измеренным значениям напряжения u_{PCC} в точке PCC рассчитать мгновенные значения пространственного вектора u_{PCC1}^+ , его проекции на вращающиеся оси d и q , а также угол θ , образованный вращающейся системой координат $0-d-q$ относительно неподвижной $\alpha-\beta$. В блоке $ASRF$ три входных фазных напряжения u_{a-b-c} преобразуются с помощью прямого преобразования Парка из неподвижной системы координат $a-b-c$ во вращающуюся $0-d-q$:

$$u_{0-d-q} = P \cdot u_{a-b-c},$$

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где P – матрица прямого преобразования, которой соответствует: $\|P\|=1$; $P^{-1}=P^T$ и θ – угол, образованный вращающейся системой координат $0-d-q$ относительно неподвижной $\alpha-\beta$ плоскости.

Напряжение в точке PCC будет в общем случае искаженным и/или несбалансированным. При вращении системы $0-d-q$ проекция вектора напряжения u_{PCC1}^+ (5) на ось d будет иметь две составляющие: $u_{PCC1d}^+ = \bar{u}_{PCCd} + \tilde{u}_{PCCd}$, с другой стороны, проекция вектора на ось q будет также иметь две составляющие $u_{PCC1q}^+ = \bar{u}_{PCCq} + \tilde{u}_{PCCq}$, где постоянное значение термина d и q будет соответствовать прямой положительной последовательности компоненты напряжения в точке PCC . Эти соотношения относятся к частному случаю переходного режима, показанного на рис. 2, а.

Но если система отсчета $0-d-q$ вращается синхронно с вектором u_{PCC1}^+ при $\omega = \omega_1^+$, то это означает, что ось d совпадает по фазе с этим вектором (рис. 2, б), в результате чего имеем:

- значение постоянной составляющей проекции напряжения на ось d будет равно модулю основной (первой) гармоники напряжения в точке PCC :

$$\bar{u}_{PCCd} = \|u_{PCC1}^+\|, \quad (7)$$

- значение постоянной составляющей u_{PCCq} будет равно нулю:

$$\bar{u}_{PCCq} = 0. \quad (8)$$

Значение \bar{u}_{PCCq} , полученное в каждом цикле вычисления, сравнивается в $ASRF$ с заданным значением $\bar{u}_{PCCq} = 0$, ошибка вычисления поступает в ПИ-регулятор, выходной сигнал которого $\Delta\omega$ необходим для достижения синхронизации.

Когда ошибка будет равна нулю, то $\Delta\omega$, а также скорость вращения системы отсчета $\omega = \omega_1^+$ будут постоянными, при этом выполняется линейное изменение угла $\theta = \theta_1^+$ от 0 до 2π . В это время $ASRF$ будет синхронизирована основной гармоникой напряжения u_{PCC1}^+ PCC .

Одним из преимуществ метода вращающихся координат является возможность его применения для синхронизации с основной составляющей однофазного входного сигнала, что позволяет использование $ASRF$ как в трехфазных, так и в однофазных системах. Симметричные составляющие трехфазной системы рассчитываются из известного соотношения:

$$\begin{bmatrix} U_{ah}^0 \\ U_{ah}^+ \\ U_{ah}^- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{ah} \\ U_{bh} \\ U_{ch} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где $a = e^{j120}$ – оператор вращения трехфазной системы и h – порядок гармоники.

Система однофазной $ASRF$ может рассматриваться как $ASRF$ трехфазной системы с нулевыми значениями входов, соответствующих фазам b и c : $u_{PCCb} = u_{PCCc} = 0$, а также $U_{bh} = U_{ch} = 0$. Вектор прямой положительной последовательности напряжения для фазы a рассчитывается как:

$$U_{ah}^+ = \frac{1}{3} [U_{ah} + aU_{bh} + a^2U_{ch}] = \frac{1}{3} U_{ah}. \quad (10)$$

Конкретизируя это выражение для основной гармоники $h = 1$, получим:

$$U_{a1} = 3U_{a1}^+, \quad (11)$$

что означает, что основная составляющая однофазного напряжения PCC находится в фазе с a – координатой сбалансированного трехфазного положительного напряжения системы

$u_{PCCa1} = 3u_{PCCa1}^+$. На рис. 3 представлена блок-схема *ASRF*, адаптированной к однофазной системе (однофазная *ASRF*).

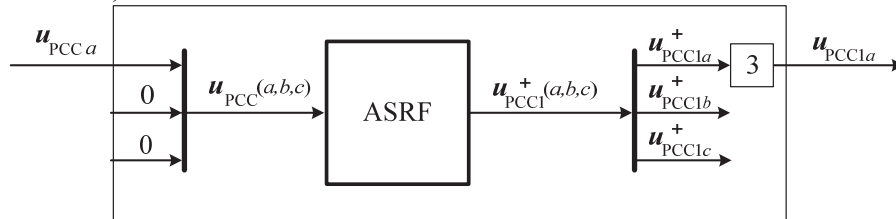


Рис. 3. Блок-схема *ASRF*, адаптированная к однофазной системе

В рассматриваемом приложении с помощью схемы *ASRF*, используя только вычисленную величину угла θ вращающейся системы координат $0-d-q$ относительно неподвижной системы $\alpha-\beta$, можно рассчитать заданное значение потребляемого тока источника i_{S_ref} при полной компенсации ее реактивной мощности.

Для этого следует воспользоваться прямым и обратным преобразованием Парка. Вначале определяются проекции трехфазного тока нагрузки i_{L_abc} на оси $0-d-q$ вращающейся системы координат i_{L_dq} с помощью прямого преобразования Парка:

$$i_{L_dq} = P \cdot i_{L_abc}, \quad (12)$$

где P – матрица прямого преобразования Парка.

$$\begin{bmatrix} i_{L0} \\ i_{Ld} \\ i_{Lq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где i_{L0} – ток нулевой последовательности, который в однофазной системе $i_{L0} = 0$; θ – угол между неподвижной и вращающейся системой координат.

В результате прямого преобразования получим:

$$i_{Ld} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot i_{La} \cos \theta + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot i_{Lb} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot i_{Lc} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right); \quad (14)$$

$$i_{Lq} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot i_{La} \sin \theta - \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot i_{Lb} \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) - \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot i_{Lc} \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right), \quad (15)$$

где i_{Ld} и i_{Lq} – соответственно активная и реактивная составляющие тока нагрузки.

В соответствии с рис. 2, б синхронно вращающаяся система координат $0-d-q$ соответствует полной компенсации реактивной мощности нагрузки. В этом случае проекция вектора реактивного тока нагрузки i_L на ось q равна нулю, т.е. $i_{Lq} = 0$.

Известно, что однофазную систему можно рассматривать как частный случай трехфазной системы $a-b-c$ с нулевыми значениями токов фаз b и c : $i_{Lb} = i_{Lc} = 0$. В этом случае уравнение (14) принимает вид:

$$i_{Ld} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot i_{La} \cos \theta. \quad (16)$$

Проекция активной составляющей тока нагрузки i_{Ld} на ось d , так же, как и вектор напряжения u_{PCC1}^+ , имеет две составляющие [4]: постоянную \bar{i}_{Ld} и переменную \tilde{i}_{Ld} :

$$i_{Ld} = \bar{i}_{Ld} + \tilde{i}_{Ld}. \quad (17)$$

Принцип компенсации предполагает, что при полной компенсации реактивной мощности проекция активной составляющей тока нагрузки i_{Ld} на ось d имеет только постоянную составляющую, т.е. $i_{Ld} = \bar{i}_{Ld}$, а переменная составляющая $\tilde{i}_{Ld} = 0$.

Использование обратного преобразования Парка P^{-1} позволяет получить проекции первых гармоник тока нагрузки на неподвижные оси $a-b-c$, т.е. осуществить обратное преобразование от вращающейся системы координат $0-d-q$ к неподвижной $a-b-c$:

$$i_{L_{abc}} = P^{-1} \cdot i_{L_{dq}},$$

где P^{-1} – матрица обратного преобразования Парка.

$$\begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos \theta & -\sin \theta \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L0} \\ i_{Ld} \\ i_{Lq} \end{bmatrix}. \quad (18)$$

При переходе к однофазной системе в уравнении (18) учитываем, что в ней отсутствует ток нулевой последовательности i_{L0} , а также то обстоятельство, что проекция активного тока i_{Ld} нагрузки определяется только ее постоянной составляющей: $i_{Ld} = \bar{i}_{Ld}$. В этом случае для однофазного тока i_{La} можно записать:

$$i_{La} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \bar{i}_{Ld} \cos \theta. \quad (19)$$

Таким образом, полученное соотношение определяет активную составляющую тока нагрузки i_L . Выше было установлено, что при полной компенсации реактивной мощности нагрузки от источника напряжения в цепь нагрузки протекает ток i_s , равный активной составляющей тока нагрузки. В этом случае можно записать:

$$i_s = i_{La}. \quad (20)$$

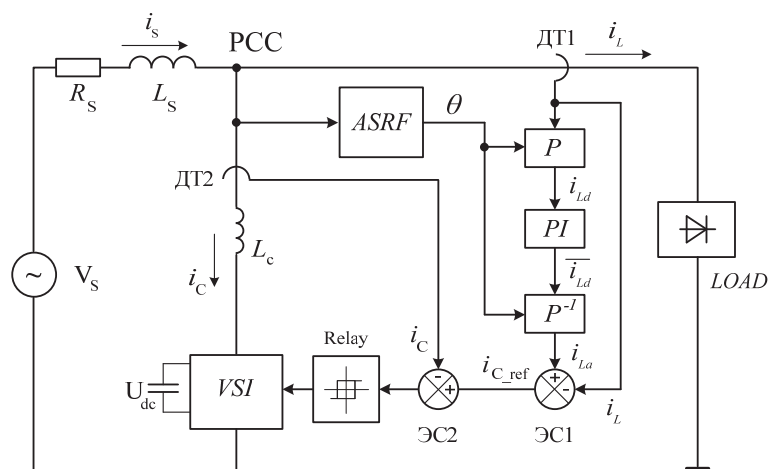


Рис. 4. Структурная схема компенсатора

Из рис. 4 следует, что для точки общего подключения PCC , в соответствии с первым законом Кирхгофа, можно записать уравнение для токов:

$$i_s = i_L + i_C, \quad (21)$$

где i_C – ток компенсатора.

Практически функция компенсатора сводится к формированию такого тока компенсатора i_C , который складываясь с мгновенными значениями тока нагрузки i_L , приводит к полной компенсации реактивной мощности нагрузки, т.е. к выполнению условия (20), при котором ток, потребляемый от источника V_S , будет синусоидальным и совпадающим по фазе с напряжением.

Существуют два основных способа формирования тока компенсатора: метод широтно-импульсной модуляции (ШИМ) и метод δ -модуляции [5]. В работе используется последний метод, при котором фактическое значение тока компенсатора i_C формируется около его заданного значения i_{C_ref} и не отличается более, чем на величину δ . Ток компенсатора i_C протекает под действием выходного напряжения инвертора VSI (*Voltage Source Inverter*), сформированного из постоянного напряжения U_{dc} конденсатора, подключенного к инвертору со стороны зажимов постоянного тока. Таким образом, назначение системы управления инвертором сводится к сравнению заданного i_{C_ref} и фактического i_C тока компенсатора. При достижении равенства этих токов происходит переключение IGBT-транзисторов инвертора, в результате чего напряжение на его выходе меняет знак. Заданный ток компенсатора i_{C_ref} можно получить из уравнения (21), подставив в него заданное значение тока источника i_s из уравнения (20). В этом случае для заданного значения тока компенсатора можно записать:

$$i_{C_ref} = i_{La} - i_L. \quad (22)$$

Таким образом, при совпадении заданного и фактического токов компенсатора происходит полная компенсация реактивной мощности нагрузки.

Предлагаемая структура компенсатора реактивной мощности промоделирована в пакете прикладных программ *MATLAB-Simulink* (рис. 5).

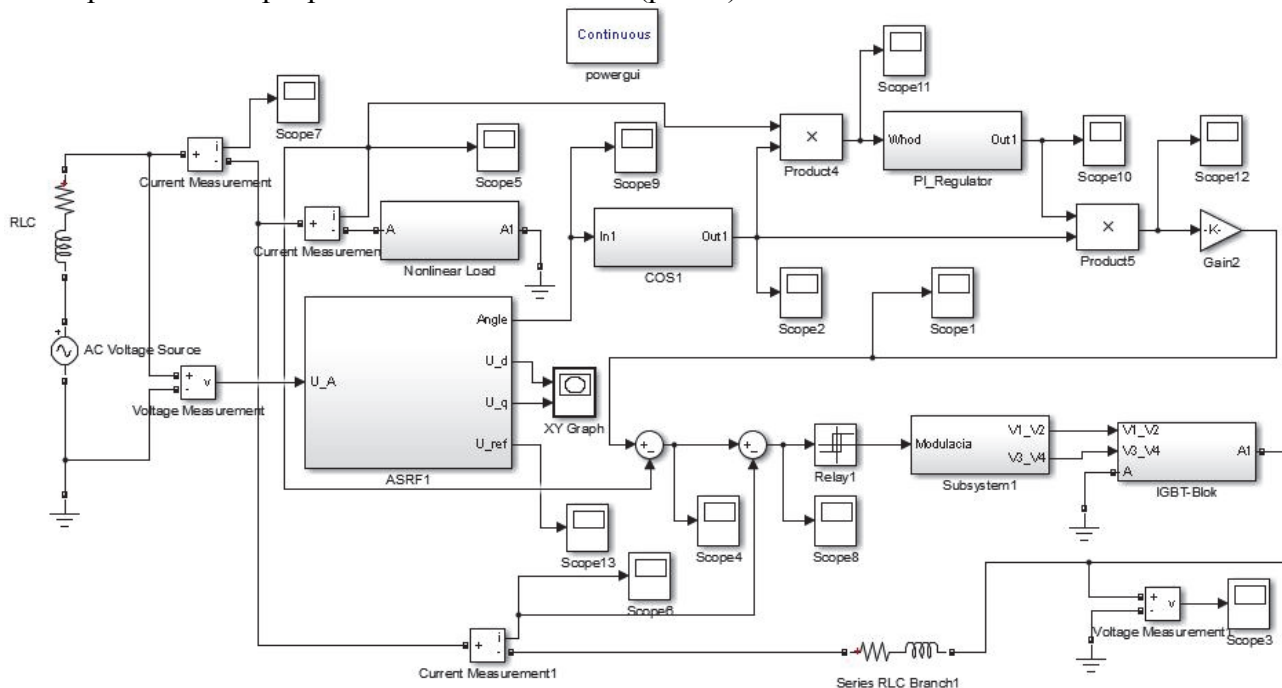


Рис. 5. Схема компенсатора, реализованная в MATLAB-Simulink

К источнику переменного напряжения *AC Voltage Source* подключена нелинейная нагрузка *Nonlinear Load* в виде мостового неуправляемого выпрямителя, нагруженного на *RL*-нагрузку.

Модуль *ASRF* формирует сигнал угла θ , поступающего на вход модулей прямого P и обратного P^{-1} преобразований Парка. На выходе модуля P образуется сигнал вектора тока i_{Ld} , имеющий постоянную и переменную составляющие. ПИ-регулятор (*PI_Regulator*) выделяет из этого сигнала постоянную составляющую \bar{i}_{Ld} , из которой с помощью модуля обратного преобразования P^{-1} формируется сигнал первой гармоники тока нагрузки. В соответствии с (20), он же является заданным входным током. Элемент сравнения ЭС1 осуществляет сравнение токов в соответствии с формулой (22) и формирует на своем выходе сигнал заданного тока компенсатора i_{C_ref} . С помощью второго элемента сравнения ЭС2 происходит сравнение заданного i_{C_ref} и фактического i_C токов компенсатора. Для исключения звонковой работы на выходе ЭС2 установлен пороговый элемент *Relay*, имеющий петлю гистерезиса с порогом переключения $\pm \delta$. Инвертор выполнен на базе IGBT-транзисторов, шунтированных обратными диодами. Индуктивность L_C , включенная на выходе инвертора, является согласующей и определяет наклон ломанной кривой тока компенсатора i_C . Для контроля токов нагрузки i_L и компенсатора i_C используются соответственно датчики тока ДТ1 и ДТ2.

На рис. 6 и 7 представлены результаты математического моделирования работы модуля *ASRF* компенсатора реактивной мощности в установившемся режиме работы при выполнении условия синхронизации $\omega = \omega_1^+$. На рис. 6 показаны диаграммы напряжения u_{PCC1} и угла $\theta = \omega t$ поворота системы, рассчитанные модулем *ASRF* для вращающейся системы координат $0-d-q$.

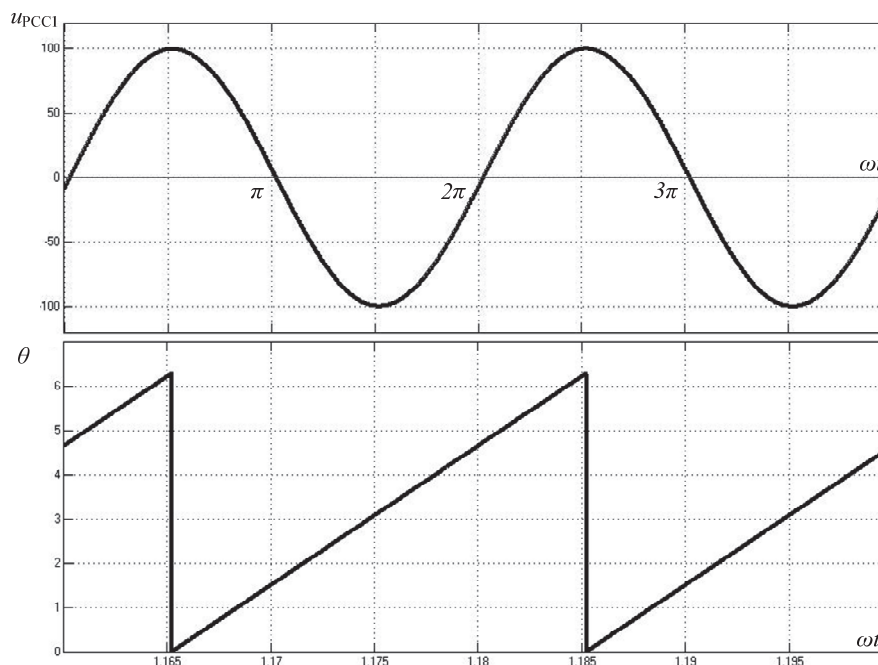


Рис. 6. Диаграммы работы модуля *ASRF*

Из анализа этого рисунка следует, что напряжение u_{PCC1} в точке *PCC* является синусоидальным и совпадающим по амплитуде и фазе с напряжением $V_S = 100$ В источника. Ве-

личина угла θ изменяется линейно во времени от 0 до 2π рад. На рис. 7 показан годограф напряжения u_{PCC1} в виде проекций на оси координат d и q .

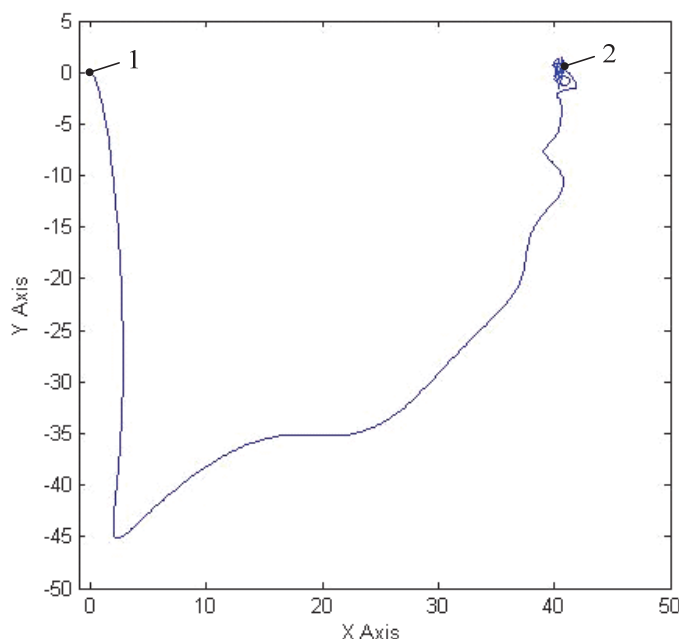


Рис. 7. Годограф напряжения u_{PCC1}

Из этой диаграммы следует, что процесс синхронизации напряжения начинается с координаты, соответствующей наибольшему q (Y Axis) и минимальным d (X Axis) значениям проекции вектора u_{PCC1} на вращающиеся оси координат (точка 1). В установившемся режиме наоборот проекция вектора напряжения на ось q стремится к нулю, и длина вектора u_{PCC1} определяется координатой d (точка 2).

На рис. 8 показаны результаты моделирования токов, протекающих в схеме компенсатора. Для сравнения здесь же показана диаграмма напряжения u_{PCC1} в точке PCC .

Диаграмма тока нагрузки i_L имеет явно выраженный несинусоидальный характер, при этом ток i_L отстает от напряжения источника на некоторый угол φ , что соответствует потреблению из сети реактивной мощности. Ток компенсатора i_C имеет вид ломанной линии, связанной с знакопеременной формой напряжения на выходе инвертора VSI . Ток компенсатора i_C , складываясь с током нагрузки i_L , формирует кривую тока i_S , протекающего от источника V_S . Из рисунка видно, что форма тока i_S также имеет вид ломанной линии, однако форма тока приближена к синусоидальной форме, совпадающей с полупериодами напряжения u_{PCC1} . Некоторое отличие от синусоиды кривой тока i_S наблюдается в начале каждого полупериода, соответствующего интервалам сетевой коммутации γ в вентилях выпрямителя. Для уменьшения этих отличий следует увеличивать частоту переключения инвертора за счет уменьшения порога срабатывания $\pm \delta$, что на практике является вряд ли целесообразным, поскольку при этом возрастает установленная мощность инвертора, вызванная повышенной мощностью, выделяемой во время переключения. Таким образом, с включением компенсатора реактивной мощности происходит изменение формы кривой сетевого тока: он становится синусоидальным по форме и приближенным по фазе к кривой напряжения u_{PCC1} и соответственно к питающему напряжению источника V_S .

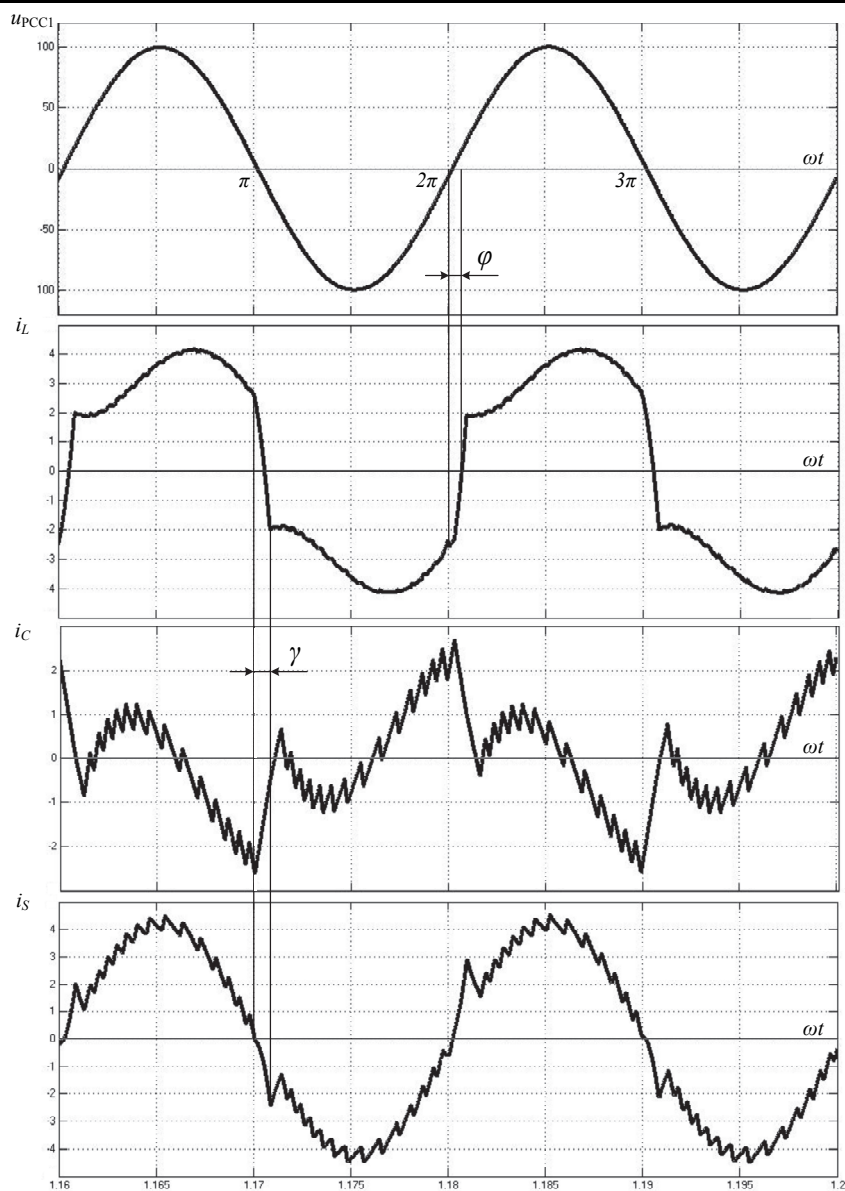


Рис. 8. Диаграммы, поясняющие работу компенсатора

На рис. 9 представлен гармонический состав токов нагрузки i_L и источника i_S .

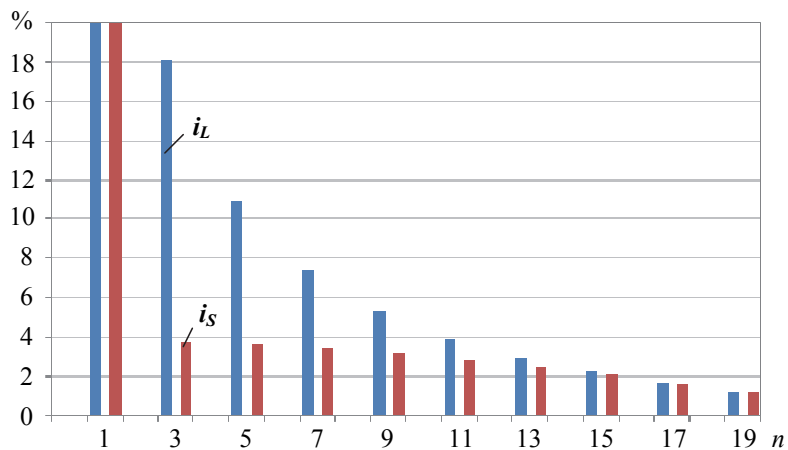


Рис. 9. Гармонический состав токов нагрузки i_L и источника i_S (n – порядок гармоники)

Из его анализа следует, что при одинаковой величине основных гармоник тока ($n=1$) 20 А, гармонический состав тока i_s резко отличается от тока i_L . По сравнению с i_L в спектре тока i_s практически отсутствуют высшие гармонические составляющие тока, связанные с мощностью искажения.

Таким образом, благодаря предложенному алгоритму активной фильтрации, достигается практически полная компенсация реактивной мощности тока нагрузки. За счет синфазности напряжения источника u_s и тока i_s происходит компенсация реактивной мощности на основной частоте 50 Гц, компенсация мощности искажения достигается путем компенсации высших гармонических составляющих тока i_s нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Akagi H. Y. Kanazawa and A. Nabae. «Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components», IEEE Transaction on Industry Applications, vol. IA-20, no.3, pp.625-630, 1984.
2. Patricio Salmeron, Salvador P. Litran, "A control Strategy for Hybrid Power Filter to Compensate Four-Wires Three-Phase Sustems", IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 25, No. 7, pp.1923-1931, July 2010.
3. M.I. Milanes-Montero, E. Romero-Cadaval, A. Rico de Marcos, V.M. Minambres-Macros, F. Barrero-Gonzalez, "Novel Method for Synchronization to Disturbed Three-Phase and Single-Phase Systems", Industrial Electronics, 2007. ISIE 2007. IEEE International Symposium on Date 4-7 June 2007, pp. 860-865, June 2007.
4. Усольцев, А. А. Частотное управление асинхронным двигателем: учеб. пособие / А. А. Усольцев. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики, 2006. – 94 с.
5. Кулинич, Ю. М. Адаптивная система автоматического управления гибридного компенсатора реактивной мощности электровоза с плавным регулированием напряжения: моногр. / Ю. М. Кулинич. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2001. – 153 с.

Просолович А. А., Приходченко О. В., Ватулин Я. С.
A. A. Prosolovich, O. V. Prichodchenko, Y. S. Vatulin

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОВМЕЩЕННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ОПТИМИЗАЦИОННОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ

PERFORMANCE ANALYSIS OF COMBINED ENERGY DEVICES USING THE METHOD OF OPTIMIZED BLADE-PROFILE DESIGN



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

Mr. Aleksey A. Prosolovich – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Computer-aided Design Systems, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia Komsomolsk-on-Amur). E-mail: alpr72@mail.ru.



Приходченко Оксана Вадимовна – старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: okpr68@mail.ru.

Ms. Oksana V. Prihodchenko – Senior Lecturer, Department of Mechanical Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: okpr68@mail.ru.



Ватулин Ян Семенович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматизированное проектирование» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург). E-mail: kaf-ap-pgups@yandex.ru.

Mr. Yan S. Vatulin – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Computer-aided Design, St.-Petersburg State Transport University (Russia, St.-Petersburg). E-mail: kaf-ap-pgups@yandex.ru.

Аннотация. В статье рассмотрены результаты численного моделирования гидродинамических и тепловых процессов в совмещенных энергетических устройствах. Предложены пути повышения эффективности совмещенных энергетических устройств с использованием метода оптимизационного профилирования лопастей исполнительных элементов и связанного мультифизического моделирования.

Summary. The paper considers the results of numerical simulation of the hydrodynamic and heat processes taking place in combined energy devices (CED). We propose several ways to enhance the efficiency of CEDs using the method of optimized profile design of final elements' blades and the correlated multiphysics simulation.

Ключевые слова: совмещенное энергетическое устройство, мультифизическое моделирование, метод оптимизационного профилирования.

Key words: combined energy device, multiphysics simulation, optimized blade-profile design.

УДК 621. 313.17

Актуальность исследования

Развитие современного энергетического оборудования, в первую очередь решающее задачи увеличения удельной мощности агрегатов при одновременном повышении экономичности, надежности и долговечности, а также удовлетворяющее повышенным требованиям по безопасности и защите окружающей среды от загрязнений и техногенных рисков, приводит к необходимости разработки новых и модернизации уже выпускаемых устройств. При этом использование современных подходов, методов и средств математического моделирования и синтез на их основе комплекса программно-алгоритмических мероприятий позволяют создавать технические системы с улучшенными эксплуатационными характеристиками, в частности принципиально новое оборудование с повышенной энергоэффективностью – совмещенные преобразователи энергии, объединяющие приводные, передаточные, исполнительные, а в ряде случаев и другие механизмы.

Совмещенные энергетические устройства

Решение задачи повышения коэффициента полезного действия (КПД) и надежности различных типов технических устройств в разное время привело к появлению ряда конструкций, направленных на постепенное объединение привода и исполнительного устройства. Эта тенденция является прямым развитием принципа построения рациональной машины, постулирующего, что повышение экономичности машины характеризуется постепенным перемещением места, где электрическая энергия преобразуется в механическую в направлении к последнему валу машины [3].

Основные преимущества таких устройств очевидны:

- отказ от промежуточных механических трансмиссий, редукторов, мультипликаторов, вариаторов, ременных и цепных передач, а также уплотнений;
- упрощение конструкции за счет уменьшения количества элементов и их совмещения без ухудшения основных эксплуатационных характеристик;
- улучшение динамических и регулировочных характеристик;
- повышение надежности и экономичности при производстве, транспортировании, хранении, эксплуатации и техническом обслуживании;
- существенное повышение весогабаритных и других технико-экономических показателей.

Если в традиционных устройствах выделяющиеся в активных элементах тепловые потери не совершают полезной работы, а снижают эффективность использования такого оборудования, рассеиваясь в окружающей среде, то в совмещенных энергетических устройствах (СЭУ) этот недостаток в значительной степени устранен. Именно в СЭУ тепловые потери повышают энергоэффективность всей системы за счет использования потерь энергии в процессе ее преобразования для нагрева рабочей среды [3].

Кроме того, благодаря полному совмещению функций приводного, передаточного и исполнительного механизмов СЭУ отличаются повышенными коэффициентом теплоотдачи и теплопроизводительностью, структурной надежностью, уникальными регулировочными характеристиками (точное регулирование мощности электронагрева непосредственно в месте потребления), высокой технологичностью, возможностью варьирования эксплуатационных параметров (температуры нагреваемой среды, производительности, давления в широком диапазоне), а при использовании в качестве теплогенерирующих – низкими тепловыми потерями, обусловленными отсутствием необходимости в использовании протяженных тепломагистралей. Устройства в максимальной степени соответствуют жестким экологическим требованиям, т.к. их существенными достоинствами являются минимальное воздействие на окружающую среду, надежность и безопасность работы, в том числе обусловленная отсутствием наружных вращающихся частей. Также следует отметить относительно низкие капитальные затраты, технологическую привлекательность, мобильность и улучшенные технико-экономические показатели.

Отмеченные достоинства рассматриваемых устройств напрямую находят свое отражение в многообразии их потенциального использования. В первую очередь к возможной области применения СЭУ следует отнести электроотопительные системы всех видов электрифицированного транспорта, источники децентрализованного отопления и горячего водоснабжения населенных пунктов, а также производства и технологические процессы, связанные с одновременным подогревом и транспортировкой жидкостей [2; 3].

Принцип действия и конструкция СЭУ аналогичны электромеханическим преобразователям переменного тока (асинхронным двигателям с короткозамкнутым ротором) [2; 3; 4]. При подаче напряжения от сети переменного тока на первичную обмотку по последней начинает протекать ток, создается намагничивающая сила и вращающееся магнитное поле, которое на основании закона электромагнитной индукции наводит во всех обмотках, связанных с этим магнитным полем, электродвижущую силу (ЭДС). Токи, обусловленные наведенной ЭДС, взаимодействуют с создающим их магнитным полем и приводят к нагреву вторичных обмоток и возникновению вращающего момента. При этом неподвижный нагревательный элемент (ННЭ) нагревается вихревыми токами и является источником тепловой мощности. Подвижный нагревательный элемент обеспечивает перемещение теплоносителя вдоль оси устройства с сопутствующим отбором тепловой мощности от внутренней поверхности ННЭ [3].

Тем не менее имеющиеся в настоящее время результаты исследования СЭУ для нагрева и перемещения жидких рабочих сред касаются только улучшения теплового состояния неподвижного элемента, а вопросы, связанные с влиянием исполнительного элемента (ИЭ) на выходные характеристики, остаются практически не изученными. В то же время важность влияния конструкции и параметров ИЭ очевидна, т.к. именно он в конечном счете определяет не только эксплуатационные характеристики, но и принципиальную выполнимость (работоспособность) устройств данного типа. При этом, несмотря на очевидную перспективность научных исследований СЭУ, обеспечивающих нагрев и перемещение рабочей среды, как в отечественной, так и в зарубежной литературе вопросы проектирования исполнительных элементов таких преобразователей практически не рассматриваются. Одной из причин этого является сложность преобразования энергии в рассматриваемых устройствах, связанная с необходимостью одновременного учета электромагнитных, гидравлических и тепловых процессов, на основании которого можно было бы разработать рекомендации по проектированию и практической реализации эффективных СЭУ, а оптимизация конструкции ИЭ СЭУ является многопараметрической в силу большого количества конструктивных параметров, потенциально влияющих на выходные характеристики СЭУ [2; 6].

Теоретический анализ процессов тепло- и массообмена в совмещенных энергетических установках

Теоретической базой для получения аналитического выражения, связывающего выходные характеристики СЭУ с размерными соотношениями и формой ИЭ, являются уравнения энергии, неразрывности, движения и теплоотдачи. При этом плотность теплового потока на теплоотдающей поверхности и скорость вращения ИЭ определяются в результате электромагнитного расчета [3].

Анализ процессов в канале СЭУ показывает, что характерными целевыми зонами являются зазор между ННЭ и ИЭ (зона теплопередачи) и центральная часть рабочего канала СЭУ (зона перемещения теплоносителя).

Теоретический анализ процессов в СЭУ показывает следующее [2]:

1) Определяющими эксплуатационными характеристиками СЭУ являются температура рабочей среды и производительность (давление).

2) Температура рабочей среды при заданном напряжении определяется обмоточными данными статора. Превышение температуры теплоотдающей поверхности над температурой окружающей среды может варьироваться в диапазоне 0...350 °С за счет регулирования параметров питающего напряжения.

3) Производительность СЭУ зависит от конструктивного исполнения ИЭ и размерных соотношений его параметров.

4) Основное влияние на процессы тепло- и массопереноса оказывает осевая составляющая абсолютной скорости в канале, среднее значение которой может быть выбрано в качестве универсального переходного функционала.

5) На первом этапе основными проектными параметрами ИЭ должны быть выбраны его наружный диаметр, длина, толщина, количество и ширина торцевых короткозамыкающих колец, количество и ширина продольных токоведущих элементов, длина, толщина, высота, количество и угол установки лопасти; диаметр, длина и толщина внутреннего ферромагнитопровода.

6) Область исследования включает две целевые подобласти: зону теплообмена и зону перемещения рабочей среды.

7) Предложенная аналитическая модель процессов массообмена в рабочем канале СЭУ учитывает конструкционные особенности ИЭ и определяет величину механической мощности, необходимой для обеспечения заданной производительности устройства.

8) Исследование влияния размерных соотношений ИЭ на выходные характеристики СЭУ требует разработки параметрической модели и использования средств имитационного моделирования с использованием прикладного программного обеспечения.

Разработка параметрической модели исполнительного элемента СЭУ

Отсутствие априорной информации о значимости отдельных параметров и их большое количество обуславливают необходимость исследования и оценки влияния проектных параметров ИЭ СЭУ на его выходные характеристики на основе теории планирования эксперимента. Нахождение оптимального или близкого к нему варианта ИЭ требует исследования всех конструктивных вариантов ИЭ, т.е. создания гибкой вариативной геометрической модели ИЭ СЭУ. Поставленную задачу максимально эффективно можно решить с использованием технологии параметризации, которая обеспечивает быструю модификацию проектируемого ИЭ и включает несколько этапов.

На первом этапе исследования производится геометрическое моделирование и параметризация СЭУ. Поскольку априорно влияние отдельных геометрических параметров ИЭ на характеристики СЭУ неизвестно, то на первом этапе все они рассматриваются как значимые. Диапазоны варьирования проектных параметров определяются с учетом конструктивных особенностей как с точки зрения взаимосвязи размерных соотношений параметров отдельных элементов устройства, так и с точки зрения наиболее эффективного использования устройства в целом.

На данном этапе реализуются:

- 1) методика создания геометрической модели ИЭ применительно к СЭУ;
- 2) параметрическая сборочная 3D-модель ИЭ СЭУ, включающая 15 управляемых параметров;
- 3) расчетная модель СЭУ, обеспечивающая проведение вычислительного эксперимента;
- 4) методика передачи расчетной модели для проведения вычислительного эксперимента и моделирования гидродинамических процессов в СЭУ с использованием CFD-системы (Computational fluid dynamics).

Моделирование гидродинамических процессов

Исследование гидродинамики в СЭУ выполняется на втором этапе с использованием моделирования гидродинамических процессов на базе CFD-технологий. В качестве CFD-системы использовалась среда SolidWorks Flow Simulation [1; 4].

На втором этапе осуществляются:

- 1) разработка алгоритма определения значимых параметров ИЭ. Выделены три подэтапа исследования:
 - этап определения значимых параметров для каждого компонента ИЭ по целевым зонам;
 - этап определения значимых параметров ИЭ в целом для областей тепло- и массообмена и выявления совместных значимых параметров;
 - этап определения независимых значимых параметров ИЭ при детерминированных совместных отдельно для процессов тепло- и массообмена;
- 2) разработка методики полнофакторного эксперимента в соответствии с алгоритмом определения значимых параметров ИЭ;
- 3) разработка методики гидродинамического расчета СЭУ в среде SolidWorks Flow Simulation;
- 4) вычислительный эксперимент в соответствии с алгоритмом определения значимых параметров ИЭ и разработанными планами полнофакторных экспериментов;
- 5) определение общих значимых параметров для целевых зон теплообмена и транспортирования;
- 6) определение независимых значимых параметров для зоны теплообмена;
- 7) разработка для заданных начальных и граничных условий математической модели, устанавливающей связь осевой составляющей скорости со значимыми проектными параметрами ИЭ.

Исследование влияния проектных параметров на выходные характеристики

Результаты исследования влияния проектных параметров на осевые составляющие абсолютной скорости в рабочем канале не могут быть непосредственно использованы для анализа выходных характеристик устройства в целом. Поэтому от полученной математической модели для средних значений осевых составляющих абсолютной скорости необходим переход к математической модели выходных характеристик СЭУ с учетом выявленных связей между температурой и расходом теплоносителя и скоростью перемещения рабочей среды.

На третьем этапе решаются следующие задачи:

- 1) разработка математических моделей выходных характеристик СЭУ (температуры и производительности) с учетом математических моделей скоростей, полученных на предыдущем этапе исследования (см. рис. 1);
- 2) на основе математических моделей выходных характеристик создание программного комплекса для проектирования исполнительного элемента, обеспечивающего заданные выходные характеристики СЭУ с учетом влияния проектных параметров на процессы тепло- и массообмена;
- 3) оценка влияния значимых проектных параметров на выходные характеристики (температуру и производительность) устройства с использованием программно-реализованной функции анализа поверхностей;
- 4) разработка алгоритма проектирования исполнительного элемента, обеспечивающего заданные выходные характеристики;
- 5) экспериментальная проверка адекватности полученных математических моделей.

Анализ результатов описанных выше этапов исследований позволяет реализовать совмещенный расчет [1; 7] (тепловой и гидродинамический) и перейти к комплексной оптимизации ИЭ, т.к. в одной модели учитываются тепловые и гидродинамические процессы в рабочем канале устройства (см. рис. 2). Однако принятая в начале исследований параметрическая модель ИЭ в силу необходимого ограничения на количество управляемых параметров с позиции полученных на текущий момент результатов требует модификации.

Профилирование исполнительного элемента СЭУ

Существующая практика создания и эксплуатации энергетических устройств показывает, что при оптимизационном проектировании необходим учет в качестве проектных параметров геометрических характеристик лопасти на разных сечениях, т.е. использование профилированной лопасти.

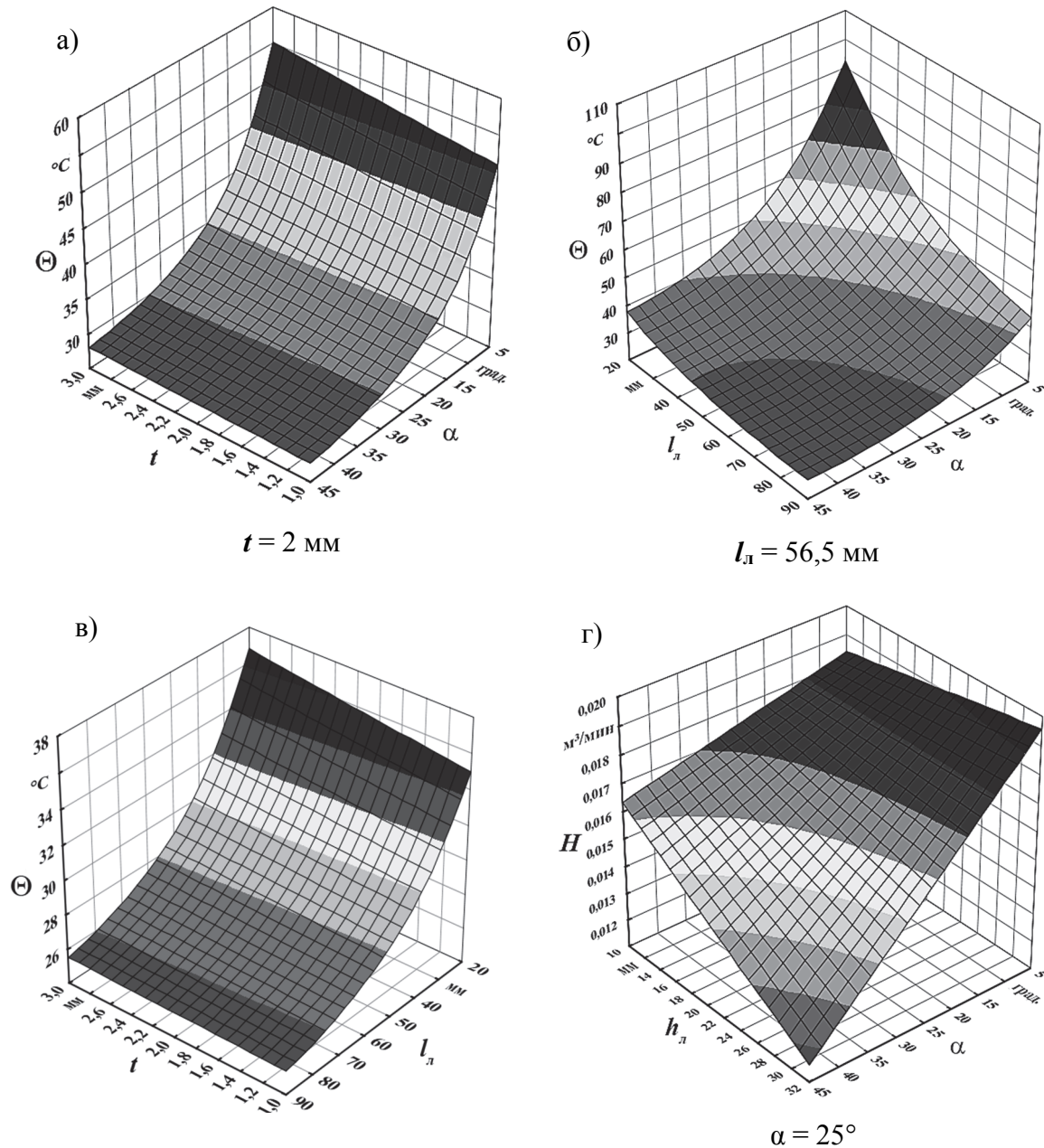


Рис. 1. Визуализация математической модели температуры и расхода:

- а – зависимость температуры Θ от угла установки лопасти α и толщины ИЭ t ;
- б – зависимость температуры Θ от угла установки лопасти α и длины лопасти l_l ;
- в – зависимость температуры Θ от толщины ИЭ t и длины лопасти l_l ;
- г – зависимость расхода H от длины лопасти l_l и угла установки лопасти α

Используемые в настоящее время методики профилирования лопастей, например в компрессоростроении, как правило, решают только задачу транспортирования рабочей среды, т.е. обеспечения максимальной производительности. В случае с СЭУ профилирование лопастей должно решать не только задачи транспортирования, но и оптимального перемещения

рабочей среды относительно теплогенерирующей поверхности при обеспечении заданной выходной температуры. Поэтому необходима разработка метода оптимизационного профилирования: определение оптимального профиля лопасти для достижения требуемых выходных параметров устройства и анализа целесообразности перехода к многопоточным ИЭ.

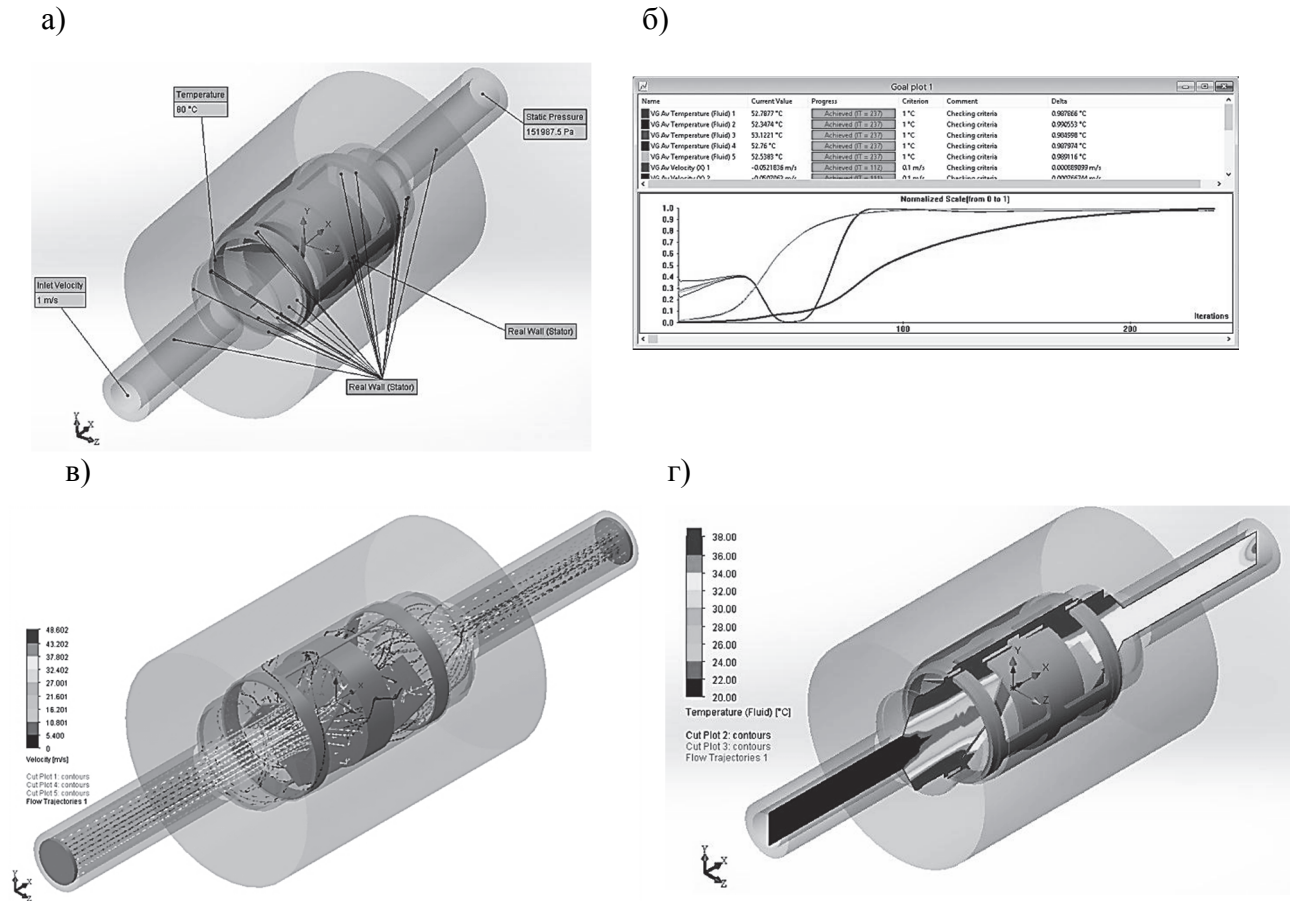


Рис. 2. Совмещенный тепло- и гидродинамический анализ:
 а – граничные условия расчета; б – сходимость расчета;
 в – визуализация линий тока рабочей среды; г – распределение температуры

Мультифизический анализ процессов в СЭУ

Для оценки эффективности устройства средствами компьютерного моделирования необходимо учитывать все физические процессы в устройстве и их взаимовлияние. Как отмечено выше, для СЭУ такими процессами являются электромагнитные, гидродинамические и тепловые явления.

Поэтому мультифизический анализ СЭУ должен включать:

- электромагнитный расчет (для нахождения вращающего момента и скорости ИЭ, тепловых потерь и т.д.);
 - тепловой расчет (распределение температурных полей в отдельных элементах);
 - гидродинамический расчет (нахождение поля скоростей и давлений в рабочей среде).
- Основным требованием к такому анализу выступает наличие единой среды моделирования, обладающей требуемыми ресурсами. Одним из вариантов является Ansys [8].

Пакет ANSYS Maxwell обеспечивает проведение электромагнитного расчета, в результате которого определяются все источники и места концентрации тепловых и электродинамических нагрузок. Далее реализуется передача результата электромагнитного расчета (тепловыделений) в пакет ANSYS Fluent. При этом производится не усредненная по объему пере-

дача потерь, а поэлементная передача с электромагнитной сетки на CFD-сетку, в которой могут присутствовать не только тела модели, участвующие в электромагнитном моделировании, но и другие части СЭУ. В ANSYS Fluent вычисляются поля температур статора и теплогенерирующих поверхностей, полученные результаты повторно передаются в модуль электромагнитного расчета для корректировки влияния температуры на свойства материалов и последующего пересчета. Далее вычисляются поля температур, скоростей и давлений рабочей среды.

Полученные электродинамические и температурные параметры могут быть использованы для проверочного прочностного расчета элементов устройства и расчета их деформаций (ANSYS Structural).

Выводы

1) Результаты исследования плоских лопастей однопоточного ИЭ определяют значимые проектные параметры и являются основой для анализа эффективности выходных характеристик СЭУ (температуры и производительности) методом оптимизационного профилирования.

2) Повышение эффективности СЭУ может быть обеспечено за счет связанного междисциплинарного (мультифизического) анализа энергетических характеристик при переходе к профилированным напорным элементам и многопоточным конструкциям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алямовский, А. А. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи / А. А. Алямовский. – СПб. : БХВ-Петербург, 2012. – 448 с.
2. Ким, К. К. Моделирование процессов тепло- и массообмена в теплогенераторах / К. К. Ким, О. В. Приходченко, А. А. Просолович. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 176 с.
3. Ким, К. К. Электромеханические генераторы тепловой энергии / К. К. Ким, С. Н. Иванов. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 352 с.
4. Приходченко, О. В. Исследование процессов массо- и теплообмена в совмещенных энергетических устройствах методами визуального анализа / О. В. Приходченко, А. А. Просолович, К. К. Ким // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2014. – № I-1(17). – С. 22-29.
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.
6. Приходченко, О. В. Моделирование напорных элементов электромеханических перекачивающих устройств в системе T-FLEX CAD / О. В. Приходченко, А. А. Просолович, И. А. Приходченко // САПР и графика. – 2012. – № 2. – С. 88-91.
7. Приходченко, И. А. Визуализация результатов гидродинамического и теплового расчетов совмещенных энергетических устройств в Solidworks Flow Simulation / И. А. Приходченко, А. А. Просолович // Системы автоматизированного проектирования на транспорте : тез. докл. V Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 17-18 апр. 2014 г. – СПб. : ПГУПС, 2014. – С. 136-140.
8. ANSYS, Inc. (2015). – Режим доступа: <http://www.ansys.com>.

Киншт Н. В., Петрунко Н. Н.
N. V. Kinsht, N. N. Petrunko

О МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ЗАЗЕМЛЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ДИАГНОСТИКИ ЕЕ ПАРАМЕТРОВ

ON THE MATHEMATICAL MODEL OF A GROUNDING ELECTRODE SYSTEM USED FOR RESOLVING THE TASKS OF ITS CONDITION DIAGNOSIS AND PARAMETER MEASUREMENT

Киншт Николай Владимирович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории технической диагностики Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН (Россия, Владивосток). E-mail: kin@dvo.ru.

Mr. Nicolay V. Kinsht – Dr. Habil. of Engineering, Professor, Chief Research Fellow, Laboratory of Engineering Diagnostics, Institute for Automation & Control Processes, the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Science (Russia, Vladivostok). E-mail: kin@dvo.ru.

Петрунко Наталья Николаевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН (Россия, Владивосток). E-mail: pnn@dvo.ru

Ms. Natalya N. Petrunko – PhD in Engineering, Senior Research Fellow, Institute for Automation & Control Processes, the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Vladivostok). E-mail: pnn@dvo.ru.

Аннотация. Обосновывается актуальность разработки и использования в процессе эксплуатации математической модели системы электрического заземления (СЗ), применяемой на объектах электроэнергетики, с целью оперативной диагностики технического состояния системы. Анализируется процесс диагностики непрерывных технических систем, представляемых в виде электрической цепи. Поставлена задача диагностики электрической цепи (ДЭЦ) и необходимость ее формализации и решения применительно к задачам диагностики СЗ. Отмечаются особенности постановки задачи диагностики СЗ как на этапе паспортизации СЗ, так и в течение ее эксплуатации. Дается формальное описание этих процессов. Приводится численный пример.

Summary. In this paper we aim to substantiate the importance of building and applying a mathematical model of the electrical grounding system (EGS) at power generation facilities, with the goal of rapid diagnoses of their technical condition. We consider and analyze the process of diagnosing continuous engineering systems that are presented as electric circuits. We formulate the problem of electric circuit diagnosing (ECD) and demonstrate the need for its formalization as applied to the tasks of EGS diagnosis. We point out the peculiarities of setting the task of EGS diagnosis both in the stage of the system's certification and during its operation. We provide a formal description of these processes and a numerical example.

Ключевые слова: заземление, математическое моделирование, диагностика.

Key words: earthing, mathematical modeling, diagnosis.

УДК 621.31

1. *Устройства заземления* электроустановок играют важную роль в обеспечении защиты обслуживающего персонала и оборудования при аварийных ситуациях, информационного обеспечения релейной защиты, молниезащиты, в более широком смысле – информационных, защитных функций и обеспечении электромагнитной совместимости различного рода электронного оборудования [1]. Эти устройства представляют собой разветвленные системы, включающие в себя заземлители и соединительные проводники, как

схематически изображено на рис. 1, занимая территорию расположения зданий и сооружений, и располагаются на обширных пространствах.

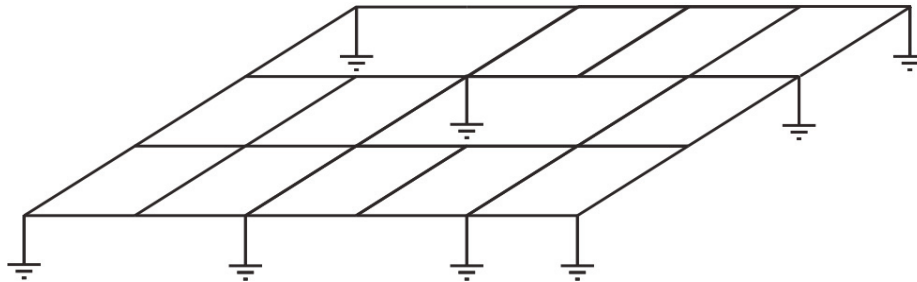


Рис. 1. Схематическое представление системы заземления

Кроме того, на сложных электроэнергетических объектах устройства заземления включают в себя также и проводящие оболочки кабелей. Таким образом, конфигурируется целая СЗ с количеством элементов до нескольких сотен. Естественно, что в проект системы заземления закладываются расчетные значения параметров конструктивных элементов, заведомо обеспечивающие проектные значения напряжений прикосновения, шагового напряжения (обеспечивающих безопасность персонала при нештатных ситуациях), режимных и других параметров. Однако реальные численные параметры СЗ в процессе ее реализации остаются весьма недоопределёнными. В процессе же эксплуатации они могут значительно изменяться как от метеоусловий, так и в результате коррозии элементов и ослабления механических соединений.

В принципе необходимо было бы иметь, построить и сопровождать в процессе эксплуатации достаточно подробную математическую модель СЗ. Так, если обратить внимание на электрическую схему энергосистемы, то параметры ее математической модели с достаточно высокой степенью точности и подробности известны, именно – параметры генераторов, линий передачи, нагрузок; это позволяет в любой момент анализировать и прогнозировать режимы ее работы при любых переключениях и внешних воздействиях. Современные СЗ также требуют наличия точной и подробной математической модели. В настоящее время в требованиях к СЗ не формулируется необходимости построения такой модели; по-видимому, такое требование будет сформулировано в ближайшей перспективе. Потенциальные возможности анализа токов, протекающих в СЗ как в стационарных, так и переходных и аварийных режимах, представляются достаточно высокими и в настоящее время в большой степени недоиспользованы, особенно если ориентироваться на широкое применение «умных» ИТ технологий. Реальная модель может быть построена лишь на основании обследований «живой» системы заземления, находящейся в реальной эксплуатации. Здесь необходимо привлечение идей, методов и технологий технической диагностики, в частности – диагностики электрических цепей (ДЭЦ).

2. Процедура диагностики

Системы, в которых множество режимов и множество технических состояний представляют собой непрерывные континуальные множества, называют непрерывными. Обширный класс таких систем представляют собой электротехнические и электронные устройства, математическое описание которых основано на теории электрических цепей (ЭЦ), либо может быть приведено к такому описанию. Диагностирование таких систем имеет определенную специфику; в дальнейшем, для краткости, будем говорить о диагностике электрических цепей (ДЭЦ), имея в виду такие системы [3].

Диагностические параметры – это параметры объекта, используемые в установленном порядке для определения его технического состояния. Если их значения не поддаются

непосредственному определению, то они вычисляются на основе измеренных параметров и другой априорной информации об объекте. Получение значений диагностических параметров и сравнение их с требованиями, регламентирующими исправность, состояние правильного функционирования и т. п., позволяет назвать вид технического состояния: «исправность», «неисправность», «работоспособность» и другие.

Входными воздействиями на ЭЦ при ее диагностировании оказываются как электрические сигналы (источники напряжения и тока), так и нагрузки – известным образом варьируемые пассивные элементы. С точки зрения диагностики, выходными (измеренными) параметрами ЭЦ являются ее токи и напряжения, доступные для измерения. Их количественные характеристики и являются входными параметрами ДЭЦ. Под внутренними параметрами ЭЦ будем понимать параметры ее элементов.

В качестве диагностических параметров ЭЦ могут выступать выходные (измеренные) параметры, параметры элементов ЭЦ и параметры режима, не поддающиеся непосредственному измерению. Невозможность непосредственно измерять значения некоторых диагностических параметров понимается в значительной степени как технико-экономическая нецелесообразность. Так, уточнение параметров модели энергосистемы производится на основе имеющейся информации об ее функционировании в некоторых рабочих режимах; теоретически можно представить себе измерение ее диагностических параметров в специально созданных режимах, быть может, требующих прекращения ее нормального функционирования, однако это, как правило, практически невозможно.

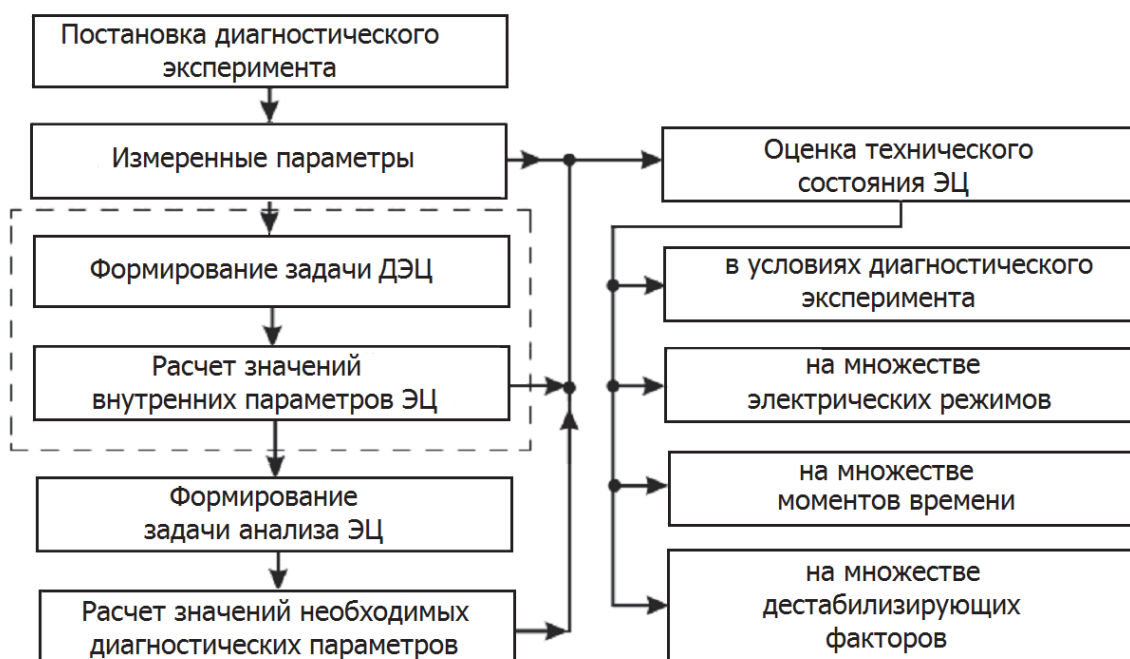


Рис. 2. Структурная схема процесса диагностирования ЭЦ

Процесс диагностирования в укрупненном блочном виде представлен на рис. 2. В качестве диагностических параметров могут выступать либо измеренные параметры, либо внутренние параметры элементов ЭЦ, либо параметры режима ЭЦ, не поддающиеся непосредственному измерению. В первом случае задача диагноза (интерпретация результатов проверок с целью определения технического состояния) не представляет теоретического интереса. Ввиду тривиальности такой задачи впредь ее рассматривать не будем. Предположим далее, что диагностическими параметрами являются внутренние

параметры элементов ЭЦ. Их определение на основе значений измеренных параметров или характеристик и составляет сформулированную выше задачу ДЭЦ (обведенную пунктиром). Отметим, что значения внутренних параметров наиболее компактным образом отражают техническое состояние ЭЦ, являются ее инвариантами и дают возможность расчетным путем определить реакции ЭЦ на произвольные воздействия.

Наконец, вариант – диагностическими параметрами являются параметры режима ЭЦ, не поддающиеся непосредственному измерению. В этом случае они могут быть определены расчетным путем на основе инвариантов - параметров элементов ЭЦ, для получения которых необходимо решить задачу ДЭЦ. При этом могут быть заданы произвольные характеристики ЭЦ как в условиях эксперимента, так и на множествах различных электрических режимов (в том числе – аварийных либо нештатных), моментов времени (например, деградации значений параметров отдельных элементов) или дестабилизирующих факторов (например, применительно к задачам расчета заземлений – метеоусловий либо времен года). Таким образом, определенная выше задача ДЭЦ подлежит решению во всех практически интересных случаях ДЭЦ. Поскольку ее трудоемкость значительно выше трудоемкости задачи анализа, она является основной в задаче определения технического состояния ЭЦ.

3. Общие принципы ДЭЦ

Основываясь на достижениях классической теории электрических цепей, одним из самых естественных первоначальных подходов к диагностике электрических цепей является представление диагностируемой ЭЦ в виде пассивного многополюсника, параметры которого подлежат определению. Пионером в постановке и систематическом изучении такой задачи является Берковиц [2] и его коллеги. Ряд задач при различных предположениях были поставлены и решены Кинштом и др. [3 – 5]. Значительный интерес к диагностике пассивного многополюсника проявили Демирчян и Бутырин [6]. Во многих случаях диагностической моделью служат матрицы функций ЭЦ. Так, удобно использовать матрицы входных и взаимных проводимостей, если в качестве тестовых воздействий рассматриваются источники ЭДС, а в качестве измеренных параметров – токи в ветвях; возможно использование матрицы входных и передаточных сопротивлений, могут также применяться различные гибридные матрицы.

Инструментарий современных технологий диагностики УЗ признает наиболее перспективным метод, использующий активные измерительные клещи с внутренним синусоидальным генератором. Известное напряжение фиксированной амплитуды, индуцированное одними клещами, создает ток, измеряемый с помощью вторых клещей. Применительно к задачам диагностики систем заземления наиболее естественно в этом случае использование матрицы входных и взаимных проводимостей электрической цепи.

4. Первичная паспортизация УЗ

Первичная паспортизация УЗ является наиболее трудоемким процессом. Ее результатом должно явиться множество значений параметров элементов УЗ, т.е. p параметров по количеству ветвей схемы замещения УЗ. Если q – количество узлов схемы замещения, количество независимых контуров равно $(p - q + 1)$, то в процессе паспортизации необходимо произвести $(p - q + 1)(p - q) / 2$ измерений.

Рассмотрим ЭЦ N , все ветви которой доступны для применения активных измерительных клещей; стоит задача определения пассивных параметров ее ветвей. В качестве диагностической модели принята матрица контурных сопротивлений Z^N , элементарным образом связанная с сопротивлениями ее ветвей. Проводятся n экспериментов, организуя тестовое воздействие в виде независимых источников ЭДС (см. рис. 3, а).

Для i -го эксперимента имеем $\mathbf{E}^i = \text{col}[E_1^i, \dots, E_n^i]$. При этом в каждом эксперименте в n контурах наблюдаются векторы контурных токов $\mathbf{I}^i = \text{col}[I_1^i, \dots, I_n^i]$, связанных с ЭДС соотношениями:

$$\mathbf{I}^i = (\mathbf{Z}^N)^{-1} \mathbf{E}^i, \quad (i = 1, \dots, n). \quad (1)$$

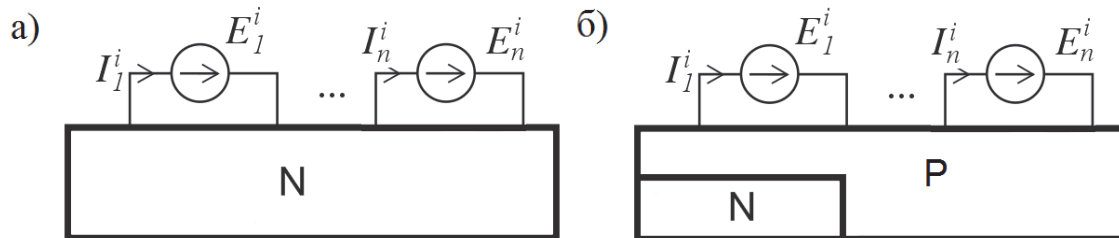


Рис. 3. Условное представление диагностируемой СЗ

Объединив векторы ЭДС всех экспериментов в квадратную матрицу ЭДС $\mathbf{E}_\square = [\mathbf{E}_1, \dots, \mathbf{E}_n]$, составляем квадратную матрицу всех измеренных контурных токов $\mathbf{I}_\square = [\mathbf{I}_1, \dots, \mathbf{I}_n]$. Тогда искомая матрица контурных сопротивлений найдется как

$$\mathbf{Z}^N = \mathbf{E}_\square \mathbf{I}_\square^{-1} = [\mathbf{E}_1, \dots, \mathbf{E}_n] [\mathbf{I}_1, \dots, \mathbf{I}_n]^{-1}. \quad (2)$$

На основе матрицы \mathbf{Z}^N легко восстановить структуру и численные значения сопротивлений. Обратим внимание на трудоемкость метода.

5. Диагностика УЗ в процессе эксплуатации

Диагностика УЗ в процессе эксплуатации подразумевает большой объем известной информации, полученный в результате паспортизации УЗ. В процессе эксплуатации целесообразно проверять некоторые гипотезы об изменениях конкретных параметров УЗ, что значительно уменьшает трудоемкость ее решения.

Эта задача может быть расширена по следующим направлениям:

- можно предположить, что часть пассивных параметров известна;
- можно предположить, что для уменьшения влияния ошибок измерений задача будет переопределена за счет избыточных измерений;
- можно расширить задачу, считая, что «простой» многополюсник N является частью более сложной электрической цепи, и диагностические воздействия на ЭЦ, а также измерения производятся на ветвях, не связанных с самим многополюсником N .

Рассмотрим последнюю из перечисленных возможностей, сопровождая аналитические выкладки численным примером. Пусть имеется система заземления, представленная эквивалентной электрической цепью P (см. рис. 3, б). Пусть также неизвестными являются параметры некоторого подмножества ветвей $N \subset P$. Имеется возможность подать независимые воздействия и измерять токи (источники ЭДС) на множестве ветвей M , (например, $\mathbf{M} \cap \mathbf{N} = \emptyset$). Тогда матрица контурных сопротивлений Z может быть представлена в виде:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{11} & \mathbf{Z}_{12} \\ \mathbf{Z}_{21} & \mathbf{Z}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}^N + \mathbf{Z}_0 & \mathbf{Z}_{12} \\ \mathbf{Z}_{21} & \mathbf{Z}_{22} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где подматрица \mathbf{Z}^N размера $(n \times n)$ образована неизвестными параметрами ветвей, а остальные подматрицы включают в себя лишь известные элементы.

Теперь соотношение (1) для i -го эксперимента примет вид:

$$\begin{bmatrix} (\mathbf{Z}^N + \mathbf{Z}_0) & \mathbf{Z}_{12} \\ \mathbf{Z}_{21} & \mathbf{Z}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{11}^i \\ \mathbf{I}_{22}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{11}^i \\ \mathbf{E}_{22}^i \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Пусть эксперименты организованы так, что подача известных воздействий – ЭДС и измерения токов производятся только в ветвях с известными параметрами, т.е. $\mathbf{E}_{11}^i = \mathbf{0}$. Объединив ЭДС всех экспериментов \mathbf{E}_{22}^i в квадратную матрицу $\mathbf{E}_{2\Box}$, результаты измерений – в матрицу $\mathbf{I}_{2\Box}$, описание экспериментальных режимов ЭЦ получим в виде:

$$\begin{bmatrix} (\mathbf{Z}^N + \mathbf{Z}_0) & \mathbf{Z}_{12} \\ \mathbf{Z}_{21} & \mathbf{Z}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{\Box} \\ \mathbf{I}_{2\Box} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{E}_{2\Box} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Здесь \mathbf{I}_{\Box} – матрица контурных токов в части ЭЦ с неизвестными параметрами.

Полученную систему уравнений можно разрешить относительно искомой матрицы параметров \mathbf{Z}^N :

$$\mathbf{Z}^N = -\mathbf{Z}_{12} \mathbf{I}_{2\Box} \left(\mathbf{Z}_{21}^{-1} (\mathbf{E}_{2\Box} - \mathbf{Z}_{22} \mathbf{I}_{2\Box}) \right)^{-1} - \mathbf{Z}_0. \quad (6)$$

6. Пример

Рассмотрим математическую модель УЗ, представленную эквивалентной схемой на рис. 4. Она содержит 30 ветвей, в ней можно выделить 12 независимых контуров.

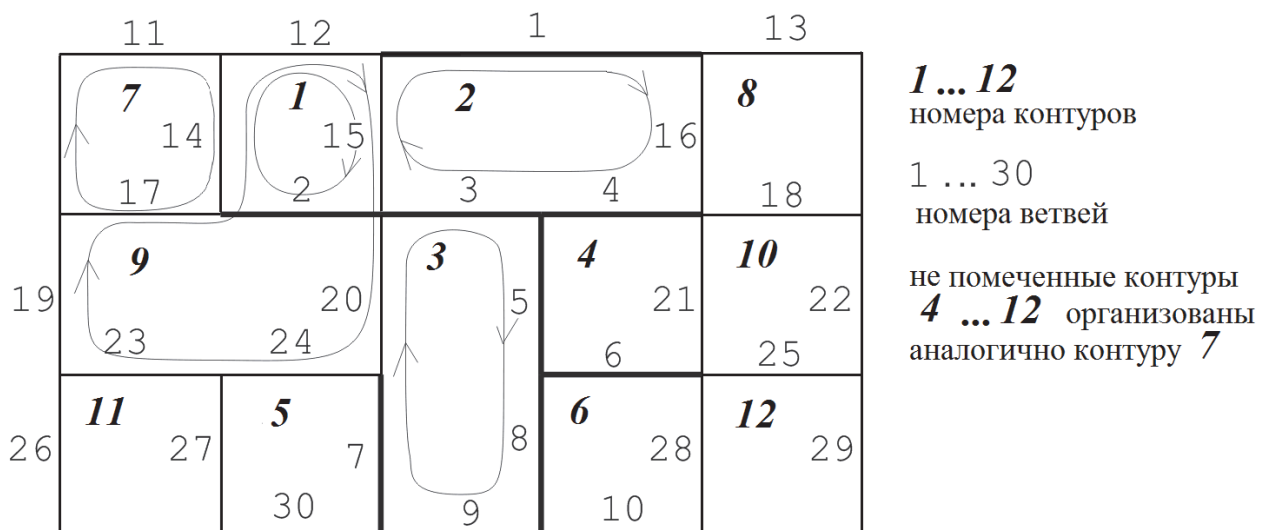


Рис. 4. Схема тестового примера

Выделив ветви с искомыми параметрами (с номерами 1,...,10, они инцидентны контурам с номерами 1,...,6), в соответствии с принятой системой контуров и в соответствии с (3) получим выражение для фрагментов матрицы контурных сопротивлений:

$$\mathbf{Z}_{11} = \mathbf{Z}^N + \mathbf{Z}_0 = \begin{bmatrix} z_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (z_1+z_3+z_4) & -z_3 & -z_4 & 0 & 0 \\ 0 & -z_3 & (z_3+z_5+z_7+z_8+z_9) & -z_5 & -z_7 & -z_8 \\ 0 & -z_4 & -z_5 & (z_4+z_5+z_6) & 0 & -z_6 \\ 0 & 0 & -z_7 & 0 & z_7 & 0 \\ 0 & 0 & -z_8 & -z_6 & 0 & (z_6+z_8+z_{10}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 3 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{Z}_{12} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{Z}_{21} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & -1 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{Z}_{22} = \begin{bmatrix} 4 & 0 & -2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ -2 & 0 & 8 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 4 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 4 \end{bmatrix}.$$

Здесь приняты следующие известные численные параметры ветвей (в безразмерных величинах):

$$z_{11} = z_{13} = z_{26} = z_{29} = 2;$$

$$z_k = 1, \quad (k = 12, \dots, 30, \quad k \neq (11, 13, 26, 29)),$$

Подавать тестовые ЭДС и производить измерения будем в контурах с номерами 7, 8, ..., 12. Пусть при этом

$$\mathbf{E}_{2\Gamma} = \text{diag}(100, 100, 100, 100, 100, 100).$$

Измеряя соответствующие контурные токи (в ветвях 11, 13, 19, 22, 26, 29), получим матрицу измерений

$$\mathbf{I}_{2\Gamma} = \begin{bmatrix} 29.57 & 0.87 & 8.17 & 0.84 & 2.92 & 0.55 \\ 0.87 & 28.99 & 1.30 & 9.36 & 0.62 & 3.05 \\ 8.17 & 1.30 & 23.80 & 1.60 & 8.42 & 1.18 \\ 0.84 & 9.36 & 1.60 & 32.84 & 0.83 & 9.86 \\ 2.92 & 0.62 & 8.42 & 0.83 & 29.75 & 0.63 \\ 0.55 & 3.05 & 1.18 & 9.86 & 0.63 & 29.96 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\mathbf{Z}}^N = \begin{bmatrix} 0.9867 & 0.0185 & -0.0227 & 0.0008 & -0.0060 & 0.0028 \\ 0.0185 & 3.9528 & -0.9864 & -0.9748 & 0.0185 & -0.0112 \\ -0.0227 & -0.9864 & 4.8725 & -0.9765 & -0.9672 & -0.9807 \\ 0.0008 & -0.9748 & -0.9765 & 2.9756 & -0.0132 & -0.9958 \\ -0.0060 & 0.0185 & -0.9672 & -0.0132 & 0.9764 & -0.0044 \\ 0.0028 & -0.0112 & -0.9807 & -0.9958 & -0.0044 & 2.9957 \end{bmatrix}.$$

Обратим внимание, что внедиагональные ненулевые элементы матрицы Z^N , как указано выше, представляют собой взятые с отрицательным знаком искомые параметры сопротивлений всех ветвей, кроме z_1, z_9, z_{10} ; последние же могут быть просто получены из диагональных членов этой матрицы.

Сравнив \tilde{Z}^N с выражением для Z^N , окончательно получим оценки значений параметров ветвей (пренебрегая малыми членами):

$$\{z_1, \dots, z_{10}\} = \{1.99, 0.99, 0.99, 0.98, 0.98, 1.00, 0.98, 0.98, 0.96, 1.02\}.$$

Таким образом, учитывая симметрию матрицы измерений, произведя 21 измерение, получили значения параметров 10-ти ветвей. Достоинство приведенного алгоритма обработки данных измерений в его простоте и регулярности. Для обеспечения большей эффективности следовало бы специально проанализировать топологические свойства конкретной рассматриваемой электрической схемы.

7. Выводы. Для построения и сопровождения в процессе эксплуатации математической модели СЗ необходимо применять методы теории диагностики электрических цепей. Паспортизация СЗ – достаточно трудоемкий процесс; при уточнении параметров СЗ во время эксплуатации в задачу можно ввести разумные упрощающие предположения.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 50571.10-96 Электроустановки зданий. Часть 5. Выбор и монтаж электрооборудования. Глава 54. Заземляющие устройства и защитные проводники. – М.: Стандартиформ. Переиздание. Июль 2012г.
2. Berkowitz R. S., Conditions for Network-Element-Value Solvability, IRE Transactions on Circuit Theory, Mar. 1962. – Pp. 24-29.
3. Киншт, Н. В. Диагностика электрических цепей / Н. В. Киншт, Г. Н. Герасимова, М. А. Кац. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 192 с.
4. Киншт, Н. В. Диагностика электрических цепей и систем / Н. В. Киншт, Н. Н. Петрунко. – Владивосток: Дальнаука, 2013. – 242 с.
5. Kinsht Nikolay, Petrun'ko Natalia, Some Opportunities of Circuit Test Diagnosis // Applied Mechanics and Materials. – 2013. -Vols. 373-375. – Pp. 927-930.
6. Демирчян, К. С. Моделирование и машинный расчет электрических цепей: учеб. пособие для электр. и электроэнерг. спец. вузов / К. С. Демирчян, П. А. Бутырин. – М.: Высш. шк., 1988. – 335 с.

Еренков О. Ю., Верещагина А. С., Кравченко Е. Г.
O. U. Erenkov, A. S. Vereshchagina, E. G. Kravchenko

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ ПРИ ТОЧЕНИИ

THE ASSESSMENT OF POLYMERIC MATERIAL'S STRESS IN THE CUTTING ZONE AT LATHE TURNING



Еренков Олег Юрьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: erenkov@list.ru.
Mr. Erenkov Oleg Uryevich – Doctor of Technical Sciences, professor of mechanical engineering at the Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: erenkov@list.ru.



Верещагина Александра Сергеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: osa321@gmail.com.

Ms. Alexandra S. Vereshchagina – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of mechanical engineering at the Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: osa321@gmail.com.



Кравченко Елена Геннадьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ek74@list.ru.

Ms. Elena G. Kravchenko – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of mechanical engineering at the Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ek74@list.ru.

Аннотация. В статье представлена методика расчета напряженного состояния полимерного материала в зоне резания при токарной обработке. Обработка материалов резанием рассматривается как разновидность процесса разрушения, сопровождающегося динамическим воздействием режущих кромок инструмента на обрабатываемую поверхность.

Summary. The article provides the calculation of an intense condition of polymer material in the cutting zone during turning. Processing of materials by cutting is seen as a process of destruction, with dynamic effects of cutting edges of the tool on the surface

Ключевые слова: точение, напряжения, зона резания, стружкообразование, полимерные материалы.

Key words: voltage, turning, cutting stroke, chip control, polymeric materials.

УДК 621.921.8 (043)

В настоящее время имеется значительное количество теоретических и экспериментальных исследований процесса разрушения полимерных материалов под действием механической нагрузки [1; 2]. Разрушение твердого тела вообще является результатом преодоления сил взаимодействия между его атомами и молекулами, которое может происходить под

влиянием тепловой энергии, механических воздействий, излучений, электрических разрядов и т.д. Обработку материалов резанием, и полимеров в частности, можно представить как разновидность процесса разрушения, сопровождающегося динамическим воздействием режущих кромок инструмента на обрабатываемую поверхность.

Общность процессов разрушения и резания, в частности протекание обоих процессов при превышении действующих напряжений предела прочности материала, установлена в работах В.А. Кудинова, Ю.Г. Кабалдина, В.Н. Подураева [3; 4; 5].

Результатами многочисленных исследований [6] установлено, что при резании любых твердых материалов образованию стружки предшествует напряженно-деформированное состояние зоны резания, создаваемое внедрившимся и движущимся в этом обрабатываемом материале режущим клином инструмента. По мере внедрения инструмента в материал напряжение в сечении заготовки становится больше критического, происходит разрушение материала под действием упругой и пластической деформации с образованием магистральной трещины.

При исследовании зоны стружкообразования установлено, что, прежде чем произойдет разрушение по плоскости скалывания, в объёме будущего элемента стружки возникают значительные деформации сжатия, вызывающие течение материала срезаемого слоя вдоль и перпендикулярно к передней поверхности инструмента. Разрушение произойдет, когда напряжения сжатия превзойдут предел текучести деформируемого материала.

Нормальное напряжение на условной плоскости сдвига, вызывающее сжатие материала при резании, можно определить по формуле

$$\sigma_{\omega} = Fcd_n \sin \beta / ab, \quad (1)$$

где a – толщина среза; b – ширина среза.

Тангенс угла сдвига при известных значениях коэффициента усадки материала k и переднего угла инструмента γ определяется по соотношению $tg \beta = \cos \gamma / (k - \sin \gamma)$.

При этом нормальная сила Fcd_n (перпендикулярная к условной плоскости сдвига) может быть определена через силу стружкообразования по зависимости:

$$Fcd_n = R' \sin(\beta + \omega),$$

где ω – угол действия, т.е. угол между вектором силы стружкообразования и вектором скорости резания (рис. 1), для определения которого можно воспользоваться зависимостью:

$$\omega = C - \arctg \frac{\cos \gamma}{k - \sin \gamma}. \quad (2)$$

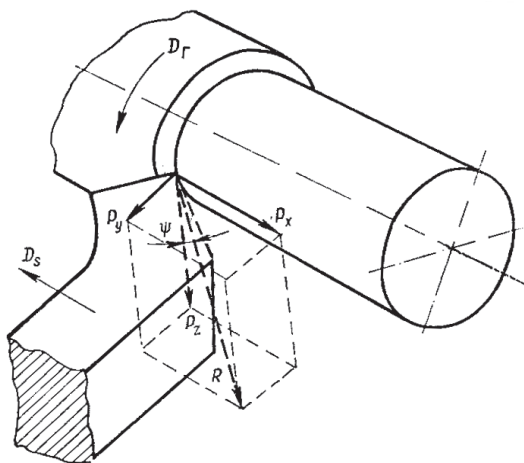


Рис. 1. Схема к определению составляющих силы резания при точении

Здесь C – постоянная величина, для практически применяемых условий резания характеризующая неизменность суммы углов $\omega + \beta = C$ [7; 8]; k – коэффициент усадки стружки, который определяется экспериментальным путём.

Таким образом, определение нормальных напряжений сводится к определению силы стружкообразования, т.е. силы, с которой передняя поверхность инструмента действует на стружку. Удобно определять силу стружкообразования через её проекции на оси (рис. 1), т.е.

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

Классический подход к определению напряженно-деформированного состояния в зоне стружкообразования не всегда учитывает осевую составляющую P_x силы резания. Однако в случае обработки полимерных материалов аксиально-направленная сила P_x оказывает существенное влияние на протекание процесса резания материала и формирование качественных показателей обработанной поверхности.

За несколько последних десятилетий в литературе опубликован ряд работ, в которых силы резания аналитически связываются с физико-механическими характеристиками обрабатываемого материала. В данной работе для расчета ортогональных проекций силы резания воспользуемся методикой, предложенной Н.Н. Зоревым, в основе которой лежит гипотеза о равенстве касательных напряжений при резании и при сжатии или растяжении при условии равенства относительных сдвигов [7].

Согласно [8], главная составляющая силы стружкообразования P_z может быть рассчитана как

$$P_z = \tau_y st [ctg\beta + tg(\beta + \omega)],$$

где s – подача; t – глубина резания; τ_y – сопротивление пластическому сдвигу материала стружки.

Остальные проекции силы стружкообразования рассчитываются как

$$P_x = P_z K_x, \quad P_y = P_z K_y, \quad (3)$$

где K_x , K_y – коэффициенты, характеризующие соотношение проекций силы стружкообразования на оси координат:

$$K_x = \frac{(\mu \cos \nu - \sin \gamma) \sin \beta - [(\cos \gamma + \mu \cos \nu \sin \gamma) \sin \lambda + \mu \sin \nu \cos \lambda] \cos \beta}{(\cos \gamma + \mu \cos \nu \sin \gamma) \cos \lambda - \mu \sin \nu \sin \lambda};$$

$$K_y = \frac{(\mu \cos \nu - \sin \gamma) \cos \beta + [(\cos \gamma + \mu \cos \nu \sin \gamma) \sin \lambda + \mu \sin \nu \cos \lambda] \sin \beta}{(\cos \gamma + \mu \cos \nu \sin \gamma) \cos \lambda - \mu \sin \nu \sin \lambda}. \quad (4)$$

Согласно [8], выражения (4) получены из анализа условий равновесия сил на передней поверхности инструмента для наиболее общего случая резания.

Здесь μ – средний коэффициент трения. Представленная в [3] модель позволила получить физическое уравнение, учитывающее связь между углом сдвига и средним коэффициентом трения:

$$\mu = tg(90^\circ + \gamma - 2\beta).$$

Угол отклонения стружки ν , который определяет ориентацию силы R' относительно передней поверхности инструмента, может быть рассчитан по формуле

$$\nu = \eta - V^{-0.08} \operatorname{arctg}(tg \lambda \cos \eta + tg \gamma \sin \eta),$$

где λ – угол наклона главной режущей кромки.

Коэффициент η при этом определяется из выражения

$$\sin 2\eta = \left(\frac{s}{t} + \frac{r}{t} tg(0.5\beta) \right) \sin^2 \beta. \quad (5)$$

С учетом допущения (5) сила стружкообразования в общем случае (см. рис. 1) определяется следующим образом:

$$R' = P_z \sqrt{1 + K_x^2 + K_y^2},$$

где K_x , K_y – коэффициенты, характеризующие соотношение проекций силы стружкообразования на координатные оси; P_z – главная составляющая силы резания:

$$P_z = \tau_y st \frac{\cos \omega}{\sin \beta \cos(\beta + \omega)}$$

Согласно [3; 7] τ_y с достаточной степенью точности несложно определить по данным испытаний материала на растяжение [9] с использованием приближенной зависимости:

$$\tau_y = \frac{0,6\sigma_s}{1-1,7\psi_B}, \quad (6)$$

где σ_s – предел прочности при растяжении; ψ_B – равномерное относительное сужение образца.

Учитывая выражения (3) и (4), определим силу стружкообразования:

$$R' = \frac{P_z}{(\cos \gamma + \mu \cos \nu \sin \gamma) \cos \lambda - \mu \sin \nu \sin \lambda} \sqrt{\mu^2 + 1}.$$

Тогда нормальное напряжение на условной плоскости, с учётом формул (1), (2) и (6), определяем из выражения

$$\sigma_{co} = \frac{\tau_y \operatorname{tg}(\beta + \omega) \cos \omega}{(\cos \gamma + \mu \cos \nu \sin \gamma) \cos \lambda - \mu \sin \nu \sin \lambda} \sqrt{\mu^2 + 1}. \quad (7)$$

Выводы

1. Получено выражение (7), позволяющее оценить напряженно-деформированное состояние материала в зоне резания. Данное выражение согласуется с результатами исследований [9] закономерностей разрушения твердых полимерных тел, согласно которым установлено, что в условиях постоянной температуры основным фактором, влияющим на прочность структуры и процесс разрушения полимерного материала, является действующее на материал механическое напряжение.

2. Было установлено, что путем изменения напряженно-деформированного состояния можно управлять процессом стружкообразования при резании полимерного материала, который влияет на качественные показатели поверхностного слоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аскадский, А. А. Химическое строение и физические свойства полимеров / А. А. Аскадский, Ю. И. Матвеев. – М.: Химия, 1983. – 248 с.
2. Карташов, Э. М. Структурно-статистическая кинетика разрушения полимеров / Э. М. Карташов, Б. Цой, В. В. Шевелев. – М.: Химия, 2002. – 736 с.
3. Математическое моделирование самоорганизующихся процессов в технологических системах обработки резанием / Ю. Г. Кабалдин, А. И. Олейников, А. М. Шпилев, А. А. Бурков. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – 195 с.
4. Кудинов, В. А. Динамика станков / В. А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 359 с.
5. Подураев, В. Н. Резание труднообрабатываемых материалов / В. Н. Подураев. – М.: Высшая школа, 1974. – 587 с.
6. Еренков, О. Ю. Моделирование напряженно-деформированного состояния полимерного материала при резании с учетом взаимодействия трещин / О. Ю. Еренков, А. Г. Ивахненко // Вестник машиностроения. – 2007. – № 5. – С. 54-57.
7. Зорев, Н. Н. Вопросы механики процесса резания металлов / Н. Н. Зорев. – М.: Машгиз, 1956. – 367 с.
8. Ящерицын, П. И. Планирование эксперимента в машиностроении : справ. пособие / П. И. Ящерицын, Е. И. Махаринский. – М.: Высш. шк., 1985. – 286 с.
9. Еренков, О. Ю. Термомеханические параметры процесса резания полимерных материалов / О. Ю. Еренков, А. В. Гаврилова // Технология машиностроения. – 2008. – № 3. – С. 13-17.

Линёв А. С., Сарилов М. Ю.
A. S. Linyov, M. Yu. Sarilov

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО РАЗРЯДА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ АЛЮМИНИЕВЫХ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

THE IMPACT OF ELECTROSPARKING ON THE EFFECTIVENESS OF EDM MACHINING OF ALUMINUM AND TITANIUM ALLOYS



Линёв Александр Сергеевич – аспирант кафедры «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: uranus_123@mail.ru

Mr. Alexander S. Linyov - PhD student, Department of Machinery and Equipment for Chemical Industry, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia Komsomolsk-on-Amur). E-mail: uranus_123@mail.ru



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

Mr. Mikhail Yu. Sarilov – Dr.habil. of Engineering, Professor, Department of Machinery and Equipment for Chemical Industry, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia Komsomolsk-on-Amur). E-mail: sarilov@knastu.ru

Аннотация. Представлена общая картина пробоя и его влияние на процесс электроэрозионной обработки. Сделан акцент на явления, возникающие при обработке алюминиевых и титановых сплавов.

Summary. The paper offers an overall picture of the effect of breakdown and its impact upon the process of EDM machining. The emphasis is laid on the phenomena that occur in the processing of aluminum and titanium alloys.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, искровой пробой, температура плавления, теплопередача, единичная лунка, электрод-заготовка, алюминиевые и титановые сплавы.

Key words: spark machining, spark breakdown, melting point, heat transfer, individual pit, electrode blank, aluminum and titanium alloys.

УДК 621.9.048

Введение

Электроэрозионная обработка в современных единичном, мелко- и среднесерийном производствах всё чаще и чаще получает приоритет в использовании, нежели другие способы обработки. Тому есть несколько причин. Во-первых, имеется тенденция на увеличение конструктивной и, соответственно, геометрической сложности деталей машин и аппаратов. Это вызвано совершенствованием и оптимизацией конструкций деталей, а также необходимой экономией дорогостоящего материала заготовки. Во-вторых, неизбежное повышение эксплуатационных характеристик, предъявляемых к ответственным деталям, ведет к практике применения в конструкциях материалов с высокими значениями твёрдости, химической инертности к действию окружающей среды, прочности по различным видам нагружения и т. п. Как раз применение материалов с высокой и сверхвысокой твёрдостью не позволяет обрабатывать такие материалы резанием, а рекомендуется применять электроэрозионную обработку (ЭЭО). В-третьих, с момента открытия ЭЭО в 1943 году супругами Лазаренко по

настоящее время процесс электроискрового пробоя (ЭИП) постоянно изучался и совершенствовался сам процесс ЭЭО. Современная теория и практика ЭЭО имеет в своем арсенале большое количество технологических основ и рекомендаций, что позволяет стабильно получать прогнозируемо отличные результаты по качеству получаемой поверхности и производительности при соблюдении высочайших требований точности изготовления деталей. В некоторых случаях возможно достигнуть безыносной обработки (износ электрода-инструмента $\approx 0\%$).

Практическая значимость исследования заключается в приведенных рекомендациях по обработке наиболее распространенных в авиакосмической и судостроительной отраслях промышленности типов конструкционных материалов: алюминиевых и титановых сплавов. [3].

Научная новизна заключается в описанном теоретически и подтвержденном экспериментально явлении появления так называемых «усов», которые влияют на результативность пробоя, тепловые явления на электродах и производительность процесса в целом.

Непосредственно на формирование поверхности электрода-заготовки влияет распределение энергии импульса. Самым подробным образом это было рассмотрено в [1]. Так, выделяющаяся энергия при импульсе может быть найдена по формуле

$$W_{\text{и}} = e \int_0^{t_{\text{и}}} i(t) dt,$$

где e – напряжение на промежутке (≈ 20 В); $i(t)$ – ток через промежуток; $t_{\text{и}}$ – длительность импульса.

В свою очередь, распределение энергии по электродам может быть найдено из выражения

$$W_{\text{э}} = W_{\text{и}} - W_{\text{с}} = \int_0^{t_{\text{и}}} u(t)i(t)dt - \int_0^{t_{\text{и}}} u_{\text{с}}(t)i(t)dt,$$

где $W_{\text{э}} = W_{\text{а}} + W_{\text{к}}$ – энергия, выделяющаяся на аноде и катоде; $u(t)$ – напряжение в процессе пробоя; $u_{\text{с}}(t)$ – напряжение в канале разряда.

Передача энергии разряда электродам обуславливается движением частиц и молекул, которое можно разделить на два вида: движение заряженных частиц под действием внешнего электрического поля и тепловое движение. Эти два вида движения обеспечивают передачу энергии на электроды в виде:

- 1) электронной (ионной) компоненты (бомбардировка заряженными частицами). Для анода обозначается $W_{\text{а}}^{\text{е}}$, для катода $W_{\text{к}}^{\text{и}}$;
- 2) газокINETической компоненты (термическая бомбардировка частицами, составляющими канал разряда), обозначения: $W_{\text{а}}^{\text{т}}$ – для анода, $W_{\text{к}}^{\text{т}}$ – для катода;
- 3) факельной компоненты (торможение факелов паров, проступающих на анод и катод с противоположного электрода), обозначения: $W_{\text{а}}^{\text{ф}}$ и $W_{\text{к}}^{\text{ф}}$;
- 4) лучистой компоненты (тепловое излучение), обозначения: $W_{\text{а}}^{\text{л}}$ и $W_{\text{к}}^{\text{л}}$;
- 5) объемной компоненты (действие объемного источника тепла), обозначения: $W_{\text{а}}^{\text{об}}$ и $W_{\text{к}}^{\text{об}}$.

Общая энергия, поступающая на анод и катод, в таком случае будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} W_{\text{а}} &= W_{\text{а}}^{\text{е}} + W_{\text{а}}^{\text{т}} + W_{\text{а}}^{\text{ф}} + W_{\text{а}}^{\text{л}} + W_{\text{а}}^{\text{об}}, \\ W_{\text{к}} &= W_{\text{к}}^{\text{и}} + W_{\text{к}}^{\text{т}} + W_{\text{к}}^{\text{ф}} + W_{\text{к}}^{\text{л}} + W_{\text{к}}^{\text{об}}. \end{aligned}$$

Для непосредственного расчета энергии, поступившей на электроды, необходимо более подробно рассмотреть каждую из описанных выше компонент.

Электронная компонента. Ток в прианодной области обеспечивается исключительно электронами. Поэтому расчёт $W_{\text{а}}^{\text{е}}$ производят по суммарному действию всех электронов,

пришедших на анод за время t_n , т. е. необходимо найти произведение пришедшего на анод электричества и падения напряжения на этом участке:

$$W_a^e = (u_a + \varphi) \int_0^{t_n} i(t) dt,$$

где u_a – величина падения потенциала в прианодной области; φ – работа выхода электрона, В.

И тут было некоторое отступление от классической теории пробоя. Работа выхода – это некоторое количество энергии, необходимое для извлечения электрона из металла [2]. Она зависит от состояния поверхности, её чистоты, шероховатости и др. Энергию связи электрона в металле $e\varphi$ можно трактовать как работу $\frac{e^2}{4a}$ против притягивающей силы изображения $\frac{e^2}{4r^2}$, которую нужно затратить при удалении электрона с расстояния a порядка межатомного расстояния на бесконечность. Так как имеется внешнее вытягивающее поле E , то на электрон действует суммарная сила:

$$F = \frac{e^2}{4r^2} - eE.$$

Начиная с расстояния $r_k = \left(\frac{e}{4E}\right)^{1/2}$, где $F = 0$, и дальше, внешнее вытягивающее воздействие превышает силу притяжения к поверхности [6]. Значит, чтобы выбраться из тела, электрону нужно преодолеть лишь расстояние r_k и энергию притяжения:

$$\int_a^{r_k} F dr = \int_a^{r_k} \left(\frac{e^2}{4r^2} - eE \right) dr = \frac{e^2}{4a} - e^{3/2} E^{1/2}.$$

Работа выхода уменьшается по сравнению со случаем отсутствия поля на величину

$$e\Delta\varphi = e^{3/2} E^{1/2}.$$

Это явление называют эффектом Шоттки.

Ионная компонента. Ток на катоде имеет как электронный, так и ионный характер. Поэтому энергию, поступающую на катод, можно записать так:

$$W_k^i = a_k u_k \int_0^{t_n} i_i(t) dt + u_i \int_0^{t_n} i_i(t) dt + \varphi \int_0^{t_n} i_e(t) dt, \quad (1)$$

где a_k – коэффициент аккомодации иона; u_k – падение потенциала в прикатодной области; i_i – ионный ток на катоде; u_i – потенциал ионизации иона (усредненное значение); i_e – электронный ток на катоде.

Первое слагаемое в выражении (1) – кинетическая энергия, полученная от торможения ионов на катоде, второе – энергия их нейтрализации, третий – потери энергии при испарении «электронов»

Газокинетическая компонента. Плотность кинетической энергии частиц находится из выражения

$$\omega_T = \frac{1}{2} \xi n k T_T - \frac{1}{2} \xi n k T_0 = \frac{1}{2} \xi (p(t) - p_0),$$

где ω_T – удельная энергия теплового движения; ξ – число степеней свободы; n – число частиц в единице объема; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – газокинетическая константа Больцмана, T_T – температура газа; T_0 – начальная температура; p – давление газа при температуре T_T ; p_0 – начальное давление.

$p(t)$, являясь функцией от времени, может быть заменено на некоторое постоянное значение $p_{эф}$. Тогда выражение для общего количества энергии теплового движения частиц в объеме столба разряда может быть записано таким образом:

$$\Omega_T = \frac{1}{2} \xi (p_{эф} - p_0) v_c,$$

где Ω_T – энергия теплового движения газа в объеме столба разряда; v_c – объем столба газа. Электродам передается лишь часть тепловой энергии, и если считать газ одноатомным, а поверхности электродов получают одинаковое количество тепловой энергии, то на единицу площади поверхности электрода приходится

$$W_a^T = \frac{3}{2} b (p_{эф} - p_0) v_c,$$

$$W_k^T = \frac{3}{2} b (p_{эф} - p_0) v_c,$$

где b – коэффициент передачи энергии, $0 < b < 1$.

Факельная компонента. Под действием разряда поверхность электродов мгновенно ($10^{-6} - 10^{-7}$ с) разогревается до температуры кипения и выше, что приводит к выбросу паров факелов со скоростями, значительно превышающими скорость звука. Доходя до противоположного электрода, струя факела передает тепловую энергию поверхности. Удельный тепловой поток в этом случае

$$q_c = \alpha [T^* - T_{п}],$$

где q_c – поток тепла, подводимый струей факела к поверхности электрода; α – коэффициент теплопередачи; T^* – температура торможения; $T_{п}$ – температура поверхности электрода.

Температуру торможения T^* по гидродинамическим закономерностям можно записать как

$$T^* = T_r \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right); \quad k = \frac{c_p}{c_v},$$

где T_r – температура факела; M – число Маха (отношение скорости факела к скорости звука); c_p, c_v – теплоемкость газа факела соответственно при постоянном давлении и объеме.

Коэффициент теплопередачи α для турбулентного потока определяется

$$\alpha = \frac{k}{2} c_p \rho_r \vartheta_r k_f,$$

где k – коэффициент, учитывающий размерность входящих величин; ρ_r – плотность газа; ϑ_r – скорость газа; k_f – коэффициент трения.

Если считать температуру газа постоянной и равной некоторой величине эффективного значения, то в первом приближении полное количество энергии, подаваемое на поверхность анода, можно записать следующим образом:

$$W_a^\Phi = \frac{k}{2} c_p \rho_{кф} \vartheta_{кф} k_f \left[T_r \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right) - T_{п} \right] s_a t_{кф},$$

где W_a^Φ – энергия, передаваемая катодным факелом аноду; $\rho_{кф}$ – плотность газа катодного факела; $\vartheta_{кф}$ – скорость катодного факела; s_a – площадь поверхности торможения факела об анод; $t_{кф}$ – время действия катодного факела.

Аналогичным способом определяется и факельная компонента на катоде.

Лучистая компонента. Газ, находясь в канале разряда при высокой температуре ($10^4 - 10^5$ К), способен передать часть тепловой энергии в виде излучения. Количество этой энергии, полученное анодом или катодом, в этом случае может быть найдено по закону Стефана-Больцмана:

$$W^и = \delta \varepsilon \sigma T_{эф}^4 S t_и,$$

где δ – коэффициент поглощения света поверхностью металла; ε – коэффициент черноты плазмы разряда; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана – Больцмана; S – площадь излучателя; $t_и$ – время действия.

Объемная компонента. Это, как правило, то количество энергии, которое выделяется в объеме зоны растекания за счет эффекта Джоуля-Ленца в непосредственной близости от анодного и катодного пятен. Величина этой энергии примерно равна как для анода, так и для катода, и может быть записана как

$$W_a^{об} = \int_0^{t_i} I^2(t) R_{эф} dt,$$

где $R_{эф}$ – омическое сопротивление зоны растекания тока.

Определив значение и удельный вес каждой компоненты разряда, а также и решив уравнение теплопроводности, можно с определенной степенью точности определить то количество металла, которое будет удалено с поверхности электрода за единичный импульс [1], [4]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda(T)}{\rho c(T)} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \frac{1}{\rho c(T)} \frac{\partial \lambda(T)}{\partial T} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right],$$

где T – температура материала электрода; t – текущее время; $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности в направлениях r и z при заданной температуре; $\rho c(T)$ – удельная объемная теплоемкость материала при заданной температуре.

Для подтверждения приведенных закономерностей были проведены экспериментальные исследования на различных видах материалов, чаще всего применяемых в передовых отраслях промышленности.

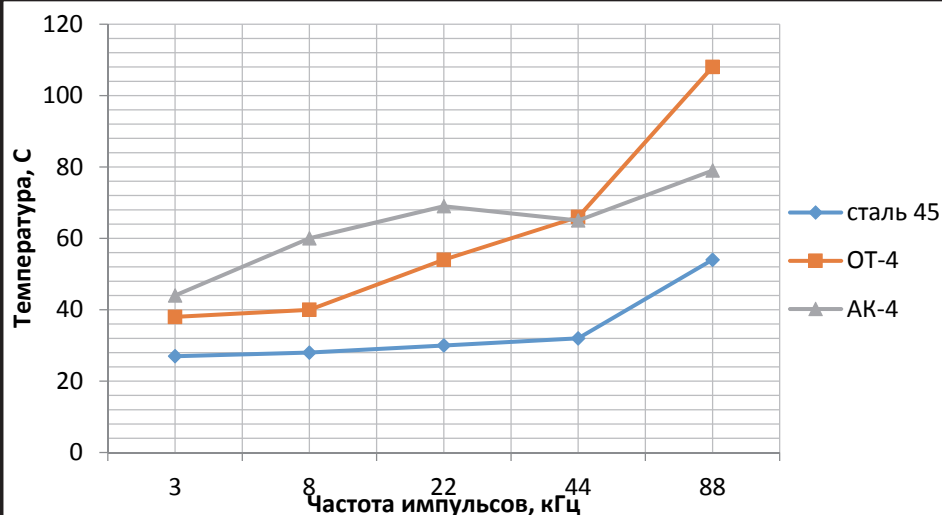
Методика и материалы

Проведя обработку стали 45, алюминия АК-4 и титана ОТ-4 с замером температуры электрода-инструмента, были получены графики, представленные на рис. 1. Обработку производили на копировально-прошивочном электроэрозионном станке с адаптивным управлением модели 4Л721Ф1 с генератором импульсов ШГИ 40-440М (рис. 2). В качестве материала электрода были использован электрод из меди М1. Также исследования проводились на настольном прецизионном электроэрозионном копировально-прошивочном комплексе ДГТ-ЭП-03. В этом случае были использованы медь и графит в качестве электродов-инструментов (ЭИ) и также сталь 45, АК-4 и ОТ-4 в качестве электродов-заготовок (ЭЗ).

Расчет по представленному уравнению теплопроводности также подтверждает, что результаты обработки алюминия в большей степени, а титана в меньшей не укладываются в представленную теорию. Тогда была выдвинута гипотеза о некоторых особенностях, которые сопровождают процесс ЭЭО этих материалов. Сделано предположение, аналогичное [5], о том, что в процессе разряда, когда объем удаленного из лунки материала достигает определенной величины, появляется вероятность образования «усов» – образований на основе материала электрода, чья длина превышает ширину и толщину и которые способствуют следующему пробую, эффективно сокращая межэлектродный промежуток.

Как видно из графиков, температура алюминиевого сплава АК-4 и титанового сплава ОТ-4 значительно превышает температуру при обработке при тех же режимах стали 45 (электроэрозионная обрабатываемость которой принята в теории за 1). Однако если для титанового сплава данное явление можно объяснить большей плотностью, более низкой теплопроводностью, более высокой теплоемкостью, что в совокупности приводит к концентрации тепловой энергии в области контакта материала заготовки с каналом разряда, то для алюминиевого сплава такое явление подобным образом объяснено быть не может. Алюминий имеет высокую теплопроводность и низкую теплоёмкость, что должно способствовать теплоотводу от области обработки. Но этого не происходит, что свидетельствует об значительных отличиях механизма пробоя на алюминиевый сплав.

а)



б)

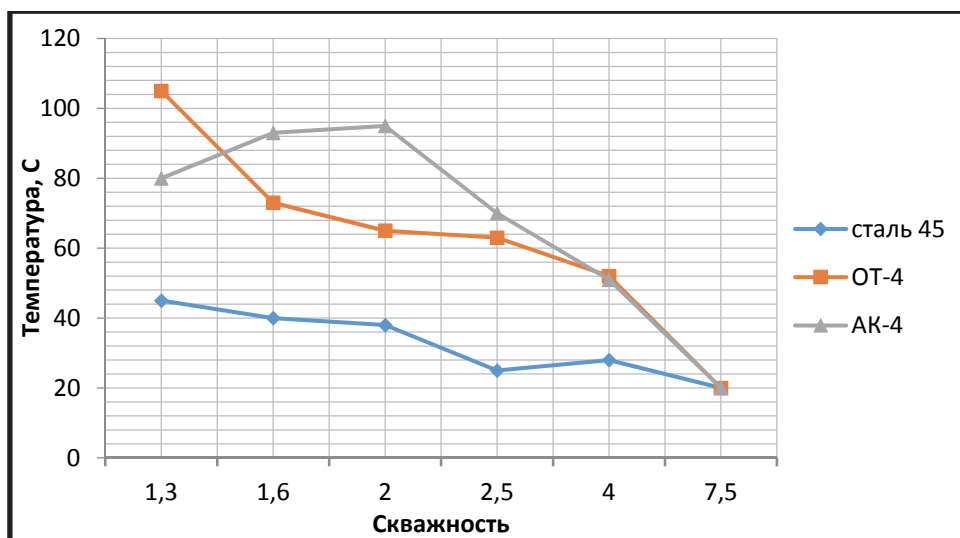


Рис. 1. Зависимость температуры электрода-инструмента от изменения:
а – частоты импульсов; б – скважности

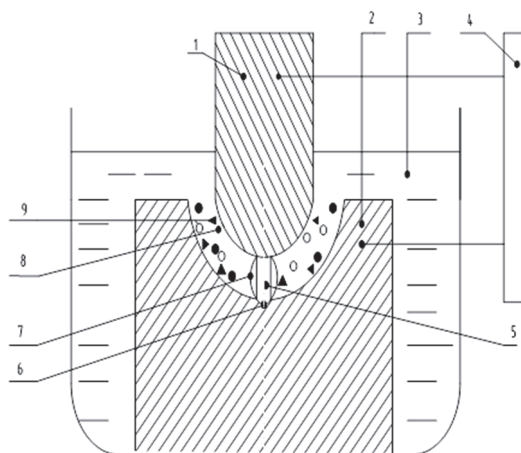


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:
1 – ЭИ; 2 – ЭЗ; 3 – РЖ; 4 – генератор; 5 – канал заряда; 6 – лунка образования разрядом;
7 – газовый пузырь; 8 – частицы металла (шлам); 9 – продукты пиролиза

Дальнейшие исследования единичного импульса производились с использованием настольного прецизионного электроэрозионного копировально-прошивочного комплекса ДГТ-ЭП-03 (рис. 3, а), а также микроскопа Neophot 2 с максимальным увеличением $\times 1000$ (рис. 3, б).

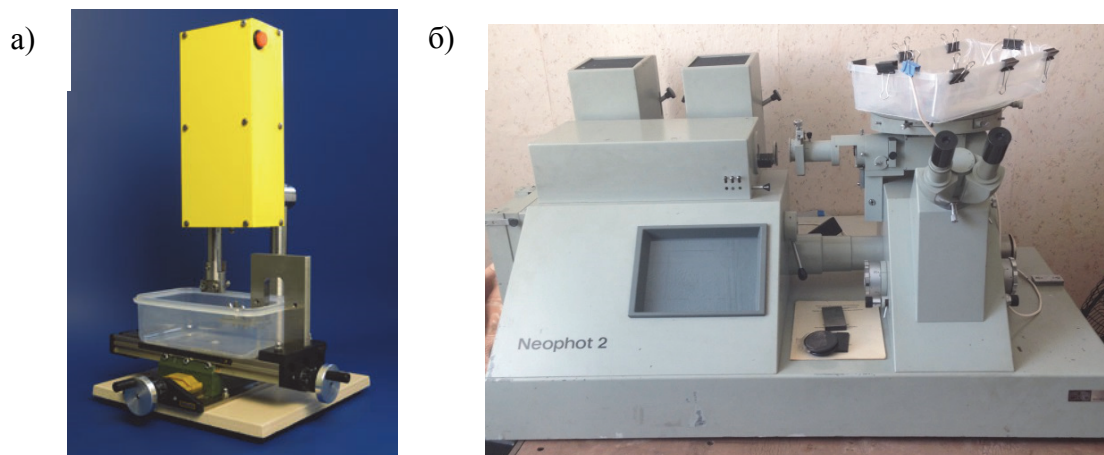


Рис. 3. Приборы для исследования единичного импульса:
а – ДГТ-ЭП-03; б – Neophot 2

Результаты и обсуждение

После того как были получены и обработаны результаты обработки трех видов материалов (сталь, алюминиевый и титановый сплавы) были проведены исследования по подтверждению выдвинутой гипотезы на единичном импульсе. Пробой производился между параллельными плоскостями электродов с минимальной обработкой для получения условий максимально приближенных к условиям обработки. На рис. 4 представлены фотографии с микроскопа при одном пробое из множества полученных на воздухе.

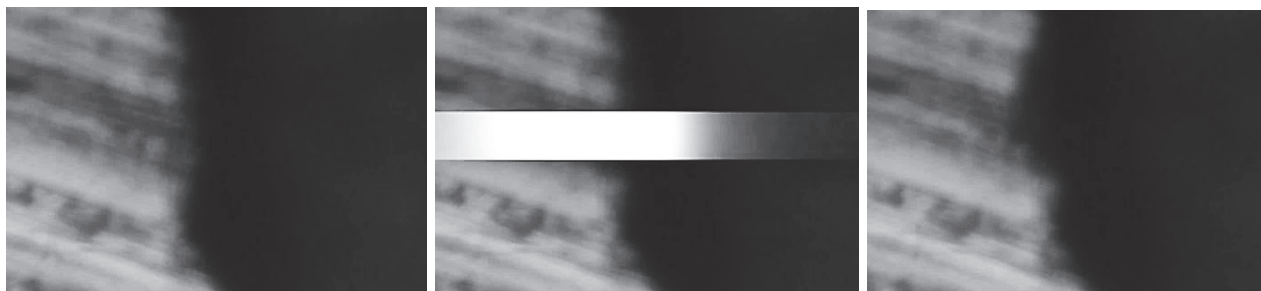


Рис. 4. Прохождение импульса между медным ЭИ и алюминиевым ЭЗ
(увеличение в 1000 раз)

Как видно из фото, отсутствуют какие-либо образования на краях лунки, которые могут как-либо влиять на процесс пробоя в последующем. Также можно заметить, что объем лунки имеет небольшое значение, по отношению с теми, которые получаются в результате пробоя в жидком диэлектрике.

Тогда были проведены эксперименты на тех же материалах, но уже в жидкости. На рис. 5 показаны результаты при пробое на алюминий. В качестве жидкого диэлектрика, заполняющего зазор, применялась дистиллированная вода.

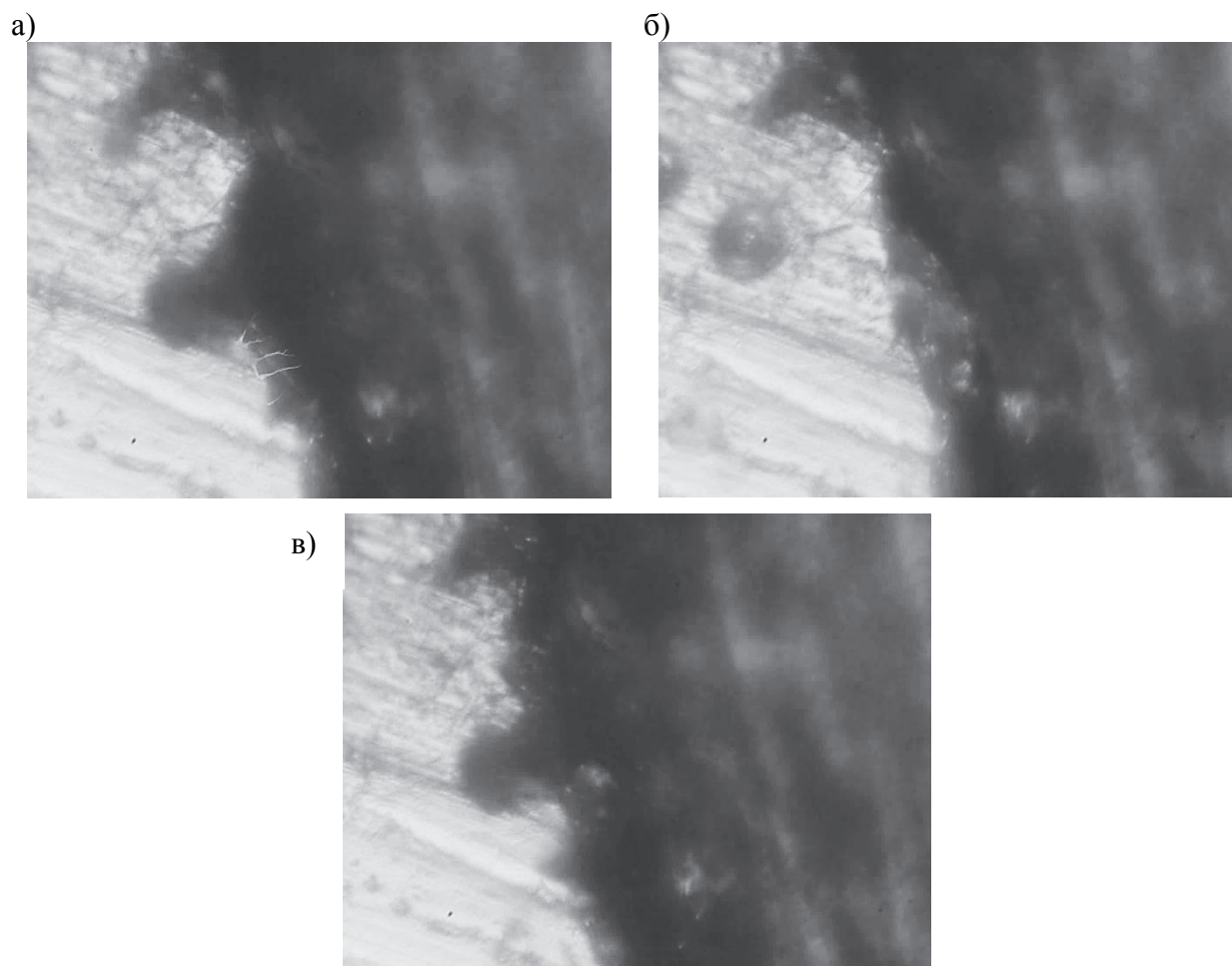


Рис. 5. Пробой в жидком диэлектрике:
а – до первого пробоя; б – после первого пробоя; в – после второго пробоя
(увеличение в 1000)

Как видно на рис. 5, б справа от первого кратера имеются нитевидные образования, предположительно и являющиеся «усами». Как описывалось ранее, они сокращают расстояние между электродами, за счет чего количество холостых импульсов сокращается, а именно они переходят в разряд рабочих. Соответственно растет количество выделяющейся энергии в процессе обработки. Тем самым можно объяснить наблюдаемые тепловые явления при обработке алюминия и титана. Как видно из хронологии следования снимков (рис. 5, б и рис. 5, в) следующий пробой произошел как раз в месте образования «усов».

Появление образований, как правило, зависело от энергии импульса, объема получаемой лунки, движения рабочей жидкости между поверхностями электродов и состоянием электродов до и после первого пробоя. К сожалению, пока не удалось выявить теоретические закономерности появления «усов» ввиду большого количества факторов, влияющих на процесс их появления.

Образование «усов» на алюминии происходило в разы чаще, нежели при титане. Это вполне укладывается в данную теорию, так как химическая активность титана при одних и тех же значениях температуры ниже, чем у алюминия, к тому же частицы титана тяжелее.

Образование «усов» на стали не происходило вовсе за всё время проведения экспериментов. Обладая низкой химической активностью и коротким промежутком времени, отведенном на процессы, по результатам которых могут образоваться «усы», процесс пробоя на сталь не вызывает отклонений от общей теории пробоя.

Выводы

1. Были внесены уточнения в теорию процесса пробоя между двумя электродами в жидком диэлектрике
2. Были получены экспериментальные данные по тепловым явлениям на электродах-заготовках из различных материалов в процессе обработки на разных режимах.
3. Была вдвинута и подтверждена экспериментально гипотеза о существовании нитевидных образований после пробоя, которые оказывают влияние на последующий пробой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Золотых, Б. Н. Физические основы электроэрозионной обработки / Б. Н. Золотых, Р. Р. Мельдер. – М.: Машиностроение, 1977. – 41 с.
2. Линёв, А. С. Механизм электроэрозионного пробоя в воде на алюминиевые и титановые сплавы / А. С. Линёв, М. Ю. Сариков // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 6 (часть 6). – С. 1349-1353.
3. Солнцев, Ю. П. Материаловедение / Ю. П. Солнцев, Е. И. Пряхин. – СПб.: Химиздат, 2004. – 736 с.
4. Сариков, М. Ю. Повышение эффективности электроэрозионной обработки и качества обработанной поверхности на основе подходов искусственного интеллекта : автореф. дис. ... д-ра техн. наук (05.03.01) / Сариков Михаил Юрьевич. – Комсомольск-на-Амуре, 2008. – 43 с.
5. Райзер, Ю. П. Физика газового разряда : учеб. руководство: для вузов / Ю. П. Райзер. – М.: Наука, 1992. – 536 с.
6. Сариков, М. Ю. Роль плазменного канала и механизмы теплопередачи в процессе электроискровой обработки / М. Ю. Сариков, А. С. Линев, А. М. Злыгостев // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2011. – № II-1(6). – С. 57-63.

**Ершова Т. Б., Дворник М. И., Зайцев А. В., Верхотуров А. Д.
T. B. Ershova, M. I. Dvornik, A. V. Zaytsev, A. D. Verhoturov**

ПОЛУЧЕНИЕ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ И НАНОСТРУКТУРНЫХ ВОЛЬФРАМКОБАЛЬТОВЫХ ПОРОШКОВ МЕТОДАМИ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СВОЙСТВ

OBTAINING ULTRADISPERSING AND NANOSTUKTURING TUNGSTENCONTAINING POWDERS BY DISPERGATING METHOD AND INVESTIGATION OF THEIR PROPERTIES



Ершова Татьяна Борисовна – доктор технических наук, заместитель директора по научной работе, Института материаловедения ХНЦ ДВО РАН (Россия, Хабаровск); 680042, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 153; (4212)22-65-98. E-mail: secretar@im.febras.net.

Ms. Tatyana Ershova – Doctor of Engineering, vice-director, Institute of Materials of Khabarovsk Scientific centre of Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk); (4212)22-65-98. E-mail: secretar@im.febras.net.



Дворник Максим Иванович - кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института материаловедения ХНЦ ДВО РАН (Россия, Хабаровск); 680042, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 153; (4212)22-69-56. E-mail: Maxxxx80@mail.ru.

Mr. Maxim Dvornik – Scientist Researcher, Institute of Materials of Khabarovsk Scientific centre of Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk); (4212)22-69-56. E-mail: Maxxxx80@mail.ru.



Зайцев Алексей Владимирович – старший инженер Института материаловедения ХНЦ ДВО РАН, (Россия, Хабаровск); 680042, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 153; (4212)22-69-56. E-mail: alex-im@mail.ru

Mr. Alexey Zaytsev – Engineer, Institute of Materials of Khabarovsk Scientific centre of Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk); (4212)22-69-56. E-mail: alex-im@mail.ru



Верхотуров Анатолий Демьянович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института водных и экологических проблем ДВО РАН (Россия, Хабаровск); 680000, г. Хабаровск, ул. Ким-Ю-Чена, 65. E-mail: verhoturov36@mail.ru

Mr. Anatoly Verhoturov - – Doctor of Engineering, Professor, Senior Research Fellow, Institute for Water and Environmental Problems of Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk). E-mail: verhoturov36@mail.ru

Аннотация. Методами электроэрозионного и механического диспергирования получены субмикронные порошки вольфрамкобальтовых твердых сплавов и исследованы их свойства. Предложена технологическая схема, позволяющая из субмикронных порошков получить компактные образцы субмикронного твердого сплава с минимальным содержанием дефектов, обладающие повышенными значениями прочности и твердости.

Summary. The composition, structure, and properties of submicronic powders of the tungstencontaining hard alloys obtained by methods of electrospark and mechanical dispersion are investigated. The technological scheme allowing from submicronic powders to receive compact samples of a submicronic hard alloys alloy with the minimum maintenance of defects is offered. This samples are increased values durability and hardness.

Ключевые слова: диспергирование, вольфрамкобальтовые порошки, структура, свойства, субмикронные твердые сплавы.

Key words: dispersion, tungstencontaining powders, structure, properties, submicronic hard alloys.

УДК 621:762.661.665.3: 532.612

Введение

Спеченные вольфрамкобальтовые твердые сплавы широко используются в различных областях промышленности (обработка металлов резанием, штамповка, деревообработка и т.д.) [5]. В последние годы наблюдается быстрый рост научного и промышленного интереса к материалам с ультрамелкозернистым строением — наноструктурным материалам, обеспечивающим существенное увеличение их физико-химических и механических свойств. Одной из проблем, возникающих при создании высокопрочных твердых сплавов, является получение ультрамелкодисперсных и наноструктурных порошков исходных компонентов. Известные способы получения порошков ультра-нанометрового диапазона сложны и дорогостоящи и дают довольно широкий диапазон распределения частиц по размерам. Определенную перспективу в этом плане могут дать относительно простые и экономичные методы диспергирования (электроэрозионное и механическое), где в качестве исходных материалов используются компактные образцы, в том числе отходы твердых сплавов.

Цель работы: получение вольфрамкобальтовых порошков ультра-нанометрового диапазона и твердых сплавов из них и исследование свойств.

Материалы и методики

В качестве объектов исследования служили компактные образцы твердого сплава ВК8, в том числе отходы, образующиеся при производстве и эксплуатации изделий из твердого сплава. Компактные образцы дробили термоударом, а затем механически измельчали в планетарной шаровой мельнице РМ при 250 об/мин в течение 10, 20, 40, 80, 160 и 320 мин. Электроэрозионное диспергирование твердого сплава ВК8 осуществляли на установке, разработанной в ИМ ХНЦ ДВО РАН, для диспергирования в насыпном слое (рис. 1) в дистиллированной воде в течение 4 ч при максимальной энергии импульса генератора и следующих параметрах: $C = 600$ мкФ, $U = 300$ В, $F = 100$ Гц.

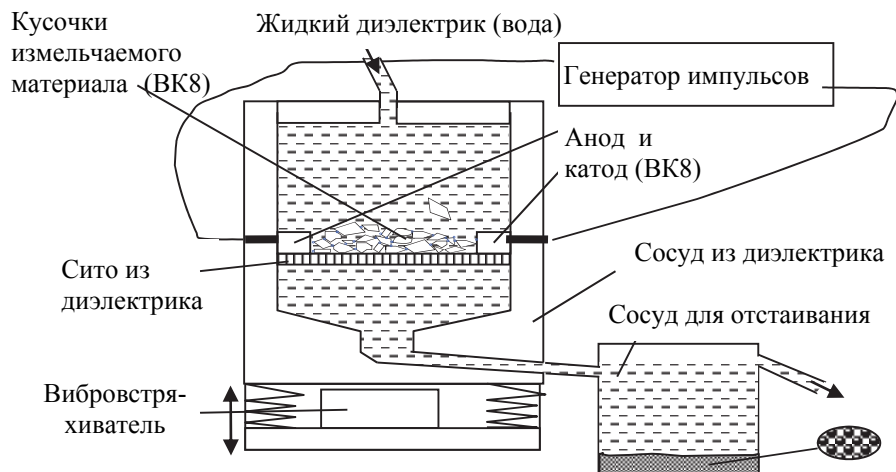


Рис. 1. Установка для диспергирования в насыпном слое

Исследования фазового, морфологического, гранулометрического состава образующихся порошков проводили с использованием рентгеновской дифрактометрии, оптической, электронной микроскопии, методами лазерной дифракции, газовой адсорбции. Обработка гистограмм для описания порошков проводилась по методике, разработанной в ИМ ХНЦ ДВО РАН, с применением программы, использующей метод наименьших квадратов. Гранулирование, прессование и спекание порошков для получения твердого сплава проводили по стандартной технологии.

Обсуждение результатов

Механические методы измельчения обычно осуществляются в две стадии: дробление, а затем измельчение. Основной проблемой при дроблении является высокая прочность твердого сплава, для снижения которой предложена термообработка образцов при температуре 1400 °С с последующей закалкой в 10%-ном растворе NaCl. При этом микроструктура твердого сплава в результате закалки не изменяется. Разупрочнение твердого сплава ВК8 обусловлено возникновением термических напряжений из-за неравномерного распределения температуры при закалке, что вызывает увеличение твердости сплава с 86,0 HRA до 88,7 HRA и микротвердости с 13,6 до 15,9 ГПа, которые приводят к появлению микротрещин (рис. 2) и разрушению образцов.

Кроме этого в сплаве возникают напряжения, вызванные изменением фазового состава, в основном, $\alpha \rightarrow \beta$ превращением кобальтовой фазы: в жидкой фазе, которая образуется при нагреве сплава ВК8, растворяется дополнительное количество вольфрама и углерода. При высокой температуре в жидкой фазе растворено до 10 % вольфрама [6]. При охлаждении в стационарных условиях вольфрам и углерод выделяются на уже имеющихся зернах карбида вольфрама. В условиях быстрого охлаждения углерод не успевает выделиться и способствует стабилизации высокотемпературной фазы β -Co.

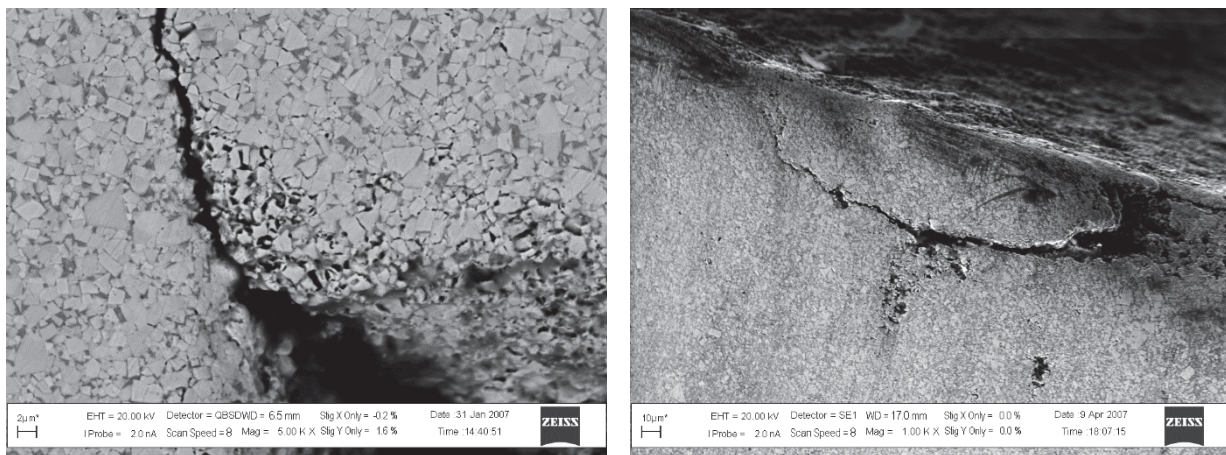


Рис. 2. Трещины в структуре сплава, появившиеся в результате закалки

Дробление сплава производили в истирателе, где материал разрушается раздавливанием и истиранием. Распределения объема частиц по размерам, аппроксимированные функцией Авдеева-Свенсона, показаны на рис. 3.

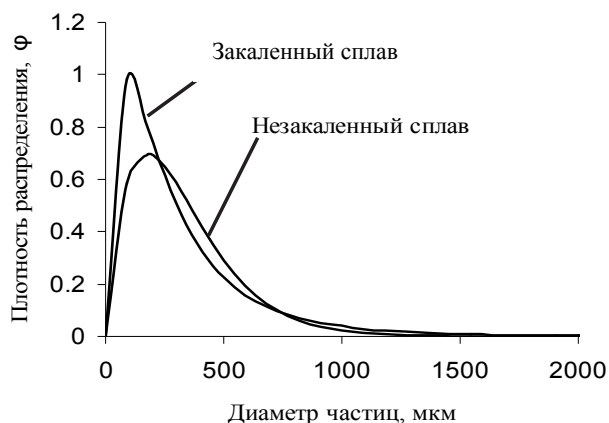


Рис. 3. Плотности распределения объема частиц по размерам дробленого сплава ВК8

По результатам гранулометрического анализа закалка уменьшает затраты электроэнергии на увеличение удельной поверхности при дроблении ВК8 на 32 %.

Далее происходит собственно измельчение, т.е. увеличение удельной поверхности частиц, на которое приходится, по нашим оценкам, только около 0,5 % затрачиваемой энергии (≈ 76 % тратится в трансмиссии мельницы, $\approx 23,5$ % потребляется мелющими телами и стаканом).

При измельчении карбида вольфрама в энергонасыщенных планетарных шаровых мельницах степень измельчения частиц твердого сплава ВК8, определяемая

коэффициентом раздробленности (β), равна 1,442. При этом доли исходного θ_1 и вновь образованного θ_2 порошка после 8-часового измельчения в шаровой барабанной мельнице ММР-70/100 оказались 0,3926 и 0,6074 соответственно. Фазовый и химический составы образующихся порошков не отличаются от исходных образцов.

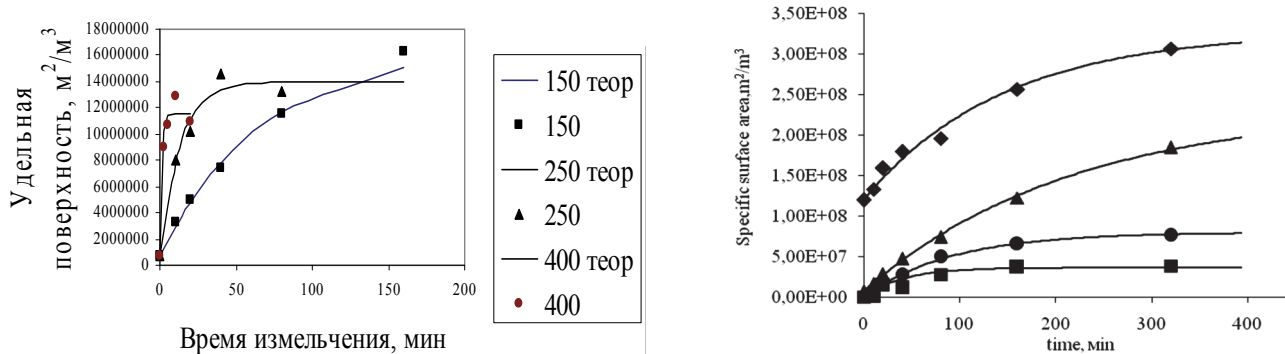


Рис. 4. Кинетика измельчения порошка WC–Co в планетарной шаровой мельнице

Проведены исследования кинетики измельчения вольфрамкобальтового порошка в планетарной шаровой мельнице (рис. 4) и оценены пределы измельчения (средний диаметр) на различных структурных уровнях (рис. 5): агломерат (640 нм), частица WC–Co (75 нм), фаза WC (25 нм), зерно WC (18 нм), обусловленные равенством скоростей образования новой поверхности и коагуляции структурных элементов порошка.

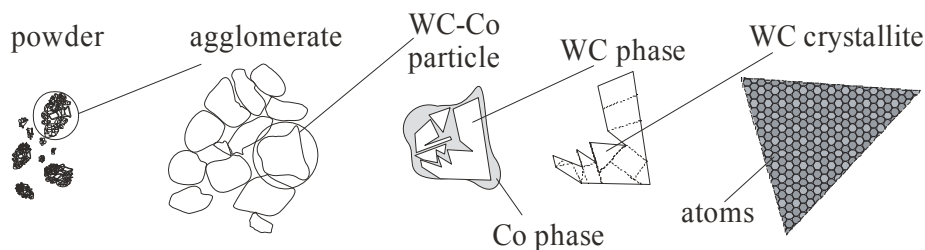


Рис. 5. Структура порошка WC–Co

Экспериментально определено, что длительное измельчение мелкодисперсного порошка карбида вольфрама со средним размером частиц 1,2 мкм в течение 160 мин с частотой вращения барабана 250 об/мин, соотношение размольные тела: измельчаемый материал = 75:1 позволяет получить ультра-нанодисперсный порошок с максимальной удельной поверхностью $44,4 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{м}^3$ и средним диаметром частиц 144 нм.

Другим методом получения порошков является электроэрозионное диспергирование. Воздействие низковольтных электрических разрядов на вещество (компактные образцы или отходы твердого сплава, например, ВК8) приводит к разрушению материала с получением частиц вольфрамкобальтового порошка различного гранулометрического (от нескольких нанометров до 200 мкм), морфологического, фазового и химического составов, обусловленных разным механизмом образования частиц из хрупкой, паровой, жидкой, фазы (рис. 6). Установлено, что энергетические параметры (энергия и длительность импульса) позволяют изменять соотношение частиц, образованных по разным механизмам, что дает возможность получать порошки заданного состава и структуры.

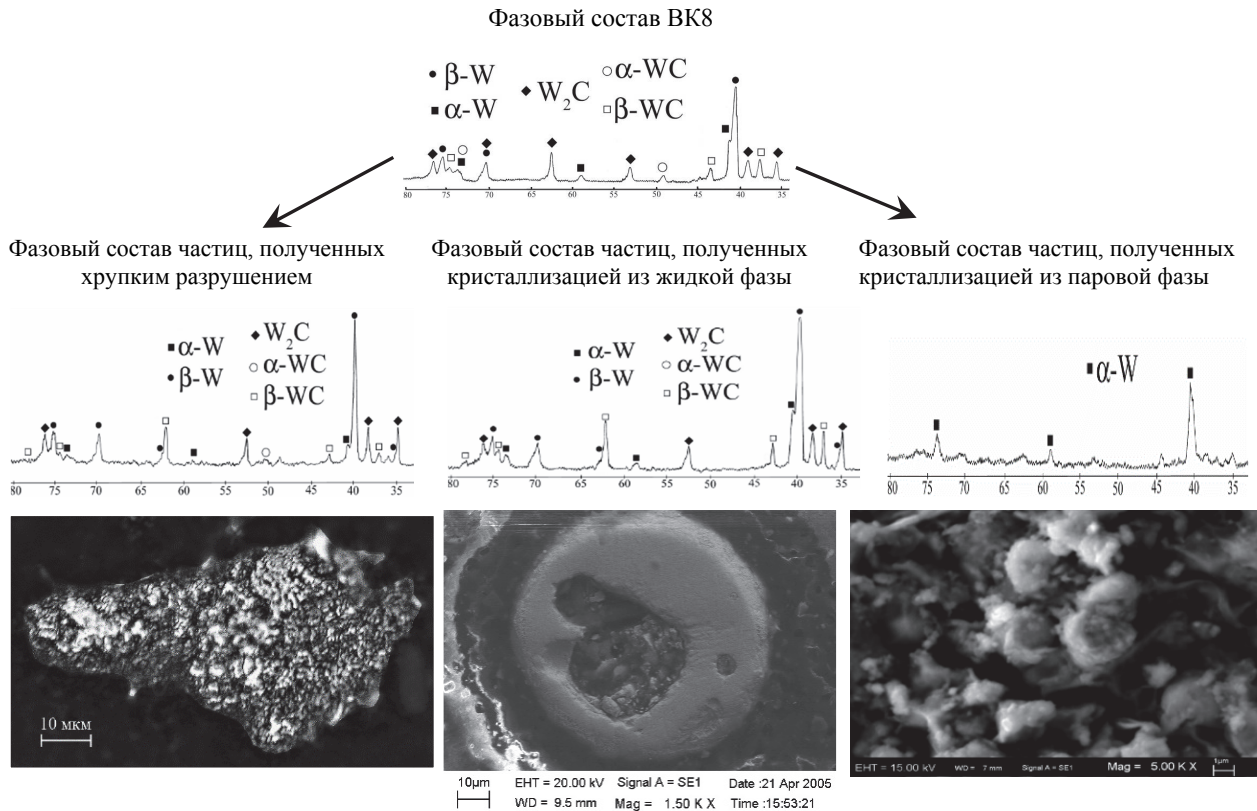


Рис. 6. Фазовый и морфологический состав порошка, полученного при реализации различных механизмов

Электроэрозионный порошок имеет широкий диапазон распределения частиц по размерам (рис. 7, а), средний диаметр частиц по их объему составляет 8,25 мкм, его удельная поверхность – 20889 см²/см³. После высушивания средний диаметр частиц порошка по их объему увеличивается до 13,30 мкм, его удельная поверхность – 14626 см²/см³ (рис. 7, б) в результате агломерации порошка, которая происходит из-за наличия адсорбированной воды и оксидной пленки на поверхности частиц.

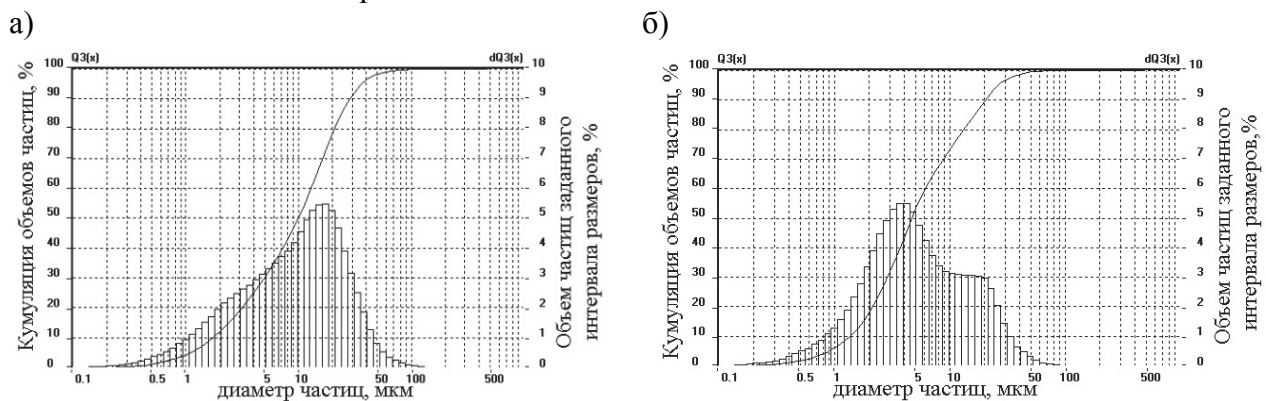
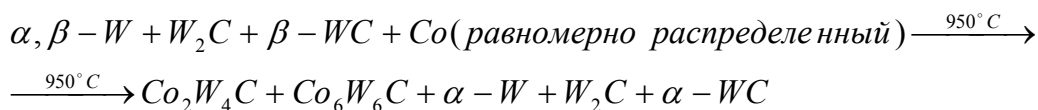


Рис. 7. Распределение по размерам объема частиц порошка, полученного электроэрозионным диспергированием (а), после высушивания (б)

Порошки, полученные при высоких скоростях охлаждения ($> 10^6$ °K/c), реализуемых при электроэрозионном диспергировании, могут фиксировать высокотемпературное состояние и образовывать метастабильные фазы. Стабилизацию фазового состава порошков осуществляли при кратковременном неизотермическом отжиге порошков в аргоне при темпера-

туре 1250 °С, в результате которого метастабильные фазы распадаются и образуются стабильные фазы (рис. 8) по следующей схеме:



а содержание углерода уменьшается с 3,6 до 2,4 % в результате его взаимодействия с кислородом, адсорбированной и кристаллизационной водой. Размер образовавшихся зерен не превышает 100 нм. Сложные кубические карбиды Co_2W_4C , Co_6W_6C (так называемая η -фаза) менее прочны, чем бинарные.

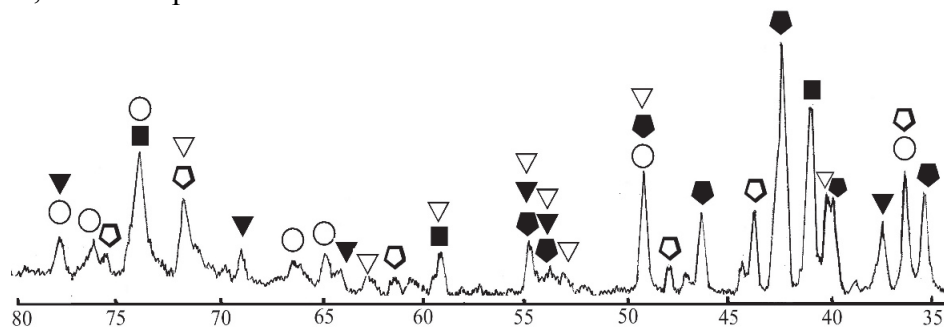


Рис. 8. Рентгенограмма порошка, полученного кратковременным отжигом при 1250 °С в аргоне:

◆ Co_2W_4C ; ◇ Co_6W_6C ; ■ $\alpha - W$; ▼ WO_2 ; ▽ $CoWO_4$; ○ $\alpha - WC$

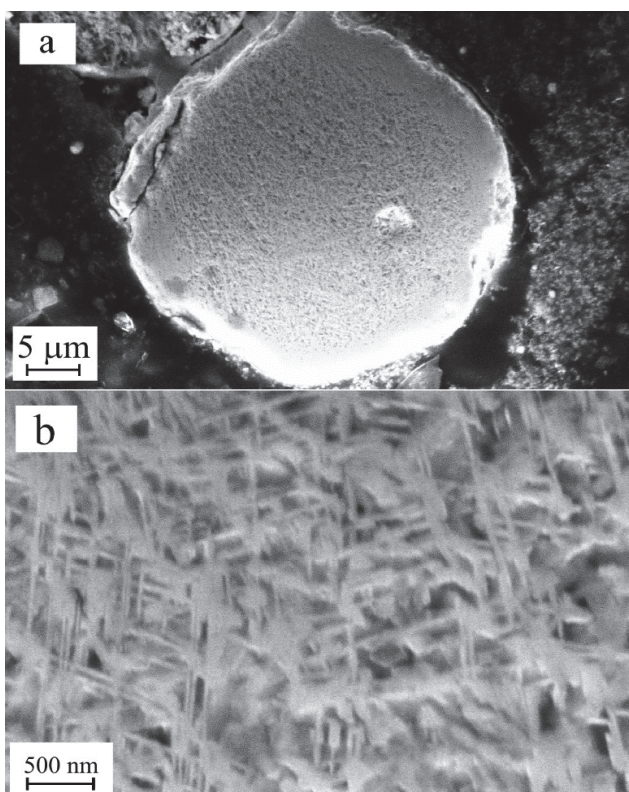


Рис. 9. Морфология карбидизированных частиц (а) и их поверхности (б)

Карбидизация при температуре 800 °С в атмосфере СО в течение 4 ч приводит к выделению кобальта из сложных кубических карбидов. Сформированный карбид вольфрама представляет собой единый непрерывный каркас, пронизывающий всю частицу, в прослойках которого располагается кобальт (рис. 9).

Фаза карбида вольфрама имеет вытянутую пластинчатую форму, связанную с различием в поверхностных энергиях плоскостей основания (001) и призмы (100) кристалла. Толщина прослоек карбида вольфрама в частице диаметром 32 мкм находится в пределах от 10 до 500 нм, что соответствует наноструктурному состоянию. Такие частицы имеют повышенную микротвердость $HV_{50} = 20$ ГПа вместо $HV_{50} = 14$ ГПа из-за меньшего размера зерен. Теоретически были оценены также механические характеристики (модуль упругости) наноразмерных частиц. Так, из первых принципов в рамках теории функционала электронной плотности и метода псевдопотенциала проведено моделирование поведения нанокластеров карбида

вольфрама порядка 2 нм в условиях сжатия и растяжения [1].

Модуль упругости массивного карбида вольфрама составляет 608 ГПа [2]. Показано, что наночастицы карбида вольфрама могут иметь тригональную и кубическую структуры.

Вычислен модуль упругости для кластеров карбида вольфрама, имеющих различную пространственную геометрию: для кубической у пространственную геометрию: для кубической структуры $W_{12}C_{12}$ модуль упругости равен $K = 2890$ ГПа, что в 4,75 раза больше, чем объемного материала; для тригональной структуры модуль упругости варьируется для $W_9C_9 - K = 560$ ГПа, для $W_{15}C_{15} - K = 1306$ ГПа и для $W_{19}C_{20} - K = 964$ ГПа. Для всех пространственных конфигураций наночастиц модуль упругости при растяжении уменьшается, а при сжатии увеличивается.

Твердый сплав, полученный из измельченного порошка WC – 8 % Co (160 мин измельчения, размер зерна 144 нм) имеет повышенную твердость (HRA = 90,5 ГПа против 87,5 ГПа у стандартного твердого сплава WC – 6 % Co) и пониженную прочность. Уменьшение дисперсности исходных порошков, а, следовательно, увеличение их удельной поверхности приводит к уменьшению толщины кобальтовых прослоек и также способствует снижению прочности. Как известно, на прочность твердых сплавов значительное влияние оказывают дефекты (поры, включения графита, вредная η -фаза, представляющая собой сложные кубические карбиды вольфрамкобальта Co_xW_yC), которые появляются при использовании традиционной технологии спекания. Поэтому вопрос о прочности субмикронных твердых сплавов остается открытым и требует дополнительных исследований.

В процессе спекания происходит рост зерен до 1-2 мкм, для предотвращения которого требуется применение интенсифицирующих методов (например, горячее изостатическое прессование), что не всегда экономически оправдано, или стабилизирующих добавок, препятствующих росту зерна. Кроме того, в процессе измельчения, хранения и транспортировки субмикронных порошков происходит их окисление, что требует дополнительных технологических операций (например, карбидизация в процессе спекания с гомогенизирующей выдержкой, позволяющая получать субмикронные твердые сплавы с минимальным количеством дефектов по традиционной технологии порошковой металлургии).

Из измельченного нанодисперсного порошка (WC – 8 % Co – 1 % Cr_3C_2 , размер зерна 144 нм) с использованием технологической схемы, включающей карбидизацию образцов в процессе спекания с гомогенизирующей выдержкой [8] были получены образцы субмикронного твердого сплава с минимальным содержанием (менее < 0,5 %) дефектов (η -фазы, пор, графита), обладающие наивысшими значениями прочности (табл. 1).

Таблица 1

Свойства полученных субмикронных твердых сплавов

Источник	Химический состав, масс. %		Прочность на изгиб, МПа	Микро-твердость, ГПа	Твердость HRA	Средний размер зерна WC (μm)
	Содержание кобальта	Ингибиторы роста зерна				
Экспериментальный сплав (BK60M)	8	1 Cr_3C_2	1640	16,8	90,5	0,8
ГОСТ 3882-74	6	-	1270	-	90,5	~1
Сплав BK10ХОМ ГОСТ 3882-74	10	0,8 Cr_3C_2	1470	-	89,0	~1
[7]	8	-	490	15,5	-	-
[3]	11	-	1470	16,1	-	0,85
[4]	10	0,7 VC/TaC	1250	18,5	-	0,35

Выводы

1. Показано, что воздействие низковольтных электрических разрядов на вещество (компактные отходы твердого сплава ВК8) приводит к разрушению материала с получением частиц вольфрамкобальтового порошка различного гранулометрического (от нескольких нанометров до 200 мкм), морфологического, фазового и химического составов, обусловленных разным механизмом образования частиц (из хрупкой, паровой, жидкой фазы).

2. Оценен предел измельчения порошка ВК8 на различных структурных уровнях: агломерат (640 нм), частица (75 нм), фаза (25 нм), зерно (18 нм).

3. Из измельченных нанодисперсных порошков твердого сплава ВК8 традиционными методами порошковой металлургии с использованием докарбидизации в процессе спекания с гомогенизирующей выдержкой получены субмикронные твердые сплавы, обладающие повышенной прочностью (1640 МПа).

ЛИТЕРАТУРА

1. Дворник, М. И. Повышение прочности и твердости субмикронного твердого сплава WC - 8 % Co – 1 % Cr₃C₂ за счет докарбидизации в процессе спекания / М. И. Дворник, А. В. Зайцев, Т. Б. Ершова // Вопросы материаловедения. – 2011. – № 4 (68). – С. 83-87.
2. Прочность на изгиб и микротвердость твердых сплавов WC-10 % Co на основе порошков разной дисперсности / А. С. Курлов, А. А. Ремпель, А. Leenaers, S. Van Der Bergh // Материаловедение. – 2009. – № 4. – С. 18-21.
3. Панов, В. С. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них / В. С. Панов, А. М. Чувилин. – М.: МИСИС, 2001. – 452 с.
4. Haglund, S. W content in Co binder during sintering of WC-Co// S. Haglund, J. Agren/ Acta Metallurgica, 1998 – vol. 45, № 6 – p. 1801-1807.
5. Mu-Jen Yang and Randall M. German. Nanophase and superfine cemented carbides processed by powder injection molding. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 1998, 16, p. 107-117.
6. Seung I. Cha, Soon H. Hong, Gook H. Ha and Byung K. Kim. Microstructure and mechanical properties of nanostructured WC-10Co cemented carbides. Scripta mater. 44 (2001) 1535–1539.
7. Zavodinsky V.G. Small tungsten carbide nanoparticles: Simulation of structure, energetics, and tensile strength. Int. Journal of Refractory Metals&Hard Materials 28(2010) 446-450.
8. [http://ru.wikipedia.org/wiki/ Карбид вольфрама](http://ru.wikipedia.org/wiki/Карбид_вольфрама)

Ри Хосен, Дзюба Г. С., Ермаков М. А., Мамонтова Е. С., Ри В. Э.
Khosen Ri, G. S. Dzyuba, M. A. Yermakov, E. S. Mamontova, V. E. Ri

МЕХАНИЗМ И КИНЕТИКА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ТРИГОНАЛЬНОГО КАРБИДА В НИЗКОХРОМИСТЫХ ЧУГУНАХ ПРИ КОМПЛЕКСНОМ МОДИФИЦИРОВАНИИ

THE MECHANISM AND KINETICS OF TRIGONAL CARBIDE CRYSTALLIZATION IN LOW-CROMIUM CAST IRON AT COMPLEX MODIFICATION



Ри Хосен – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Литейное производство и технология металлов» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск).

Mr. Ri Khosen – Dr.habil. of Engineering, Professor, Department of Foundry and Metal Technology, the Pacific National University (Russia, Khabarovsk).



Дзюба Геннадий Саввич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Литейное производство и технология металлов» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); +7-4212-77-88-13.

Mr. Gennadiy S. Dzyuba – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Foundry and Metal Technology, the Pacific National University (Russia, Khabarovsk); + 7 (4212) 778813.



Ермаков Михаил Александрович – инженер управления научно-исследовательских работ Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); +7-914-776-40-43. E-mail: equalgod88@gmail.com.

Mr. Mikahil A. Yermakov – Engineer, Directorate for Research and Development, the Pacific National University (Russia, Khabarovsk); + 7 (914) 7764043. E-mail: equalgod88@gmail.com.



Мамонтова Елена Сергеевна – аспирант кафедры «Литейное производство и технология металлов» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); +7-924-219-84-34.

Ms. Yelena S. Mamontova – PhD student, Department of Foundry and Metal Technology, the Pacific National University (Russia, Khabarovsk); + 7 (924) 2198434.



Ри Владислав Эрнстович – студент кафедры «Литейное производство и технология металлов» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); +7-914-775-24-96. E-mail: rheevl@gmail.com.

Mr. Vladislav E. Ri – undergraduate student, Department of Foundry and Metal Technology, the Pacific National University (Russia, Khabarovsk); +7 (914) 7752496. E-mail: rheevl@gmail.com.

Аннотация. В данной работе поднимаются вопросы повышения эксплуатационных параметров белых хромистых чугунов путем модифицирования. Приведены результаты исследования влияния комплексного модифицирования на формирование тригонального карбида хрома в низкохромистом чугуне. Оценка влияния производилась по результатам металлографического и микрорентгеноспектрального анализа, а также на основании полученных значений микротвёрдости структурных составляющих чугуна и его твердости.

Summary. The paper deals with the problems of improving the operational parameters of white chromium cast iron by the method of modification. It shows the research results of the effect of complex modification on the formation of trigonal chromium carbide in low chromium cast iron. The assessment of the results obtained is based on metallographic and micro-X-ray spectral analysis, as well as on the values of microhardness of the structural components of cast iron and its hardness.

Ключевые слова: низкохромистый чугун, кристаллизация, тригональный карбид, модифицирование.

Key words: low chromium cast iron, crystallization, trigonal carbide, modification.

УДК 669.14.018.256

Одними из перспективных материалов для повышения долговечности оборудования, добывающего и перерабатывающего минеральное сырье и другие материалы, являются белые хромистые чугуны, легированные никелем Ni, ванадием V, молибденом Mo и т.д. [1; 2]. Легирование хромом придает чугунам высокую абразивную стойкость благодаря присутствию в структуре карбидной составляющей – тригонального карбида $K_2(Fe,Cr)_7C_3$, коррозионную стойкость за счет легирования металлической основы хромом, жаростойкость вследствие повышения электрохимического потенциала металла и создания на поверхности отливок плотной нейтральной оксидной пленки.

Высокохромистые чугуны (15...22 мас.% Cr) являются основным материалом для изготовления быстроизнашивающихся деталей дробеметного и горнодобывающего оборудования.

Очистка расплавов высокохромистых чугунов от оксидных плен, неметаллических включений, газов является насущной задачей получения качественных отливок дробеметных аппаратов с высокими эксплуатационными свойствами. Для этих условий, как правило, применяют в качестве раскислителя и модификатора лигатуру ФЦМ-6, не содержащую кремния (мас.%: 40...50 Ce; 5...7 Mg; 18...25 La; 10...12 Nd; 5...7 Pr; не более 10 Fe). При оптимальной добавке лигатуры (0,2...0,3 мас.%) достигнута максимальная износостойкость лопастей из модифицированного чугуна на дробеметной камере 42216 производительностью 250 кг/мин: стойкость лопастей из модифицированного чугуна (0,2...0,3 мас.% ФЦМ-6) составила 60...75 ч, в то время как стойкость немодифицированных лопастей равна 20...25 ч. При этом содержание кислорода уменьшается от 0,0090 до 0,0025 мас.%; содержание серы – от 0,060 до 0,028...0,030 мас.%, а жидкотекучесть возрастает от 475 до 780 мм при температуре заливки 1450 °С.

Механические свойства модифицированного чугуна: $\sigma_{изг} = 780$ МПа; $f = 2,0$; 48 HRC в литом состоянии. Установлено, что у модифицированных чугунов больше эвтектических карбидов тригональной формы $(Fe,Cr)_7C_3$ и равномерно распределены структурные составляющие в литом и термообработанном состояниях по сравнению с исходными [1; 2].

На основании вышеизложенного следует, что для повышения эксплуатационных свойств и получения стабильного тригонального карбида K_2 в высокохромистых чугунах доэвтектического состава необходимо модифицирование их комплексными модификаторами, не содержащими кремния (ФЦМ-6).

Однако в работах [3; 4] предлагается модифицировать низкохромистый чугун (мас.%: 3,41 C; 1,8 Si; 0,642 Mn; 4,38 Cr; 0,035 P; 0,038 S) комплексным модификатором ФСМг6 (содержание мас.%: 4,4...4,8 Si; 5,5...6,5 Mg; 0,4...0,6 PЗМ; 0,5...1,0 Al; 1,0 Ca; 0,8 Fe) для

обеспечения формирования тригонального карбида при более низком содержании хрома в чугунах (3,0...5,0 мас.%). Авторами работ [3; 4] произведен расчет термодинамической оценки возможности образования карбидов хрома Cr_7C_3 в низкохромистом чугунах (4X5) и при различных вариантах его модифицирования ферросилицием (ФС-75) и комплексном модифицировании ФС50Mг-6, содержащим Si, Mg и PЗМ. По результатам расчетов были сделаны выводы о том, что в немодифицированном чугунах образование карбида Cr_7C_3 невозможно. Считают, что «... в низкохромистом чугунах, модифицированном Si и Mg, формирование карбида Cr_7C_3 в расплаве термодинамически обусловлено также лишь в начальные моменты после начала модифицирования, когда содержание кремния и магния в активных центрах превышает 2,0 % и 2,4 % соответственно. Разность значений ΔG составляет до 20 000 Дж/моль, что предполагает более высокую вероятность образования тригонального карбида при присутствии магния и кремния...» [3; 4]. Таким образом, рабочей гипотезой являлась идея об интенсификации формирования тригонального карбида K_2 путем модифицирования кремнием или кремнием и магнием.

Аргументы против такой рабочей гипотезы следующие:

– тригональный карбид $(Fe,Cr)_7C_3$ кристаллизуется при температурах ниже температуры кристаллизации аустенита, но выше температуры эвтектической кристаллизации. Согласно диаграмме Fe-C-Cr (8 мас.% Cr) [5] тригональный карбид $K_2 (Fe,Cr)_7C_3$ кристаллизуется между температурами эвтектоида и эвтектики, поэтому утверждение о том, что формирование карбида обусловлено лишь в начальные моменты времени после модифицирования, т.е. в жидком перегретом расплаве (1450 °С – температура модифицирования), не правомерно;

– в активных центрах содержание кремния и магния должно превышать 20 % и 2,4 % соответственно, что экспериментально не доказано.

Нами выдвинута рабочая гипотеза о том, что под воздействием магния и кремния, по-видимому, повышается термодинамическая активность хрома и углерода в расплаве и аустените. В связи с этим большой интерес представляет исследование ликвационных процессов в карбидных фазах (в легированном цементите и карбидах K_2) и в избыточном аустените (перлите) методом микрорентгеноспектрального анализа на современном сканирующем электронном микроскопе модели Hitachi SU-70 с приставкой энергодисперсионного анализа Termo Scientific UltraDry.

Ниже приводятся результаты этих исследований.

Исследования проводились на установке «Параболоид – 4». Чугун (мас.-%: 2,7 С; 1,2...1,4 Si; 0,5 Mn; 0,05 S и P) перегревали до 1550 °С, после выдержки в течение 5 мин вводили в расплав феррохром (ФХ025). После интенсивного перемешивания расплава последний охлаждали с постоянной скоростью 20 °С/мин до температуры 1450 °С и проводили модифицирование. Затем расплав вновь охлаждали с постоянной скоростью 20 °С/мин до температуры 500 °С. В процессе охлаждения измерялась интенсивность гамма-проникающих излучений и определялись кристаллизационные параметры. Параллельно строилась термограмма кристаллизации методом термического анализа.

На первом этапе исследовалось влияние хрома от 1,0 до 10,0 мас.%. Выбрана концентрация хрома (8 мас.% Cr), при которой еще не происходит инверсия карбидных фаз с образованием тригонального карбида $K_2 (Fe, Cr)_7C_3$.

В качестве модифицирующих добавок использовали:

– кремний содержащий комплексный модификатор ФСМг7 по ТУ 14-5-134-86 (мас.-%: 6,5...8,5 Mg; 0,2...1,0 Ca; 0,3...1,0 PЗМ; 45...55 Si; Al ≤ 1,2; ост. Fe);

– металлический иттрий.

Количество модификаторов изменялось от 0 до 0,3 мас.% через 0,05 мас.% ФСМг7 и 0,1 мас.% Y.

Исходный чугун имел графитовую эвтектику и перлитную основу. По мере повышения содержания хрома графитовая эвтектика исчезает и появляется ледебуритная эвтектика. Она постепенно исчезает, и появляется хромистая карбидная эвтектика с тригональным карбидом $K_2(Fe, Cr)_7C_3$ при содержании хрома более 10 мас. %.

Металлографический анализ показал, что при увеличении величины добавки модификатора до 0,15 мас. % включительно наблюдается общая тенденция измельчения структурных составляющих: карбидных фаз и перлитной металлической основы (см. рис. 1). При добавке модификатора 0,15 мас. % наряду с ледебуритом (А+ЛЦ), кристаллизуется тригональный карбид. При добавке 0,2 и более мас. % модификатора заканчивается полная инверсия карбидных фаз с образованием тригонального карбида K_2 и наблюдается некоторое измельчение структурных составляющих до 0,3 мас. % ФСМг6. Аналогичное структурное изменение наблюдается при модифицировании хромистого чугуна металлическим иттрием.

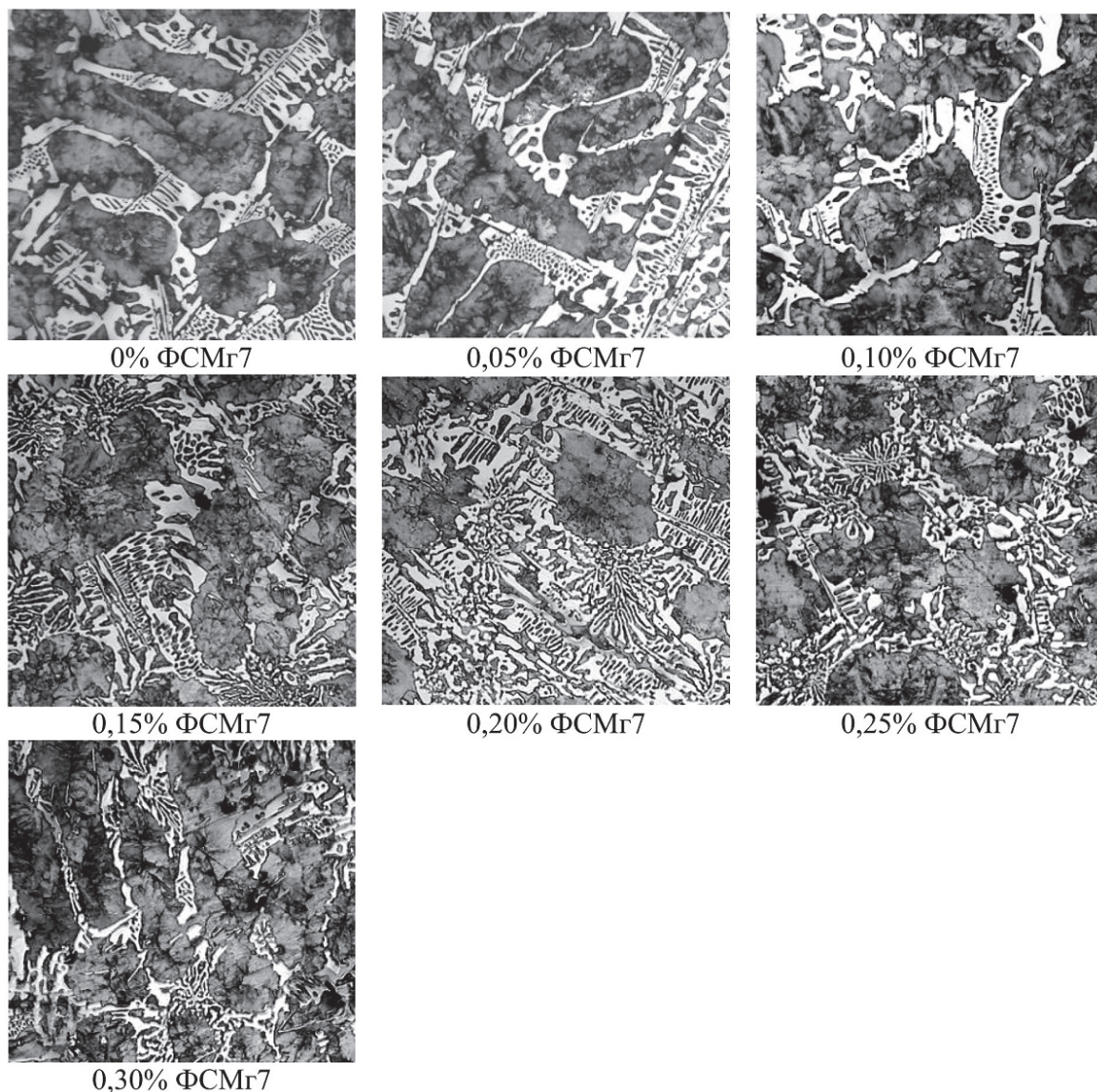


Рис. 1. Микроструктура хромистого белого чугуна в зависимости от величины добавки комплексного модификатора ФСМг7 при увеличении $\times 200$

В немодифицированном чугуне в цементитной фазе концентрируются железо Fe, хром Cr, углерод C и отсутствует кремний Si и марганец Mn (ат. %: 68,35 Fe; 13,6 Cr и 17,93 C). В металлической основе (перлит) содержится 87,8 ат. % Fe; 3,48 ат. % Cr; 4,63 ат. % C,

3,742 ат.% Si и 0,2/0,38 ат.% Mn, где числитель – среднее содержание марганца с учетом нулевого его содержания; знаменатель – среднее содержание марганца без учета нулевого его содержания. Марганец неравномерно растворяется в металлической основе. Его содержание колеблется от 0 до 0,48 ат.% (см. рис. 2, в).

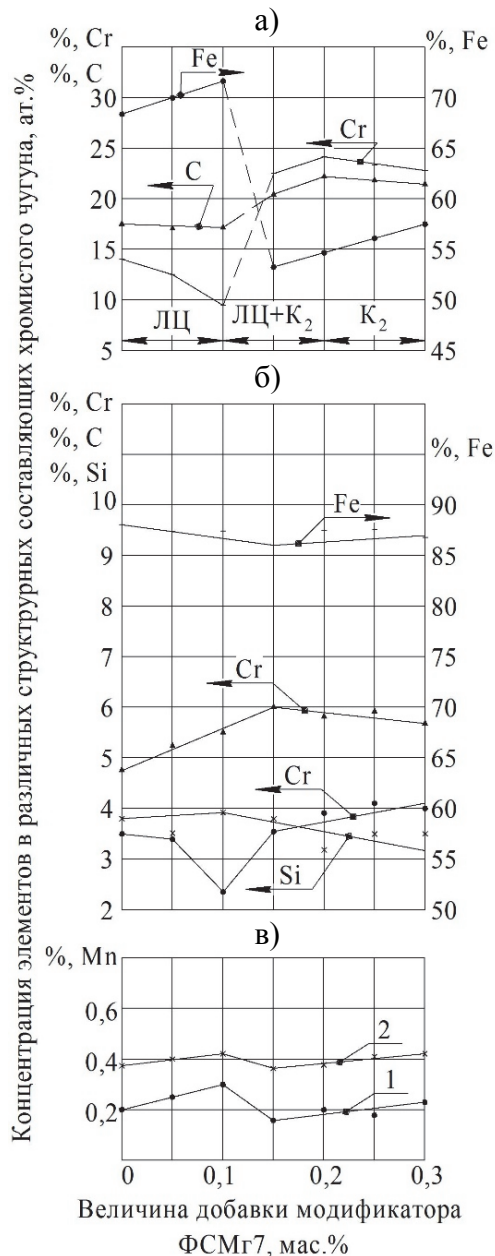


Рис. 2. Распределение элементов в карбидных фазах (а), металлической основе (б – в) хромистых чугунов, модифицированных комплексным модификатором ФСМг7: 1 – среднее содержание марганца с учетом его нулевого содержания; 2 – среднее содержание марганца без учета его нулевого содержания.

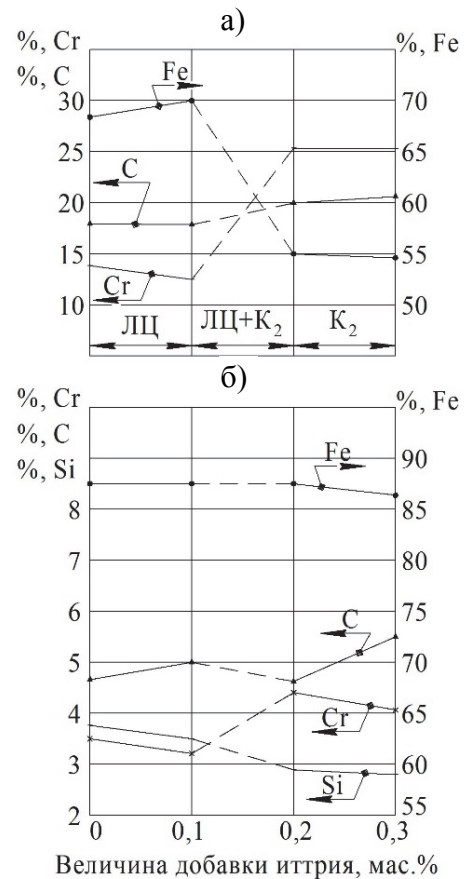


Рис. 3. Распределение элементов в карбидных фазах (а), металлической основе (б – в) хромистых чугунов, модифицированных комплексным модификатором иттрием

При обработке хромистого чугуна модификатором ФСМг7 в количестве до 0,1 мас.% содержание хрома в легированном цементите уменьшается с 13,6 ат.% до 9,84 ат.%.

(см. рис. 2, а). Следовательно, под воздействием модификатора до 0,1 мас.% содержание хрома уменьшается, а концентрация железа резко возрастает в цементитной фазе. Это означает, что термодинамическая активность хрома повышается, устойчивость легированного цементита $(Fe,Cr)_3C$ снижается и образуется повышенное количество атомов хрома и углерода в жидкой фазе перед эвтектической кристаллизацией, что должно повышать вероятность кристаллизации тригонального карбида $(Fe, Cr)_7C_3$ при дальнейшем увеличении количества модификатора до 0,15 мас.%. Происходит скачкообразный рост концентрации хрома до 22,38 ат.% и углерода приблизительно до 20 ат.%, а концентрация железа резко уменьшается до 52,86 ат.% (см. рис. 2, а). При 0,2 мас.% ФСМг7 происходит полная инверсия карбидных фаз. При дальнейшем повышении количества модификатора до 0,3 мас.% ФСМг7 в тригональном карбиде наблюдается тенденция некоторого снижения содержания хрома и углерода и повышения концентрации железа (~ на 3,0 ат.%). Стехиометрия полученной карбидной фазы K_2 не соответствует стандартному карбиду $K_2 (Fe, Cr)_7C_3 = (Fe,Cr)_{2,33}C$. Экспериментально получена карбидная фаза следующего состава, ат.%: $Fe_{52,86}Cr_{22,33}C_{20,42} = (Fe,Cr)_{75,19}C_{20,42} = (Fe,Cr)_{3,68}C$ или $(Fe,Cr)_{7,52}C_{2,040}$.

Несоответствие стехиометрического соотношения полученного тригонального карбида $K_2 (Fe,Cr)_{7,52}C_{2,04}$ стандартному стехиометрическому карбиду $K_2 (Fe, Cr)_7C_3$ обусловлено, по-видимому, неточностью определения содержания углерода методом микрорентгеноспектрального анализа.

Таким образом, начиная с величины добавки модификатора ФСМг7, равной 0,2 мас.% в чугунах, кристаллизуется тригональный карбид K_2 , т.е. происходит инверсия карбидных фаз от цементита $(Fe, Cr)_3C$ к карбиду $K_2 (Fe, Cr)_7C_3$:

- при 0,2 мас.% ФСМг7: $(Fe,Cr)_{7,8}C_{2,22} = (Fe,Cr)_{3,5}C$;
- при 0,25 мас.% ФСМг7: $(Fe,Cr)_{7,86}C_{2,12} = (Fe,Cr)_{3,7}C$;
- при 0,3 мас.% ФСМг7: $(Fe,Cr)_{7,83}C_{2,16} = (Fe,Cr)_{3,63}C$.

Следовательно, стехиометрия синтезированных тригональных карбидов K_2 остается практически без изменений при добавках 0,2...0,3 мас.% ФСМг7.

Зависимость содержания компонентов в металлической основе (перлите) от величины добавок модификатора имеет экстремальный характер изменения (см. рис. 2, б):

- при добавках до 0,15 мас.% модификатора наблюдается минимум содержания железа и максимум концентрации углерода в металлической основе;
- минимум концентрации хрома и максимум содержания кремния наблюдаются при 0,1 мас.% модификатора (2,3 ат. % Cr и ~ 4,0 ат. % Si);
- в области добавки модификатора 0,05...0,10 мас.% содержание марганца в металлической основе возрастает;
- аналогичная картина наблюдается в области добавок 0,2...0,3 мас.% ФСМг7;
- при добавке 0,15 мас.% модификатора наблюдается аномальное уменьшение содержания марганца в металлической основе (см. рис. 2, в).

Следует отметить, что изменение характера распределения элементов в карбидной фазе и металлической основе чугуна в зависимости от величины добавки модификатора должно отражаться на характере изменения твердости и микротвердости структурных составляющих (см. рис. 4, а):

- уменьшение содержания хрома в легированном цементите $(Fe,Cr)_3C$ снижает его микротвердость от 11 300 до 9600 МПа; при добавке 0,2 мас.% ФСМг7 микротвердость тригонального карбида K_2 резко возрастает до 14 500 МПа с последующим снижением ее до 13 300 МПа при 0,3 мас.% ФСМг7;
- микротвердость перлита несколько уменьшается при 0,05...0,10 мас.% ФСМг7 (4300...4500 МПа) с последующим ее ростом до 0,15...0,30 мас.% модификатора. Такой характер изменения микротвердости перлита зависит от степени его дисперсности и легирования перлитной основы компонентами чугуна (C, Si, Mn, Cr).

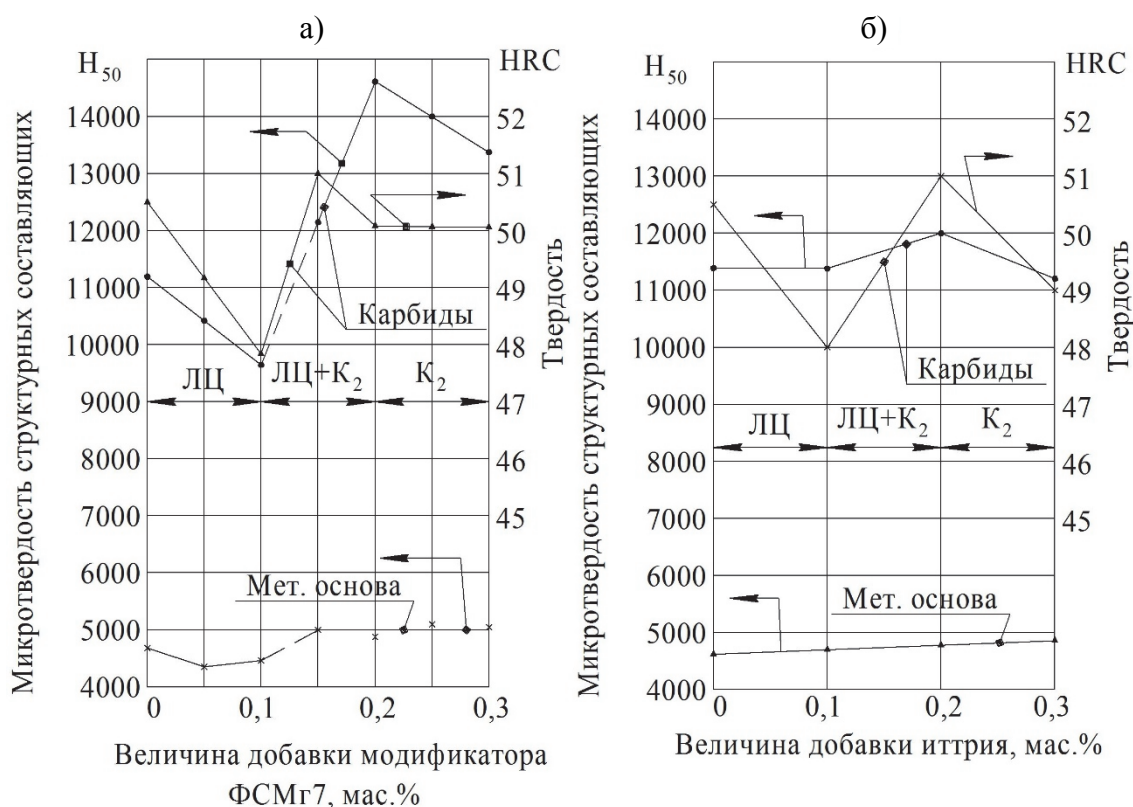


Рис. 4. Твердость (HRC) и микротвердость (H) структурных составляющих хромистого чугуна в зависимости от величины добавки модификатора:
а – ФСМг7; б – иттрия

Большой интерес для интенсификации процесса формирования тригонального карбида K_2 представляет использование модификатора, не содержащего магния Mg и кремния Si, например чистого металлического иттрия в количестве от 0 до 0,3 мас.% с интервалом 0,1 мас.% (см. рис. 3, а, б). Как видно, характер распределения хрома, углерода и железа в легированном цементите и карбиде K_2 остается таким же, как при использовании магнийкремнийсодержащей лигатуры (см. рис. 3, а).

Характер распределения элементов в металлической основе несколько изменяется при использовании металлического иттрия по сравнению с модификатором ФСМг7:

- содержание железа до 0,2 мас.% Y не изменяется, а затем уменьшается до 0,3 мас.% Y;
- содержание углерода в перлите, контактирующем с легированным цементитом и тригональным карбидом K_2 , монотонно возрастает по мере повышения добавки иттрия;
- концентрация кремния в металлической основе уменьшается по мере повышения добавки иттрия;
- содержание хрома в перлите, контактирующем с цементитом (0...0,1 мас.% Y), уменьшается, а затем скачкообразно возрастает до величины добавки 0,2 мас.% Y, при которой формируется тригональный карбид; при дальнейшем увеличении добавки иттрия до 0,3 мас.% содержание хрома слабо уменьшается (4,0...4,5 ат. % Cr).

Микротвердость структурных составляющих практически мало изменяется от величины добавки металлического иттрия, хотя при формировании тригонального карбида она возрастает (см. рис. 4, б).

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что под воздействием модифицирующих элементов (Mg, PЗМ, Y, Si и др.) происходит интенсивное рас-

кисление и рафинирование хромистого чугуна, что создает новые условия для интенсификации ликвационных процессов компонентов в различных структурных составляющих: карбидах и металлической основе (продуктах распада переохлажденного аустенита).

В немодифицированном хромистом чугуне идет интенсивное окисление хрома в процессе плавки. Обработка хромистого чугуна комплексными модификаторами ФСМг6 или ФСМг7 способствует интенсивному раскислению и рафинированию расплава, в результате чего изменяется растворимость компонентов чугуна в различных структурных составляющих. При модифицировании чугуна 0,05... 0,10 мас.% ФСМг7 растворимость хрома в первичном и эвтектическом аустените резко уменьшается вследствие более интенсивного растворения в них марганца и кремния (также углерода). Следовательно, при кристаллизации избыточного аустенита в жидкой фазе скапливается большое количество атомов хрома.

При эвтектической кристаллизации ($J \rightarrow A + (Fe, Cr)_3C$) также происходит обеднение легированного цементита атомами хрома при модифицировании до 0,1 мас.% модификатора. Таким образом, при первичной кристаллизации наблюдается скопление атомов хрома и углерода в жидкой фазе; при 0,2... 0,3 мас.% модификатора образуется тригональный карбид $K_2 (Fe, Cr)_7C_3$ с повышенной микротвердостью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ри, Х. Комплексно-легированные чугуны специального назначения / Х. Ри, Э. Х. Ри. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – 287 с.
2. Тейх, В. А. Раскисление и рафинирование чугуна / В. А. Тейх, Хосен Ри, А. Н. Тейх, Г. С. Дзюба // Литейное производство. – 1984. – № 8. – С. 10.
3. Рожкова, Е. В. Управление первичной структурой хромистого чугуна / Е. В. Рожкова, А. И. Орехова, В. Д. Белов [и др.] // Черные металлы. – 2010. – № 1. – С. 10-12.
4. Орехова, А. И. Исследование и разработка способа управления первичной структурой хромистых чугунов с помощью модифицирования с целью повышения качества отливок: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Орехова Александра Ивановна. – М., 2010. – 22 с.
5. Справочник по чугунному литью / под ред. Н. Г. Гиршовича. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. – 1978. – 758 с.

Муравьев В. И., Фролов А. В., Лончаков С. З., Мартынюк А. М., Пицик В. С.
V. I. Muravyev, A. V. Frolov, S. Z. Lonchakov, A. M. Martynuk, V. S. Pitsik

СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИ ОБРАТНОМ МАРТЕНСИТНОМ ПРЕВРАЩЕНИИ В НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ 16XCH

STRUCTURAL CHANGES IN A REVERSE MARTENSITIC TRANSFORMATION IN LOW CARBON STEEL 16XCH

Муравьев Василий Илларионович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: VMuravyev@mail.ru.

Mr. Vassily I. Muravyev – Doctor of Engineering, Professor, Chief Researcher, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: VMuravyev@mail.ru.

Фролов Алексей Валерьевич – кандидат технических наук, Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Mr. Alexei V. Frolov – PhD in Engineering, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Лончаков Сергей Зиновьевич – кандидат технических наук, главный научный сотрудник Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: s_lon54@mail.ru.

Mr. Sergey Z. Lonchakov – PhD in Engineering, Chief Researcher, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: s_lon54@mail.ru; «КнАГТУ»

Мартынюк Алексей Михайлович – начальник лаборатории «КнААЗ» (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Mr. Alexei M. Martyniuk – Head of Laboratory, KnAAZ (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Пицик Виктор Сергеевич – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: BiktopSergeevich@yandex.ru.

Mr. Viktor S. Pitsyk – PhD Candidate, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: BiktopSergeevich@yandex.ru.

Аннотация. В статье исследована эволюция структуры предварительно закалённой стали 16XCH, выявлено влияние температурно-временных условий нагрева до температуры аустенизации и определено влияние структурных изменений на свойства стали. Анализ полученных результатов показал повышение пластичности в начальный период обратного мартенситного превращения и повышение пластичности при повышенной прочности.

Summary. The paper investigates the evolution of the structure of pre-hardened steel 16XCH and reveals the effects of temperature-time conditions of heating up to the temperature of austenization; the effects of structural change upon the properties of the steel are specified. The analysis of the obtained results has demonstrated there is an increase of plasticity in the initial stage of reverse martensitic transformation, along with the increase of plasticity at the increase of strength.

Ключевые слова: низкоуглеродистая сталь, закалка, пакетно-реечный мартенсит, фазовый наклёп, физико-механические свойства, аустенит, перлит, диффузия.

Key words: low-carbon steel, hardening, packet lath martensite, phase hardening, physical mechanical properties, austenite, perlite, diffusion.

УДК 621.9.015

Введение

Эффективность использования стальных конструкций во многих отраслях машиностроения определяется их весовыми характеристиками, прочностью и надёжностью. Использование традиционных методов термической обработки деталей из низколегированных сталей не обеспечивает снижение массы из-за пониженных показателей пластичности.

Состояние предпревращения в сплавах железа позволяет резко увеличить пластичность (субкритическую сверхпластичность (СПП)), в частности, и в низкоуглеродистых сталях [1]. Процессы пластической деформации в интервале предпревращения (СПП) используются при формообразовании деталей из трудноформируемых, либо неподдающихся деформации металлов и сплавов, а также при диффузионной сварке сталей и сплавов под постоянной нагрузкой [2; 3; 4]. Деформационное упрочнение из-за сложности проведения в условиях как в интервале предпревращения, так и в аустенитной области, является мало приемлемым методом при термообработке низколегированных сталей.

Технологии интенсивной пластической деформации [5] позволяют в несколько раз повысить прочность сплавов по сравнению с традиционными видами термомеханической обработки, но показатели пластичности и вязкости разрушения при этом значительно снижаются.

В ряде работ [6; 7; 8; 9; 10] было обнаружено улучшение свойств сталей и сплавов при резком сокращении времени выдержки при температуре, превышающей A_{c3} (в интервале СПП). В работах [11; 12] приведены результаты диспергирования структуры сталей в условиях интенсивного термического воздействия при нагреве исходно закалённой стали в области температурного отпуска, межкритическом интервале температур (МКИ) и однофазной аустенитной области, что требует дополнительного легирования стали с целью снижения коэффициента активности углерода для улучшения свойств.

Влияние фазового наклёпа на свойства конструкционных сталей и сплавов [6; 7; 8; 9; 10] показывает перспективность дальнейших и дополнительных исследований.

Цель настоящей работы – исследование влияния температурно-временных условий нагрева под закалку на структурные изменения и свойства предварительно закалённой низкоуглеродистой стали 16ХСН.

Методика проведения исследований

Для исследований использовали слаболегированную проволоку $\varnothing 6$ мм из стали 16ХСН с предварительным отжигом на зернистый перлит.

Химический состав стали представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав стали

Сталь	Содержание элементов в %								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe	Не более		
							S	P	W
16ХСН	0,18	0,76	0,493	1,097	0,679	Ост.	0,0086	0,0057	0,146
по ТУ	0,12...0,20	0,6...0,9	0,3...0,6	0,8...1,1	0,6...0,9	Основа	0,030	0,035	0,2

Температуры критических точек стали составляли: $A_{c1} - 730$ °С, $A_{c3} - 885$ °С, $A_{R3} - 803$ °С, $A_{R1} - 650$ °С.

Нагрев образцов до температуры аустенизации производился в расплаве солей 50% NaCl+50% KCl со средней скоростью 700 °С/с. Температура аустенизации превышала температуру точки « A_{c3} » на 50 °С в связи с зависимостью температуры критических точек от скорости нагрева [13]. Выдержка отсчитывалась с момента загрузки образца в расплав солей с температурой аустенизации 930 ± 5 °С. Закалка осуществлялась в проточной подсоленной воде с температурой 4 °С.

Химический состав определялся с помощью оптико-эмиссионного спектрометра BRUKER Q4 TASMAN 170. Микрорентгеноспектральный анализ распределения легирующих элементов в структуре образцов производили на сканирующем электронном микроскопе

НІТАСНІ VP-SEMS-3400N. Испытание на одноосное растяжение со скоростью 15,5 мкм/с на стандартных цилиндрических образцах с длиной рабочей части 50 мм по ГОСТ 1497-84 проводили на испытательной машине INSTRON 3382. Определение твёрдости осуществляли на твердомере Rockwell hardness tester ТН300 по методу Роквелла по ГОСТ 9013-59. Определение микротвёрдости выполняли на микротвердомере Shimadzu НМV-2TE по ГОСТ 9450-76 с использованием четырёхгранной пирамидки с квадратным основанием, длительностью приложения нагрузки 5 с. Исследование микроструктуры проводили на оптическом микроскопе Planar micro 2000.

Расчёт потенциала Гиббса (E_g), характеризующего внутреннюю энергию материала, выполнялся на основании результатов измерения микротвёрдости при различных нагрузках и экстраполяции удельной величины энергетических затрат на нулевую нагрузку. Удельные энергетические затраты складываются из удельной свободной энергии исходного состояния (условного потенциала Гиббса) μ_0 и приращения удельной работы пластической деформации при оттеснении материала во время вдавливания индентора μ_g :

$$\mu = \mu_0 + \mu_g = 6,004 \cdot \frac{P}{d^2},$$

где P – усилие вдавливания, Н; d – средняя длина диагонали отпечатка.

Для определения потенциала Гиббса в работе анализировались результаты измерения микротвёрдости при нагрузках 0,1; 0,2; 0,5; 1 и 2 Н.

Результаты исследований

Нагрев предварительно закалённой стали 16ХСН до температуры 400...500 °С и быстрое охлаждение в холодной воде не приводит к существенным изменениям структуры пакетно-речного мартенсита и границ зерна (рис. 1, а, б, в). Увеличение выдержки при нагреве до 2...3 с и быстрое охлаждение практически также не приводит к существенному изменению структуры пакетно-речного мартенсита за исключением появления еле заметных его малоугловых границ (рис. 2, а, б, в). Существенное изменение в структуре стали наблюдается при выдержках 3...7 с и 8...20 с. В первом случае (рис. 3, а, б, в) происходит превращение пакетно-речного мартенсита в перлит, а во втором – превращение перлита в аустенит и образование пакетно-речного мартенсита при охлаждении (рис. 4, а, б, в).

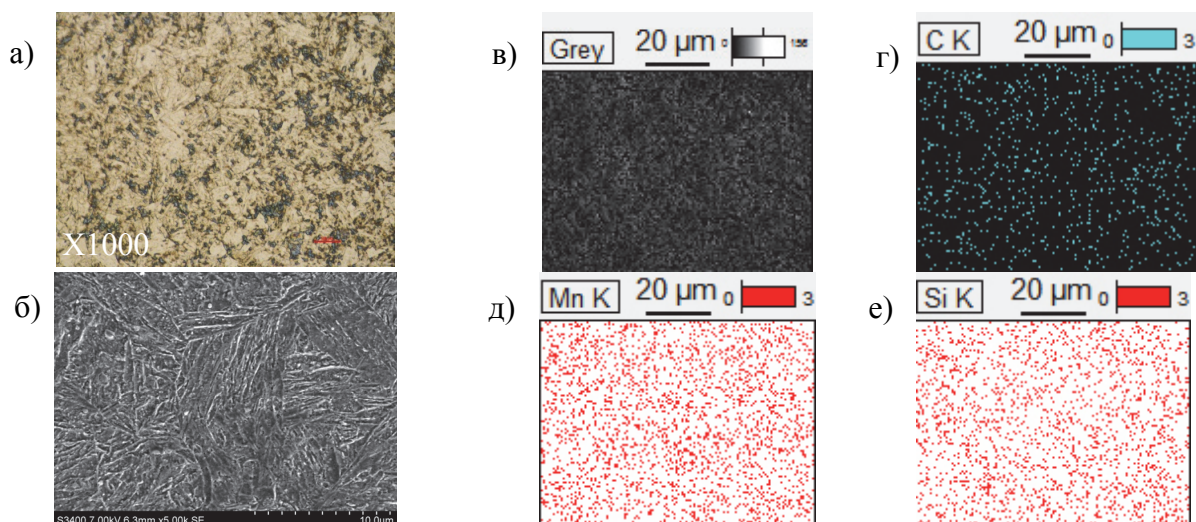


Рис. 1. Изменение структуры стали 16ХСН (а, б, в) и карты распределения легирующих элементов в структуре углерода (г), марганца (д), кремния (е) в зависимости от времени выдержки при нагреве до температуры 930 °С и охлаждении в холодной проточной воде до 1 с

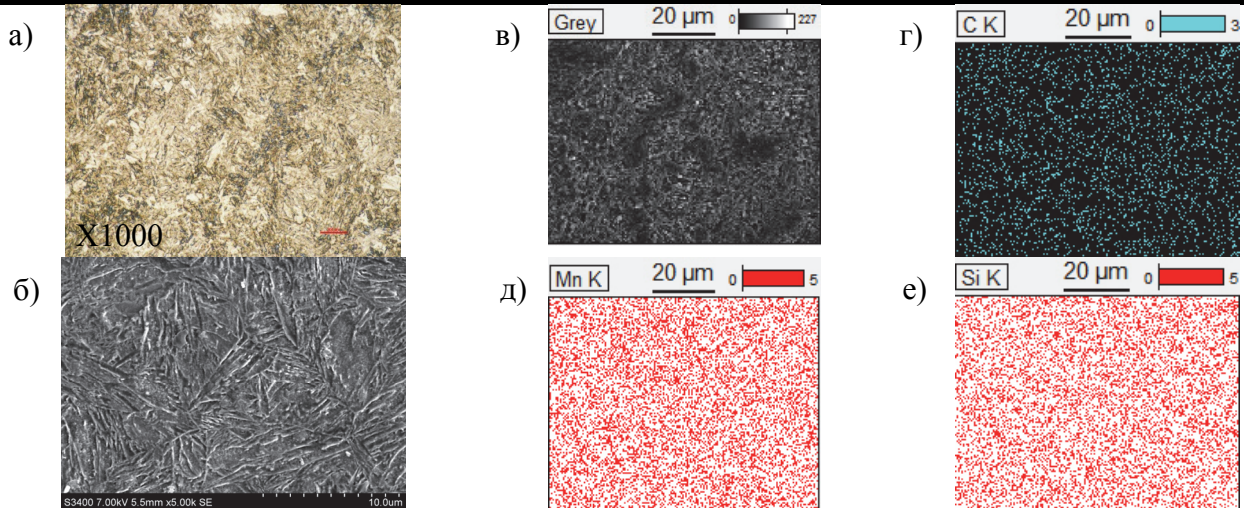


Рис. 2. Изменение структуры стали 16XCH (а, б, в) и карты распределения легирующих элементов в структуре углерода (г), марганца (д), кремния (е) в зависимости от времени выдержки при нагреве до температуры 930 °С и охлаждении в холодной проточной воде 2 с

Результаты исследований изменения значений механических свойств и внутренней энергии по расчётному потенциалу Гиббса (E_f) в зависимости от выдержки образцов при нагреве до температуры аустенизации показали, что кинетика процессов имеет сложную зависимость (см. табл. 2).

Если значение микротвёрдости достаточно точно отражает структурные изменения, то изменение внутренней энергии значительно отличается от значений микротвёрдости, особенно в первоначальный момент нагрева до температуры 400...500 °С и последующего быстрого охлаждения. Микротвёрдость стали во всём диапазоне выдержек при аустенизации и последующем охлаждении имеет два максимума в начальный и конечный моменты и соответствует микротвёрдости закалённой стали, а минимум соответствует отожжённому состоянию.

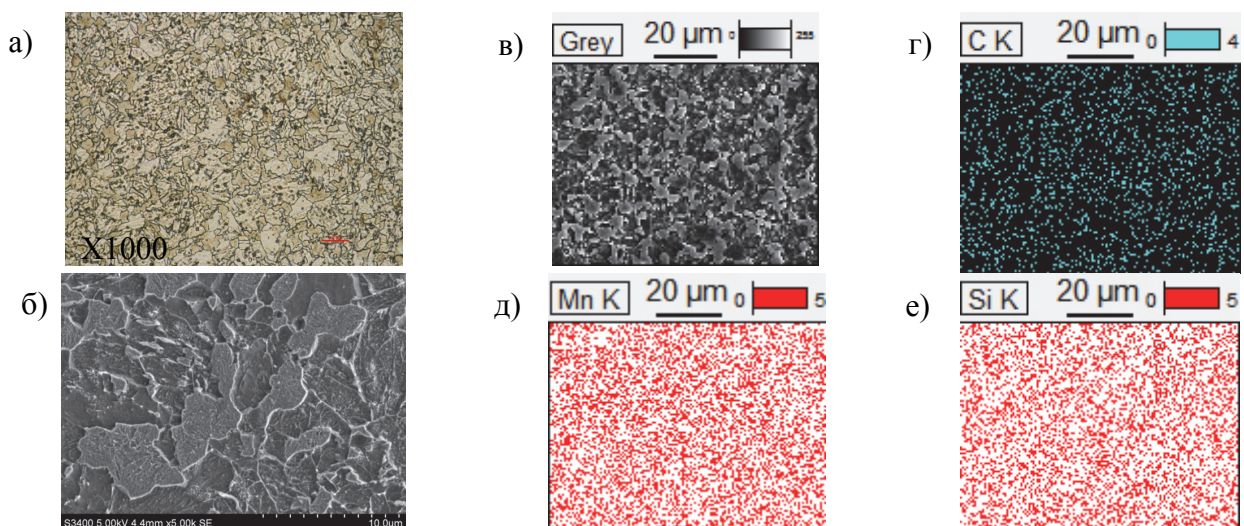


Рис. 3. Изменение структуры стали 16XCH (а, б, в) и карты распределения легирующих элементов в структуре углерода (г), марганца (д), кремния (е) в зависимости от времени выдержки при нагреве до температуры 930 °С и охлаждении в холодной проточной воде 7 с

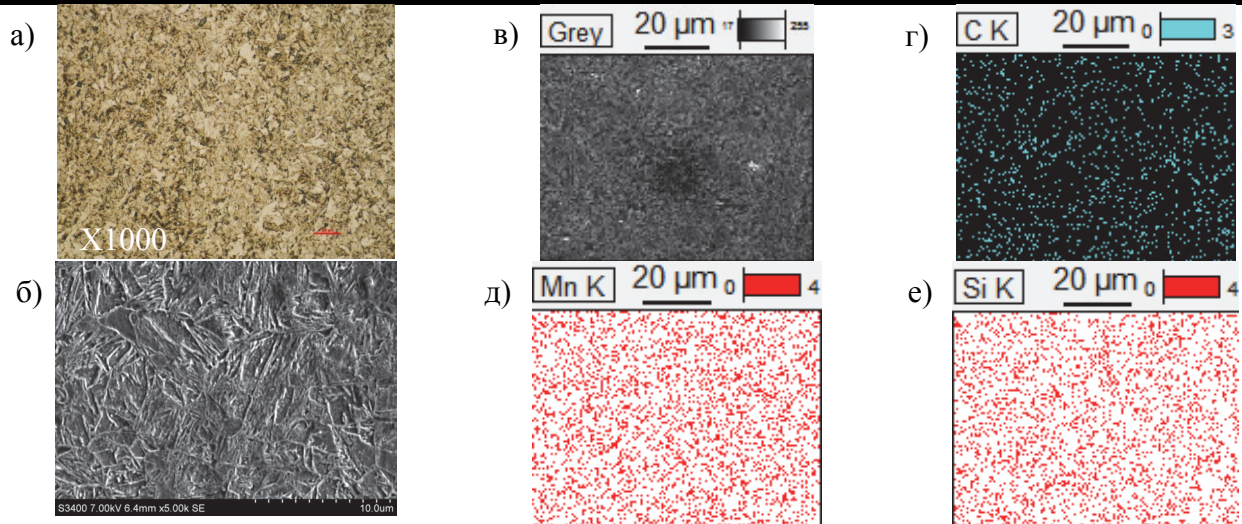


Рис. 4. Изменение структуры стали 16XCH (а, б, в) и карты распределения легирующих элементов в структуре углерода (г), марганца (д), кремния (е) в зависимости от времени выдержки при нагреве до температуры 930 °С и охлаждении в холодной проточной воде 15 с

Изменение механических свойств и модуля Юнга в зависимости от времени выдержки образцов при аустенизации согласуется в большей степени со значениями внутренней энергии и значительно отличается от значений микротвёрдости.

Как видно из данных, кратковременная выдержка при нагреве предварительно закалённых образцов до температур 400...500 °С и быстрое охлаждение приводят к резкому снижению прочности более чем на 50 % и значительному увеличению пластичности более чем на 40 %, при этом модуль Юнга уменьшился в среднем на 20 % по сравнению с закалкой при выдержке 15 с. При этом пакетно-реечный мартенсит не претерпел никаких изменений и по структуре и значениям микротвёрдости соответствует закалённому состоянию (см. рис. 1, а, б, в; табл. 2).

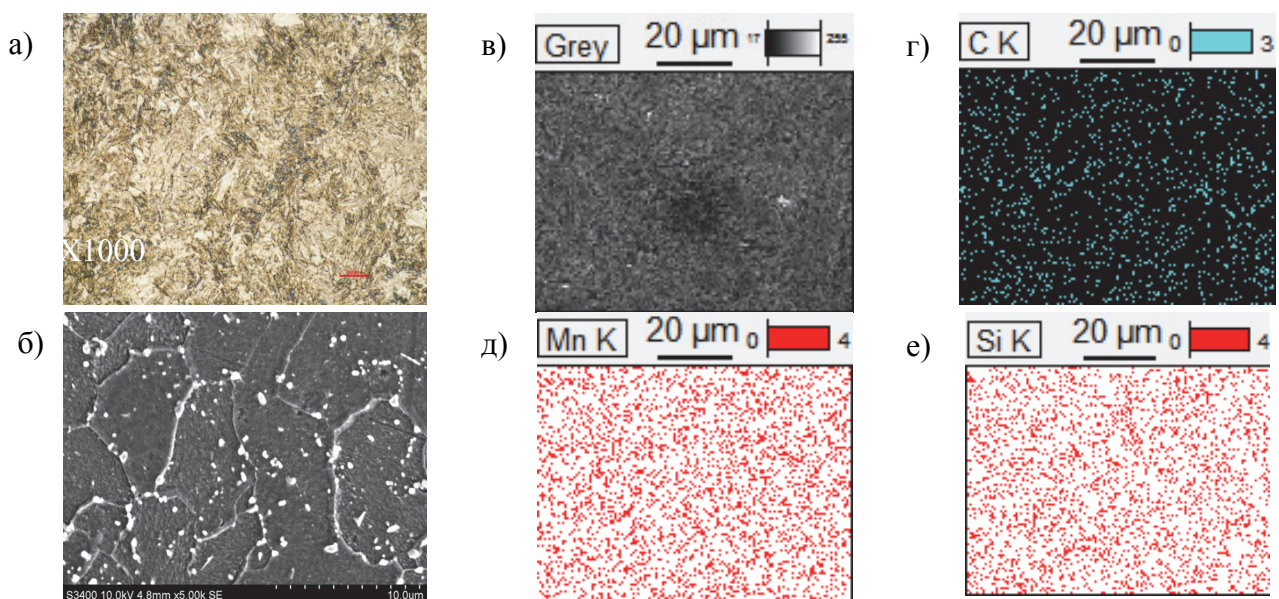


Рис. 5. Изменение структуры стали 16XCH (а, б, в) и карты распределения легирующих элементов в структуре углерода (г), марганца (д), кремния (е) при нагреве до температуры 930 °С (исходный отожжённый образец)

Изменение механических свойств и внутренней энергии Гиббса
предварительно закалённой стали 16XCH в зависимости от времени выдержки
при нагреве до температуры аустенизации и охлаждения

Выдержка при нагреве, с	Номер образца	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	Модуль Юнга $E \times 10^2$, МПа	Энергия Гиббса $E_f \times 10^{13}$, Па	Hv
До 1	4	631	389	40	66	1750	878	452
2...3	5	1374	771	14	67	3050	1277	470
5	6	1164	570	16	55	2596	1023	373
7	7	687	530	11	62	1510	867	307
10	8	1210	790	11	56	2860	1282	481
15	9	1485	820	12	60	3520	1510	508

Дальнейшее увеличение выдержки при нагреве до температуры аустенизации до 2...3 с и охлаждении в воде приводит к полному восстановлению свойств для закалённого состояния. Последующее увеличение выдержек от 3 до 7 с приводит к свойствам стали, характерным для отожжённого состояния, что соответствует окончанию превращения мартенсита в перлит. Выдержки от 8 до 20 с ведут к превращению образовавшегося перлита в аустенит, который в процессе охлаждения в воде превращается в пакетно-речный мартенсит, и свойства соответствуют закалённому состоянию (см. рис. 3, а, б, в; табл. 2).

Обсуждение результатов исследования

В узком временном отрезке при температуре аустенизации в закалённой низколегированной углеродистой стали наблюдается комплекс фазовых превращений: пакетно-речного мартенсита – в перлит; перлита – в аустенит; аустенита – в пакетно-речный мартенсит при быстром охлаждении. Каждый вид фазового превращения соответствует строго определённому временному интервалу, фиксируемому при скоростном охлаждении до окружающей температуры. В ранее проведённых исследованиях использовались скорости нагрева стали от 10 °C/c, 50 °C/c, 100 °C/c, 200 °C/c [1; 4; 6, 12]. Известно, что изменение кинетики и механизма полиморфных превращений определяется скоростью нагрева как функции температуры [14]. При этом умеренные скорости нагрева (10...100 К/с) смещают полиморфное превращение к высоким температурам, а большие (1000 К/с) меняют его механизм.

В первые доли секунды достаточно высокая скорость нагрева (700 °C/c) предварительно закалённой стали приводит к повышенной диффузионной подвижности атомов, особенно атомов углерода (температура 400...500 °C). В этих условиях протекают начальные процессы перераспределения и уменьшения концентрации дефектов фазового наклёпа (сверхравновесной) путём аннигиляции и стока к дислокациям и границам субзёрен и зёрен, не сопровождающихся образованием новых границ. Свидетельство тому – резкое снижение внутренней энергии материала (потенциал Гиббса E_f уменьшается практически в 1,5 раза (см. табл. 2) и ослабление энергии межзёренной и межфазовой связи (модуль Юнга уменьшается (см. табл. 2)). При этом сохраняется структура пакетно-речного мартенсита без изменения границ зёрен и пакетов (см. рис. 1, а, б, в).

В дальнейшем фазовое превращение пакетно-речного мартенсита сопровождается процессом полигонизации [15]. Увеличение выдержки до 2...3 с приводит к ещё большей диффузионной подвижности атомов (температура аустенизации 930 °C), идёт интенсивный процесс образования и движения малоугловых дислокационных субграниц. В структуре, сформировавшейся в результате полигонизации (рис. 2, а, б, в), наблюдается значительное уменьшение протяжённости мартенситных рек и образование новых малоугловых границ. Упорядочение структурной неоднородности исключением неравновесной концентрации

дефектов фазового наклёпа и последующий процесс полигонизации структуры пакетно-реечного мартенсита приводят к максимальным значениям прочности и пластичности низкоуглеродистых сталей.

Выдержка более 3 с сопровождается процессом рекристаллизации – превращения пакетно-реечного мартенсита в феррито-перлитную структуру, которая заканчивается при выдержке 7...8 с, о чём свидетельствует значительное уменьшение внутренней энергии материала при образовании зернистого перлита из упорядоченного пакетно-реечного мартенсита (см. рис. 3, *а, б, в*). При этом механические свойства низкоуглеродистой стали соответствуют отожжённому состоянию, но с увеличением пластичности. Последующая выдержка при аустенизации ведёт к превращению зернистого перлита в аустенит, превращающийся при охлаждении в пакетно-реечный мартенсит (см. рис. 4, *а, б, в*).

Общее распределение химических элементов в структуре предварительно закалённой стали в зависимости от времени выдержки при температуре аустенизации качественно показано на рис. 1 – 5.

Микрорентгеноспектральным анализом распределения химических элементов в структуре стали чётко прослеживается последовательность фазовых превращений в зависимости от времени выдержки при температуре аустенизации и последующем охлаждении. При скоростном нагреве до температуры 400...500 °С характерным признаком является распределение углерода и легирующих элементов вблизи первичных границ зёрен и незначительно вдоль границ реек мартенсита (см. рис. 1, *з, д, е*). В дальнейшем при выдержке 2...3 с наблюдается равномерное распределение углерода и легирующих элементов по всему полю металла в соответствии с пакетно-реечным мартенситом, причём идентично с распределением легирующих элементов после полной аустенизации 15 с и закалки (см. рис. 2, *з, д, е*; рис. 4, *з, д, е*). Выдержка при температуре аустенизации 7...8 с приводит к равномерному распределению легирующих элементов по всему полю ферритно-перлитной структуры металла и идентична распределению в структуре отожжённого исходного металла (см. рис. 3, *з, д, е*; рис. 5, *з, д, е*).

Выводы

Фазовый наклёп (предварительная закалка) оказывает существенное влияние на эволюцию структуры и свойства низколегированных сталей в процессе нагрева со скоростью 700 °С/с до температуры аустенизации во временном интервале как предпревращения, так и превращений, фиксируемых быстрым охлаждением.

Обратное превращение пакетно-реечного мартенсита в условиях фазового наклёпа и повышенной диффузионной подвижности атомов углерода в первоначальный момент (выдержка доли секунды, температура 400...450 °С) приводит к резкому, более чем в два раза, уменьшению прочности и повышению пластичности более чем на 40 %, при этом структура пакетно-реечного мартенсита сохраняется неизменной, внутренняя энергия уменьшается в 1,5 раза, наблюдается ослабление энергии межзёренной и межфазной связи, модуль Юнга уменьшается более чем на 20 %, что свидетельствует о процессах перераспределения и уменьшения концентрации дефектов фазового наклёпа сверх равновесной. Наблюдается эффект повышенной пластичности при обратном мартенситном превращении.

В дальнейшем, при температуре аустенизации (выдержка 2...3 с), наступает равновесное состояние и полигонизация пакетно-реечного мартенсита, прочность достигает исходного состояния, а пластичность увеличивается, наблюдается эффект повышения пластичности при сохранении прочности.

Процесс рекристаллизации заканчивается (выдержка 7...8 с) превращением пакетно-реечного мартенсита в перлит. Структура и свойства соответствуют отожжённому состоянию. С этого момента начинается процесс превращения перлита в аустенит, который заканчивается при выдержке 15...20 с и при охлаждении в воде превращается в пакетно-реечный мартенсит и остаточный аустенит. Структура пакетно-реечного мартенсита более мелкозернистая по сравнению с исходной закалкой, прочность и пластичность значительно выше.

Полученные результаты требуют дальнейших исследований по использованию выявленных эффектов повышенной пластичности и прочности для повышения надёжности конструкций из низколегированных сталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуляев, А. П. Состояние предпревращения в сплавах железа / А. П. Гуляев // МиТОМ. – 1991. – № 6. – С. 7-10.
2. Люшинский, А. В. Диффузионная сварка разнородных материалов / А. В. Люшинский. – М.: Академия, 2006. – 208 с.
3. Муравьёв, В. И. Активация процессов формирования соединений из металлов и сплавов / В. И. Муравьёв, П. В. Бахматов, П. А. Саблин. – Владивосток: Дальнаука, 2012. – 366 с.
4. Влияние размера зерна и деформационной субструктуры аустенита на кристаллогеометрические особенности бейнита и мартенсита низколегированных сталей / Н. Ю. Золотаревский, А. А. Зисман, С. Н. Панкурин, Ю. Ф. Титовец, С. А. Голосиенко, У. И. Хлусова // МиТОМ. – 2013. – № 10. – С. 39-48.
5. Терентьев, В. Ф. Сопротивление усталости сплавов титана и железа с субмикроструктурной и наноструктурой / В. Ф. Терентьев // МиТОМ. – 2007. – № 10. – С. 21-28.
6. Пикеринг, Ф. Б. Физическое материаловедение и разработка сталей / Ф. Б. Пикеринг; пер. с англ. – М.: Металлургия, 1982. – 184 с.
7. Определение эффективности использования фазовых превращений в технологических операциях изготовления конструкций из сталей и сплавов методом акустической эмиссии / В. И. Муравьёв, А. В. Фролов, Э. А. Дмитриев, О. В. Башков, Е. А. Тарасов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Науки о природе и технике. – 2011. – № III-1(7). – С. 91-100.
8. Муравьёв, В. И. Обеспечение надёжности конструкций из титановых сплавов / В. И. Муравьёв, П. В. Бахматов, Б. И. Долотов. – М.: «Эком», 2009. – 752 с.
9. Использование эффектов аустенитного предпревращения и превращения при термической обработке конструкционных сталей / В. И. Муравьёв, А. В. Фролов, А. В. Кириков, А. М. Мартынюк // Вопросы материаловедения. – 2012. – № 3. – С. 7-14.
10. Муравьёв, В. И. Управление дефектной структурой сплавов на границе фазовых превращений с использованием метода акустической эмиссии / В. И. Муравьёв, А. В. Фролов. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2013. – 219 с.
11. Заяц, Л. Ц. Диспергирование структуры сталей в условиях интенсивного термического воздействия. Часть 1. Выбор оптимальной системы легирования / Л. Ц. Заяц, Д. О. Панов, Ю. Н. Симонов // МиТОМ. – 2010. – № 11. – С. 13-19.
12. Заяц, Л. Ц. Диспергирование структуры сталей в условиях интенсивного термического воздействия. Часть 2. Исследования влияния системы легирования на эволюцию структуры при аустенизации / Л. Ц. Заяц, Д. О. Панов, Ю. Н. Симонов // МиТОМ. – 2010. – № 11. – С. 20-25.
13. Зимин, Н. В. О влиянии температуры, скорости нагрева и исходного состояния структуры углеродистых сталей на процессы образования в них аустенита / Н. В. Зимин // Металлообработка. – 2006. – № 1. – С. 41-47.
14. Малюков, С. Т. Научно исторический обзор / С. Т. Малюков, Ю. А. Скаков, М. А. Штремель // Научные школы МСИиС: 75 лет становления и развития / под ред. Ю. С. Карабасова. – М.: МИСиС, 1997. – 628 с.
15. Горелик, С. С. Рекристаллизация и предрекристаллизационные процессы в неорганических материалах и их классификация / С. С. Горелик // Научные школы МСИиС: 75 лет становления и развития / под ред. Ю. С. Карабасова. – М.: МИСиС, 1997. – 628 с.

Сысоев О. Е., Макаренко С. В., Кузнецов Е. А., Серёгин С. В.
O. Ye. Sysoyev, S. V. Makarenko, Ye. A. Kuznetsov, S. V. Seregin

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

THE LIFETIME DURABILITY OF STRUCTURAL MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING AT A CYCLIC LOAD

Сысоев Олег Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, декан факультета кадастра и строительства Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; +7 (4217) 241-141. E-mail: fks@knastu.ru.

Mr. Oleg Ye. Sysoyev – Dr.habil. of Engineering, Professor, Dean of the Faculty of Cadastre and Civil Engineering, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Ave., Komsomolsk-on-Amur, 681013; +7 (4217) 241141. 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, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; +7 (4217) 537-914. 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 (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Ave., Komsomolsk-on-Amur, 681013; +7 (4217) 537914. E-mail: makapehko@list.ru

Кузнецов Егор Александрович – аспирант кафедры «Строительство и архитектура» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, 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 (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Ave., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: workegor@mail.ru.

Серёгин Сергей Валерьевич – старший преподаватель кафедры «Строительство и архитектура» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); +7(914)1725083. E-mail: Seregin-komsHome@yandex.ru.

Mr. Sergey V. Seregin – Senior Lecturer, Department of Civil Engineering and Architecture, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); +7 (914) 1725083. E-mail: Seregin-komsHome@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрена задача определения долговечности конструкционных материалов в условиях программного изменения интенсивности напряжений при различных траекториях циклического нагружения.

Summary. The paper investigates the problem of assessing the lifetime durability of structural materials under the conditions of scheduled alteration of stress intensity at different trajectories of cyclic load.

Ключевые слова: долговечность, конструкционные материалы, циклические нагружения, траектории нагружений.

Key words: lifetime durability, structural materials, cyclic load, load trajectory.

УДК 539.3:534.2

Элементы строительных конструкций в процессе их эксплуатации часто подвергаются воздействию циклических напряжений, изменяющихся во времени по любому закону с различными параметрами циклов. Для количественной оценки несущей способности и долговечности таких элементов конструкций необходимо, как показывают полученные результаты исследований, учитывать влияние форм и параметров циклов изменения напряжений.

Для этого была разработана комплексная программа исследований долговечности материалов (см. рис. 1), которая предусматривала проведение экспериментов при программном нагружении по различным траекториям механического малоциклового нагружения в условиях плоского напряжённого состояния. Процесс нагружения в точке упругопластически деформируемого тела происходил в плоскости двумерного вектора напряжений (см. рис. 1). Уравнение такой траектории нагружения имеет вид

$$\vec{S} = S_1 \cdot \vec{i}_1 + S_3 \cdot \vec{i}_3 = S(t),$$

где S_1, S_3 – компоненты вектора напряжений.

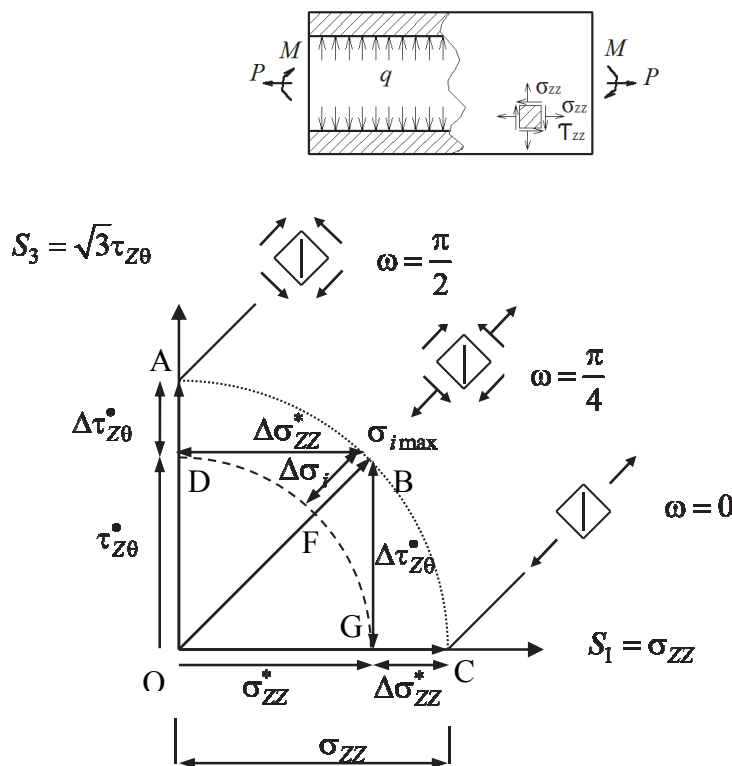


Рис. 1. Траектории циклического нагружения

Такое напряжённое состояние, характеризуемое компонентами тензора напряжений $\sigma_{zz}(t) \neq 0$ и $\tau_{z\theta}(t) \neq 0$, создавалось в тонкостенном цилиндрическом образце, который подвергался растяжению и кручению ($N = N(t)$; $M_{кр} = M_{кр}(t)$).

Данная программа исследования позволяла создавать в материале плосконапряжённое состояние при пропорциональном (по траектории $0 \rightarrow D \leftrightarrow B$, $0 \rightarrow F \leftrightarrow B$ на рис. 1) и сложном (по траектории $0 \rightarrow G \leftrightarrow B$, $0 \rightarrow D \leftrightarrow B$ на рис. 1) циклическом нагружении ($\Delta\sigma_i = \sigma_{i\min} \leftrightarrow \sigma_{i\max}$). При этом вектор напряжений $S(t)$ в каждую единицу времени совпадает с вектором $\vec{\sigma}_i(t)$:

$$\vec{\sigma}_i(t) = \sqrt{3}\tau_{z\theta}(t) \cdot \vec{i}_3 + \sigma_{zz}(t) \cdot \vec{i}_1 = S(t),$$

конец которого описывает соответствующую траекторию нагружения в пространстве напряжений. При этом установлено, что долговечность материала при данных ω^* и α зависит от формы и параметров циклов изменения интенсивности напряжений, а при данной программе циклического нагружения – от вида напряжённого состояния ($\omega^* = \alpha$, на рис. 2 пропорциональная траектория $0 \rightarrow Q \leftrightarrow Z$) и сложности траекторий нагружения ($\omega^* \neq \alpha$, на рис. 2 сложная траектория $0 \rightarrow Q \leftrightarrow H$). Здесь ω^* и α – соответственно углы, характеризующие направление вектора напряжений $\sigma_i(t)$ до и после его излома.

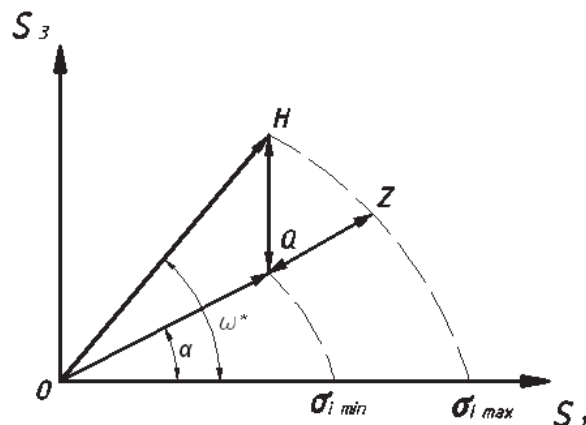


Рис. 2. Зависимость углов ω^* и α от направления вектора напряжений $\sigma_i(t)$ в пространстве напряжений

Исследования долговечности ряда материалов (сталь 40X, 14X17H2,) проводились в условиях программного изменения интенсивности напряжений ($\bar{\gamma}_{\sigma_i} + \bar{\bar{\gamma}}_{\sigma_i} + \tilde{\gamma}_{\sigma_i} = 1$) при различных траекториях.

Здесь ω_s^* и α – соответственно углы, характеризующие направление вектора напряжений $[\sigma_i(t)]$ до и после его излома [1; 2].

В работах [3; 4] также показано, что интенсивность накопления пластических деформаций, а также долговечность материалов при прочих равных условиях зависят от пути циклического нагружения.

На рис. 3 показано влияние программы изменения интенсивности напряжений ($\bar{\gamma}_{\sigma_i}$, $\bar{\bar{\gamma}}_{\sigma_i}$) и сложности траектории нагружения на относительную долговечность стали 14X17H2.

При этом оставались постоянными $\sigma_{i \min}$, $\Delta\sigma_i$, ω_s^* . Пространство между поверхностями 1 и 2 представляет геометрическое место точек, соответствующих времени до разрушения материала в условиях циклического нагружения при любой форме цикла изменения σ_i при данных $\sigma_{i \min}$, $\Delta\sigma_i$, ω_s^* , но различных значениях α . Влияние сложности процесса нагружения в данном случае характеризуется функцией влияния (Φ), определяемой как отношение времени до разрушения материала при данном ω_s^* и различных значениях α ($0 \dots \pi/2$) ко времени до разрушения при тех же ω_s^* и $\alpha = 0$, все остальные параметры ($\sigma_{i \min}$, $\Delta\sigma_i$, ω_s^* , $\bar{\gamma}_{\sigma_i}$, $\bar{\bar{\gamma}}_{\sigma_i}$) в данном случае сохраняются постоянными, т.е.

$$\frac{t_p(\alpha)}{t_p(\alpha=0)} = \Phi(\alpha) \leq 1,$$

где

$$\Phi(\alpha) = \left[\frac{1}{\bar{\Phi}} + \left(\frac{\tilde{\Phi} - \bar{\Phi}}{\tilde{\Phi} \cdot \bar{\Phi}} \cdot \bar{\gamma}_{\sigma_i} + \frac{\tilde{\Phi} - \bar{\Phi}}{\tilde{\Phi} \cdot \bar{\Phi}} \bar{\gamma}_{\sigma_i} \right) \right]^{-1},$$

$$\tilde{\Phi} = \tilde{t}_{P^{**}} / \tilde{t}_{P^*}; \quad \bar{\Phi} = \bar{t}_{P^{**}} / \bar{t}_{P^*}; \quad \bar{\bar{\Phi}} = \bar{\bar{t}}_{P^{**}} / \bar{\bar{t}}_{P^*},$$

здесь $\tilde{t}_{P^{**}}, \bar{t}_{P^{**}}, \bar{\bar{t}}_{P^{**}}$ – время до разрушения материала соответственно при циклическом изменении интенсивности напряжений по программе $\tilde{\gamma}_{\sigma_i} = 1$, в условиях изотермической ползучести при $\sigma_{i \max} = \text{const}$ и при $\sigma_{i \min} = \text{const}$, при $\omega_s^* = 0, \alpha = 90^\circ$; $\tilde{t}_{P^*}, \bar{t}_{P^*}, \bar{\bar{t}}_{P^*}$ – то же, но при $\omega_s^* = \alpha = 0$.

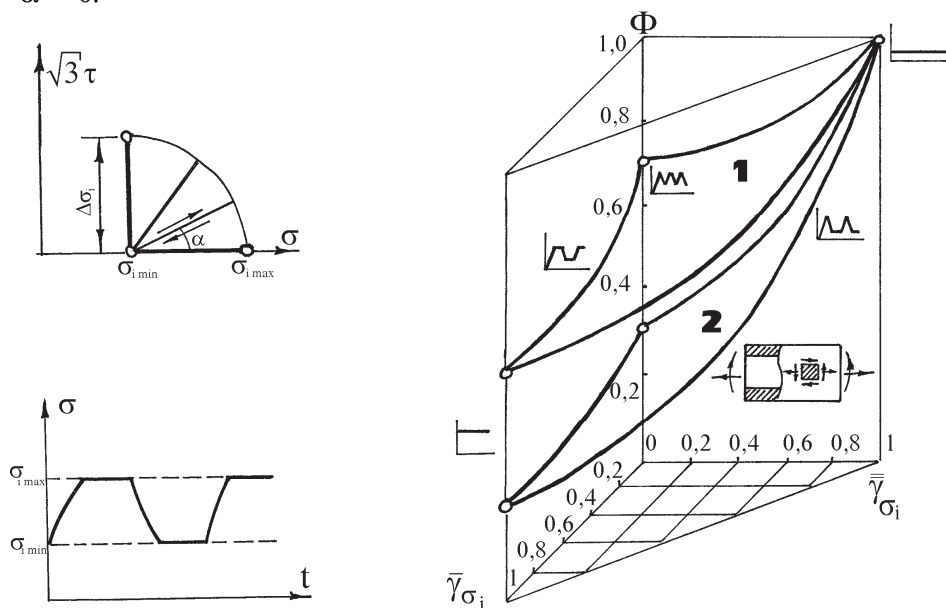


Рис. 3. Предельные поверхности по долговечности стали 14X17H2 при $\sigma_i = 220 \leftrightarrow 300$ МПа при $\omega_s = 0$: 1 – при $\alpha = 0$; 2 – при $\alpha = 90^\circ$

На рис. 4 показаны предельные поверхности долговечности стали 14X17H2 с учётом программы и сложности траектории нагружения ($\omega_s^* = 0$ и $\alpha = 0 \dots \pi/2$), построенные по нижеприведённым формулам:

для поверхности 1 ($\bar{\gamma}_{\sigma_i} + \tilde{\gamma}_{\sigma_i} = 1$):

$$\Phi(\alpha, \tilde{\gamma}_{\sigma_i}) = \left[1 + \frac{1 - [\Omega_1(\alpha)]^{\frac{2\alpha}{\pi}}}{[\Omega_1(\alpha)]^{\frac{2\alpha}{\pi}}} \cdot \tilde{\gamma}_{\sigma_i} \right]^{-1}; \quad (1)$$

для поверхности 2 ($\bar{\gamma}_{\sigma_i} + \tilde{\gamma}_{\sigma_i} = 1$):

$$\Phi(\alpha, \tilde{\gamma}_{\sigma_i}) = [\Omega_2(\alpha)]^{\frac{2\alpha}{\pi}} \cdot \left[1 - \frac{[\Omega_1(\alpha)]^{\frac{2\alpha}{\pi}} - [\Omega_2(\alpha)]^{\frac{2\alpha}{\pi}}}{[\Omega_1(\alpha)]^{\frac{2\alpha}{\pi}}} \cdot \tilde{\gamma}_{\sigma_i} \right]^{-1}, \quad (2)$$

где $\Omega_1 = \tilde{t}_{P^*}(\tilde{\gamma}_{\sigma_i} = 1, \alpha = \pi/2) / \tilde{t}_{P^*}(\tilde{\gamma}_{\sigma_i} = 1, \alpha = 0)$; $\Omega_2 = \bar{\bar{t}}_{P^*}(\tilde{\gamma}_{\sigma_i} = 1, \alpha = \pi/2) / \bar{\bar{t}}_{P^*}(\tilde{\gamma}_{\sigma_i} = 1, \alpha = 0)$.

Для построения данной поверхности (см. рис. 4) с помощью формул (1) и (2) необходимо располагать минимумом базовых экспериментов: временем до разрушения материала в условиях изотермической ползучести при минимальной ($\bar{\gamma}_{\sigma_i} = 1$), максимальной ($\bar{\gamma}_{\sigma_i} = 1$) интенсивности цикла напряжений и чистой цикличности ($\tilde{\gamma}_{\sigma_i} = 1$) при $\omega_s^* = \alpha = 0$ и при $\omega_s^* = 0, \alpha = 90^\circ$.

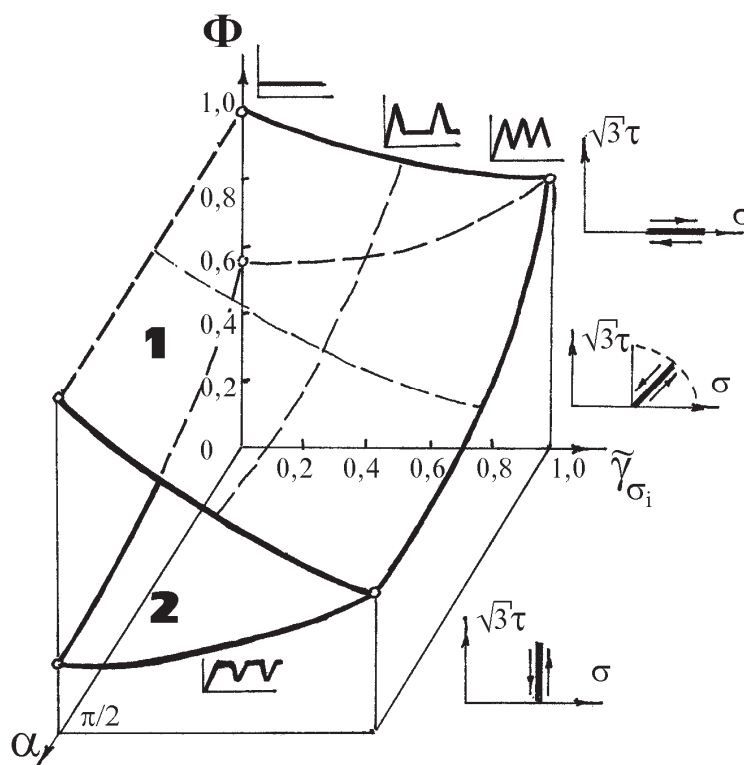


Рис. 4. Предельные поверхности стали 14X17H2
при $\sigma_i = 220 \leftrightarrow 300$ Мпа: 1 – при $\bar{\gamma}_{\sigma_i} + \tilde{\gamma}_{\sigma_i} = 1$; 2 – при $\bar{\gamma}_{\sigma_i} + \tilde{\gamma}_{\sigma_i} = 1$

Из приведённых обобщённых диаграмм по долговечности следует, что для одного и того же материала при одних тех же значениях $\sigma_{i \min}$, $\Delta\sigma_i$, ω_s^* и T , но различных углах излома вектора напряжения α предельные диаграммы существенно отличаются.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сысоев, О. Е. Исследование влияния параметров траектории циклического нагружения на длительную прочность конструкционных материалов / О. Е. Сысоев // Заготовительные производства в машиностроении. – 2012. – № 3. – С. 57-64.
2. Сысоев, О. Е. Критерии предельных состояний материалов при циклических режимах нагружения: моногр. / О. Е. Сысоев. – Владивосток: Дальнаука, 2010. – 107 с.
3. Наместников, В. С. Ползучесть дюралюмина в условиях сложного напряженного состояния // Прикладная математика и техническая физика. – 1960. – № 4. – С. 90-95.
4. Nozue Y., Tudoguchi, Asada Y., Mitsuhashi S. An experimental study of cyclic stain induced creep, relationship between different modes of stress and strain superposition. – Adv. Res. Strength and Fracture Materials. – 1977. – № 2. – P. 767-775.

Сокачев А. В., Сысоев О. Е., Марьин Б. Н., Тарасов В. А., Шпорт Р. В., Старцев С. В.
A. V. Sokatchev, O. Ye. Sysoyev, B. N. Maryin, V. A. Tarasov, R. V. Shport, S. V. Startsev

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТОНКОСТЕННОГО КОМПОЗИТНОГО СТЕРЖНЯ ЗАМКНУТОГО КОНТУРА ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

DETERMINIGN STRESS CONDITIONS OF A THIN-WALLED COMPOSITE ROD WITH A CLOSED CROSS-SECTION BOUNDARY

Сокачев Алексей Валентинович – генеральный директор ЗАО «СТРОЙСТАЛЬ» (Россия, Комсомольск-на-Амуре); +7(909)8640475. E-mail: stroistal55@mail.ru.

Mr. Aleksey V. Sokachev – Director General, ZAO “STROYSTAL” (Russia, Komsomolsk-on-Amur); +7 (909) 8640475. E-mail: stroistal55@mail.ru.

Сысоев Олег Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, декан факультета кадастра и строительства Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); +7(4217) 241-141. E-mail: fks@knastu.ru.

Mr. Oleg Ye. Sysoyev – Dr.habil. of Engineering, Professor, Head of the Department of Cadastre and Civil Engineering, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); +7 (4217) 241141. E-mail: fks@knastu.ru.

Марьин Борис Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Машиностроение и металлургия» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 8(914)177-87-55. E-mail: maryinsb@mail.ru.

Mr. Boris N. Maryin – Dr.habil. of Engineering, Professor, Department of Mechanical Engineering and Metallurgy, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); +7 (914) 778755. E-mail: maryinsb@knastu.ru.

Тарасов Владимир Алексеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии ракетно-космического машиностроения» Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана (Россия, Москва); 8(967)-229-97-66. E-mail: tarasov_va@mail.ru.

Mr. Vladimir A. Tarasov – Dr.habil. of Engineering, Professor, Head of the Department of Rocket and Space Engineering, N.E.Baumann Moscow State Technical University (Russia, Moscow); 8 (967) 2299766. E-mail: tarasov_va@mail.ru.

Шпорт Роман Вячеславович – кандидат технических наук, заместитель первого вице-президента по производству ЗАО «Гражданские самолеты Сухого» (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: R_Shport@scac.ru.

Mr. Roman V. Shport – PhD in Engineering, Deputy First Vice-President, ZAO “Sukhoi Civil Aircrafts” (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: R_Shport@scac.ru

Старцев Сергей Владимирович – магистр кафедры «Машиностроение и металлургия» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); +7(914)1786650. E-mail: startsevsv@mail.ru.

Mr. Vladimir S. Startsev – MA of Engineering, Department of Mechanical Engineering and Metallurgy, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); +7(914)1786650. E-mail: startsevsv@mail.ru.

Аннотация. Изложена методика определения нормальных и касательных напряжений в тонкостенном композитном стержне. Представлен подход для определения продольных напряжений в стержне с произвольной формой сечения. Рассмотрен частный случай определения нормальных напряжений в стержнях круглого сечения.

Summary. The paper sets forth a method for determining normal and shear stresses in a thin-walled composite rod. We suggest a technique for measuring the axis stress in an arbitrary section-shape rod. We consider the special case of determining normal stresses in round-shaped rods.

Ключевые слова: тонкостенный стержень, нормальные и касательные напряжения, композит, труба.

Key words: thin-walled rod, normal and shear stresses, composite, pipe.

УДК 629.7:539.4

Тонкостенные стержни делятся на две системы: с открытым и закрытым контуром поперечного сечения, который в свою очередь подразделяется на одно- и многозамкнутый. В частности, к открытым относятся изделия, изготовленные из листа и профилей, к закрытым – изделия из труб различного поперечного сечения. Рассмотрим стержневую теорию удлиненных оболочек постоянной конструкции, т.е. для тонкостенных стержней, длина которых значительно больше размеров поперечного сечения, при этом отсутствуют резкое изменение жесткости изделия, дополнительные элементы по длине, вырезы.

Тонкостенные стержни воспринимают изгибающие моменты, поперечные силы и крутящие моменты, как балки. В большинстве случаев в строительстве конструкции подкрепляются стальной арматурой.

Определение нормальных напряжений

Выражение для продольных нормальных напряжений запишем в виде

$$\delta_z = B(\omega' + \theta_x' y + \theta_y' x), \quad (1)$$

где B – продольная жесткость.

Продольная жесткость B для стержней, воспринимающих осевое усилие, у которых угол армирования не превышает $10 \dots 15^\circ$, вычисляется по формуле

$$B = \frac{E_z}{1 - \nu_{zs} \nu_{sz}},$$

где E_z – модуль Юнга; ν_{zs} и ν_{sz} – коэффициенты Пуассона вдоль и поперек волокон соответственно.

В физических соотношениях

$$\begin{aligned} M_x &= S_x \omega' + D_x \theta_x' + D_{xy} \theta_y', \\ M_y &= S_y \omega' + D_{xy} \theta_x' + D_y \theta_y', \\ M_z &= C_y (u' + \theta_y) + C_x (v' + \theta_x) + D \theta_z', \\ N &= S_z \omega' + S_x \theta_x' + S_y \theta_y', \\ Q_x &= K_x (u' + \theta_y) + K_{xy} (v' + \theta_x) + C_x \theta_z', \\ Q_y &= K_{xy} (u' + \theta_y) + K_y (v' + \theta_x) + C_y \theta_z' \end{aligned} \quad (2)$$

параметр S_z является осевой упругостью стержня, а параметры S_x , S_y и D соответствуют статическим моментам и моментам инерции поперечного сечения. В частности, если по формулам

$$\begin{aligned} x_0 &= S_y / S_z, \\ y_0 &= S_x / S_z \end{aligned}$$

ввести параметры, аналогичные координатам центра тяжести поперечного сечения, то из четвертого равенства (2) найдем

$$\omega' = \frac{N}{S_z} - (y_0\theta'_x + x_0\theta'_y). \quad (3)$$

Подставляя выражение (3) в 1-е и 2-е соотношения (2), решим их относительно θ'_x и θ'_y :

$$\theta'_x = \frac{k}{D_x^0} (\bar{M}_x - n_y \bar{M}_y), \quad \theta'_y = \frac{k}{D_y^0} (\bar{M}_y - n_x \bar{M}_x). \quad (4)$$

В равенствах (4) введены следующие обозначения:

$$k = \frac{1}{1 - n_x n_y}, \quad n_x = \frac{D_{xy}^0}{D_x^0}, \quad n_y = \frac{D_{xy}^0}{D_y^0},$$

$$\bar{M}_x = M_x - y_0 P, \quad \bar{M}_y = M_y - x_0 P, \quad (5)$$

$$D_x^0 = D_x - y_0^2 S, \quad D_y^0 = D_y - x_0^2 S, \quad D_{xy}^0 = D_{xy} - x_0 y_0 S.$$

Равенства (5) аналогичны формулам для моментов инерции поперечного сечения относительно центральных осей. Окончательно (с учетом выражений (3), (4)) формула для продольных напряжений (1) принимает вид

$$\delta_z = B(s) \left[\frac{N}{S_z} + k \left(\frac{\bar{M}_x}{D_x^0} \bar{y} + \frac{\bar{M}_y}{D_y^0} \bar{x} \right) \right], \quad (6)$$

где $\bar{x} = x - x_0 - n_x (y - y_0)$; $\bar{y} = y - y_0 - n_y (x - x_0)$.

Полученные формулы соответствуют произвольной форме поперечного сечения. Если оно имеет одну ось симметрии, например ось OX (см. рис. 1, а), то в физических соотношениях (2) имеем $S_x = 0$, $D_{xy} = 0$. Тогда $y_0 = 0$; $D_{xy}^0 = 0$; $D_x^0 = D_x$; $n_x = n_y = 0$; $k = 1$ и равенство (6) упрощается следующим образом:

$$\delta_z = B \left[\frac{N}{S_z} + \frac{M_x}{D_x} y + \frac{\bar{M}_y}{D_y^0} (x - x_0) \right].$$

Для сечения, имеющего две оси симметрии (см. рис. 1, б) дополнительно $S_y = 0$;

$$x_0 = 0; \quad D_y^0 = D_y \quad \text{и} \quad \delta_z = B \left[\frac{N}{S_z} + \frac{M_x}{D_x} y + \frac{M_y}{D_y} x \right].$$

В частности, для круглого стержня, если углы армирования и толщины всех слоев композита не изменяются вдоль контура сечения ($B = \text{const}$), имеем $x = R \sin \beta$, $y = R \cos \beta$,

$$S_z = 2\pi R B h, \quad D_x = D_y = \pi B R^3 h \quad \text{и} \quad \delta_z = \frac{1}{2\pi h R} \left[N + \frac{2}{R} (M_x \cos \beta + M_y \sin \beta) \right].$$

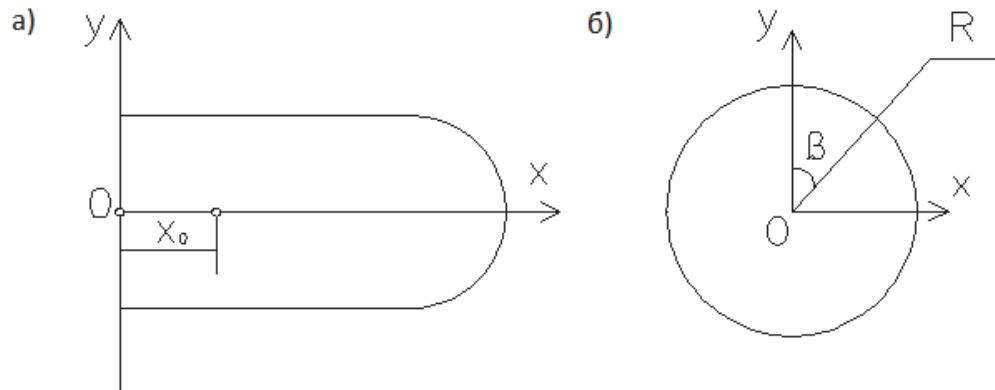


Рис. 1. Поперечное сечение с одной (а) и двумя (б) осями симметрии

Определение касательных напряжений

В теории изгиба и кручения тонкостенных стержней предполагается, что нормальные и касательные напряжения распределены по толщине стенки равномерно и касательные напряжения τ сводятся к потоку касательных напряжений $q = \tau h$, который часто называют потоком касательных сил.

Для определения потока касательных напряжений выделим из стержня элемент с размерами $dSdz$ (см. рис. 2) и рассмотрим его равновесие, считая, что поверхностная нагрузка в направлении оси z отсутствует, т.е. продольная сила для данного участка постоянна ($N = \text{const}$).

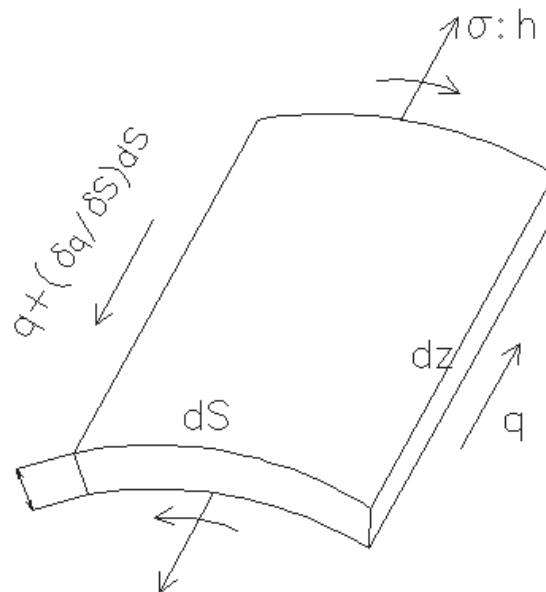


Рис. 2. Элемент стенки стержня

Спроектируем все действующие силы на ось z :

$$\left(\delta_z + \frac{\partial \delta_z}{\partial z} dz \right) h dS - \delta_z h dS + \left(q + \frac{\partial q}{\partial S} dS \right) dz - q dz = 0,$$

откуда после очевидных преобразований получим

$$\frac{\partial \delta_z}{\partial z} h + \frac{\partial q}{\partial S} = 0$$

и после интегрирования по S

$$q = - \int_0^S \frac{\partial \delta_z}{\partial z} h ds + q_0(z), \quad (7)$$

где $q_0 = q(S=0)$ – поток в точке $S=0$.

Ввиду того, что контур сечения является замкнутым, для вычисления интеграла в формуле (7) необходимо выбрать начало координат S (см. рис. 3), причем произвольность выбора этой точки компенсируется потоком q_0 .

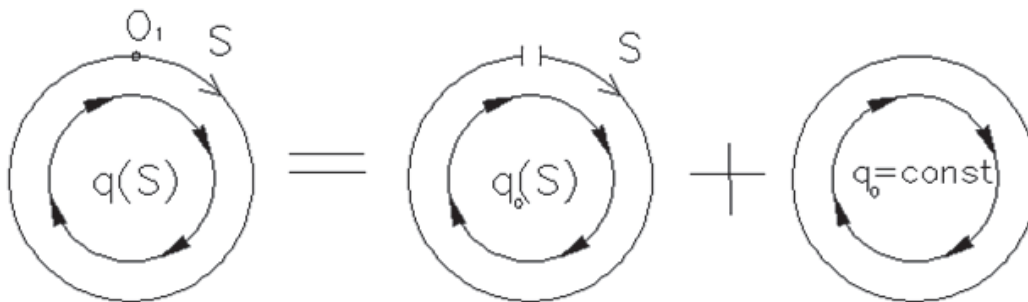


Рис. 3. Составляющие потока касательных напряжений

Выражение (7) можно представить в виде

$$q = q_Q + q_0, \quad (8)$$

где

$$q_Q = - \int_0^S \frac{\partial \delta_z}{\partial z} ds. \quad (9)$$

Поскольку $q_Q(S=0) = 0$, а q_0 не зависит от S , то равенство (8) допускает наглядную физическую интерпретацию (см. рис. 3), основанную на том, что в стержне с продольным разрезом поток касательных напряжений на краю сечения обращается в нуль. Действительно, в силу парности касательных напряжений поток, действующий по краю BC (см. рис. 4), равен нулю в точке B , если продольный край AB свободен от нагрузки. Таким образом, при вычислении потока q_Q удобно считать, что контур условно разрезан в точке O_1 (см. рис. 3). Тогда постоянный поток q_0 можно считать компенсирующим этот условный разрез.

Подставляя в равенство (9) выражение для нормальных напряжений (6) и учитывая, что в нем от z зависят \bar{M}_x и \bar{M}_y , получим

$$q_Q = -k \left[\frac{M'_x}{D_x^0} \bar{S}_x(s) + \frac{M'_y}{D_y^0} \bar{S}_y(s) \right],$$

где $\bar{S}_x(s) = \int_0^s h \bar{B}_y dS$, $\bar{S}_y(s) = \int_0^s h \bar{B}_x dS$.

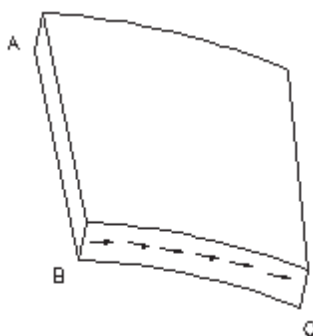


Рис. 4. Элемент стержня со свободным концом

Функции $\bar{S}_x(s)$ и $\bar{S}_y(s)$ соответствуют статическим моментам отсеченной части сечения (отсчет от разреза) относительно осей OX и OY .

Отметим, что если в стержне есть продольные элементы, то $\bar{S}_x(s)$ и $\bar{S}_y(s)$ вычисляются с учетом этих элементов.

Учитывая, что $M'_x = Q_y$, $M'_y = Q_x$ и $N = \text{const}$, окончательно получим

$$q_Q = -k \left[\frac{Q_y}{D_x^0} \bar{S}_x(s) + \frac{Q_x}{D_y^0} \bar{S}_y(s) \right].$$

Знаки \bar{S}_x и \bar{S}_y зависят от знаков координат \bar{x}, \bar{y} и принятого начала отсчета координат S . Составляющая q_Q порождается поперечными силами, и ее знак определяется знаками поперечных сил Q_x , Q_y и обобщенных статических моментов \bar{S}_x , \bar{S}_y . При этом положительный поиск касательных напряжений q_Q совпадает с выбранным направлением обхода контура, а отрицательный поиск принимается в противоположном направлении. Таким образом, распределение потока касательных напряжений по контуру поперечного сечения определяется по формуле

$$q = -k \left[\frac{Q_y}{D_x^0} \bar{S}_x(s) + \frac{Q_x}{D_y^0} \bar{S}_y(s) \right] + q_0. \quad (10)$$

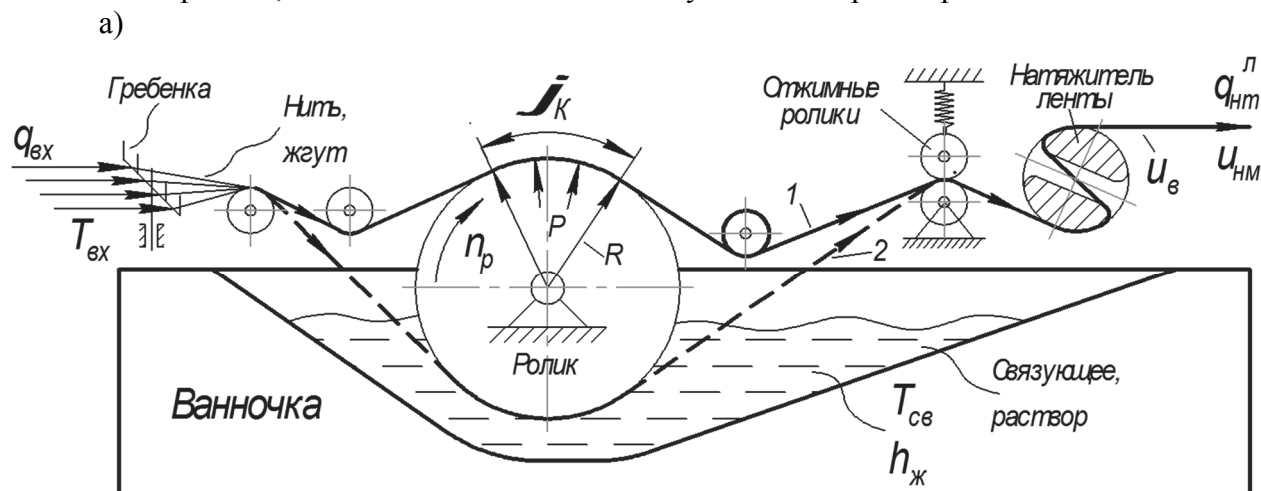
Касательные напряжения определяются из равенства $\tau = q/h$.

Следует отметить, что поток q_0 , входящий в формулу (10), является пока неизвестным и определяется по-разному в зависимости от степени замкнутости контура. Так, однозамкнутое сечение является статически определимым, многозамкнутое – статически не определимым, а стержень с открытым контуром при решении задачи кручения является даже геометрически изменяемой системой. Поэтому необходимо последовательно рассматривать определение касательных напряжений для каждого типа поперечного сечения тонкостенных конструкций.

Данная теория применима при производстве труб из композиционных материалов. На рис. 5 представлена схема формирования и пропитки волокнистой ленты жидкими связующими или растворами. Нити, жгуты или ровинги поступают из шпуляричника на индивидуальные натяжители и с помощью гребенки собираются в ленту, которая подается в пропиточную ванну со связующим или раствором. После отжима связующего лента поступает на

натяжитель ленты, далее – на намотку изделия или в сушильную камеру в случае изготовления препрега.

В производстве намоточных полуфабрикатов из волокнистых наполнителей на основе жидких связующих или растворов наибольшее применение нашли два следующих основных способа пропитки (см. рис. 5). Способ 1: погружением и непрерывным протягиванием нитей, жгутов, ровингов или тканых лент через пропиточную ванну с раствором или со связующим; способ 2: пропитка однонаправленных волокнистых наполнителей и тканых лент с помощью контактного ролика, находящегося в жидком связующем или растворе.



б)

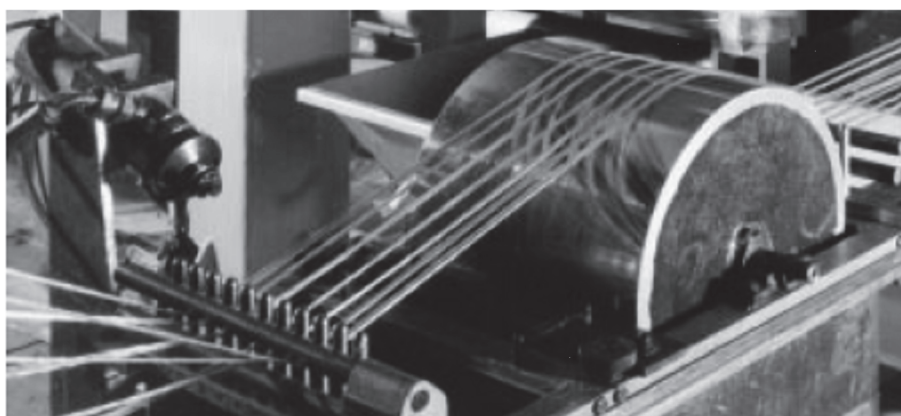


Рис. 5. Схема формирования и пропитки волокнистой ленты жидкими связующими или растворами (а) и проточная ванна (б)

Экспериментальные исследования сопротивления внутреннему давлению с тензометрированием композитной оболочки проводят на модельных криволинейных трубопроводах (см. рис. 6, а). В процессе испытаний определяют характеристики деформации стеклопластиковой оболочки, оценивают прочность заделки соединительных фланцев, а также изучают характер и место разрушения (см. рис. 6, б). При нагружении криволинейного трубопровода давление деформации определяют в поперечном (e_1) и в продольном (e_2) направлениях, а также вдоль витка нитей ($e_{км}$) с помощью пластических тензодатчиков типа КБ-10-200П.

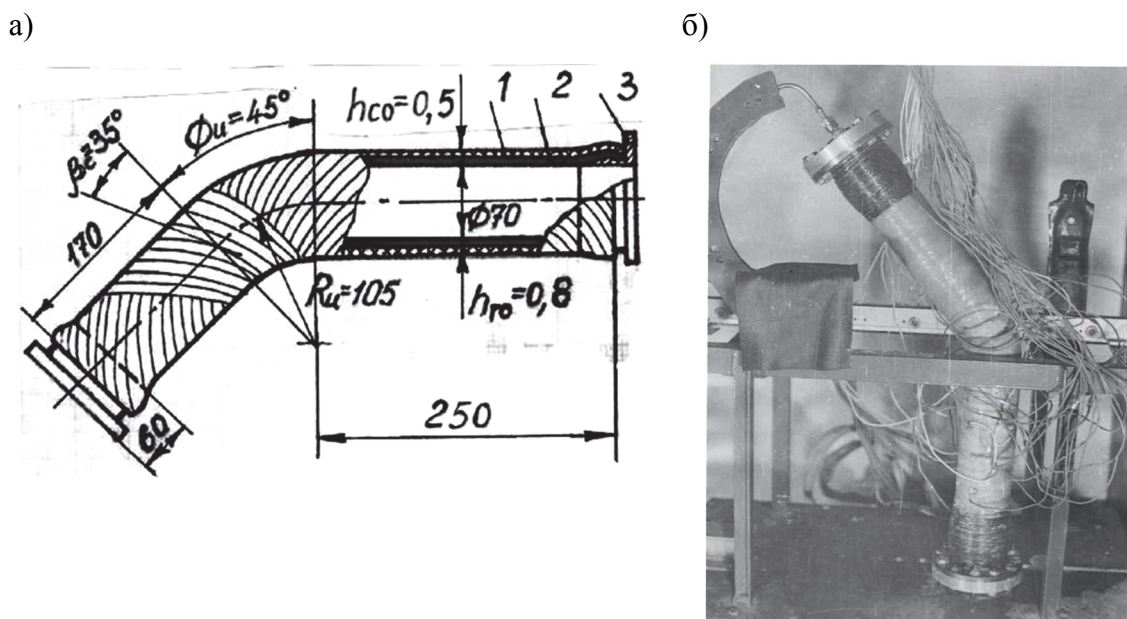


Рис. 6. Схема криволинейного трубопровода (а) его гидроиспытания (б):
 1 – стеклопластиковая оболочка; 2 – герметизирующая оболочка;
 3 – металлический фланец

Намотанные стеклопластиковые трубопроводы имеют удовлетворительную работоспособность герметизирующей и силовой оболочек, фланцевой заделки. Эксперименты подтвердили, что наиболее слабое место в трубопроводе – внешняя сторона изогнутого участка, где и происходит разрушение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чумадин, А. С. Основы авиа- и ракетостроения / А. С. Чумадин, В. И. Ершов, Б. Н. Марьин [и др.]. – М.: Инфра, 2008. – 992 с.
2. Немировский, Ю. В. О некоторых особенностях уравнений оболочек, армированных волокнами постоянного поперечного сечения / Ю. В. Немировский, А. П. Янковский // Механика композиционных материалов и конструкций. – 1997. – Т. 3. – № 2 – С. 15-39.
3. Янковский, А. П. Идентификация структур армирования композиционных конструкций на основе результатов теплофизических экспериментов об установившихся колебаниях температуры / А. П. Янковский // Инженерно-физический журнал. – 2011. – Т. 84. – № 2. – С. 324-333.
4. Смердов, А. А. Оптимизация характеристик демпфирования многослойных композиционных материалов / А. А. Смердов // Авиационная промышленность. – 2006. – № 2. – С. 12-18.
5. Лейзерович, Г. С. О взаимодействии форм изгибных колебаний тонких круговых цилиндрических оболочек с разными параметрами волнообразования / Г. С. Лейзерович, В. С. Симонов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2012. – № IV-1(12). – С. 9-12.

Шунейко А. А.
A. A. Shuneyko

ЕВСТИГНЕЕВ А. И., СИВКОВ В. Л., МАЛИНОВСКАЯ С. Г.
В ПАМЯТЬ ОБ УЧИТЕЛЕ И НАСТАВНИКЕ: ПРОФЕССОР Г. И. ТИМОФЕЕВ. –
ВЛАДИВОСТОК: ДАЛЬНАУКА, 2015.

YEVSTIGNEEV A. I., SIVKOV V. L., MALINOVSKAYA S. G. V PAMYAT
OB UCHITELE I NASTAVNIKE: PROFESSOR G. I. TIMOFEEV. – VLADIVOSTOK:
DAL-NAUKA, 2015 (YEVSTIGNEEV A. I., SIVKOV V. L., MALINOVSKAYA S. G.
IN MEMORY OF TEACHER AND MENTOR: PROFESSOR G. I. TIMOFEEV. –
VLADIVOSTOK, DALNAUKA PUBLISHING, 2015)

Шунейко Александр Альфредович – доктор филологических наук, профессор кафедры лингвистики и межкультурной коммуникации Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27. E-mail: shuneyko@ya.ru.

Mr. Alexander A. Shuneyko – Dr.habil. of Philology, Professor, Department of Linguistics and Cross-cultural Communication, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Ave., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: shuneyko@ya.ru.

Качество научной парадигмы во все времена в первую очередь определяется характером отношений учителя и ученика. Преемственность знания осуществляется не только через книги. Важнейшие сегменты информации передаются лишь при непосредственном личном общении. Учебник не может научить ответственности за свой труд, преданности ему, гордости за него, заинтересованности в своём деле, пониманию того, что занят важными проблемами. Все это может передать только учитель. Именно он, а не плановые аттестации, отчеты на кафедрах (в отделах) и учёные советы, совершает длительный и незаметный процесс инициации, создаёт из молодого исследователя настоящего учёного. Об этом необходимо помнить всем. Но помнят только благодарные ученики, в любом возрасте и на любом этапе своей карьеры сохраняющие преданность тем, кто провёл их по пути научного становления, приобщил к знаниям, впустил в сообщество учёных.

Поэтому так важны книги, которые ученики посвящают своим учителям (пишут о них). В этих книгах присутствуют и благодарность, и итоги пройденного, и наблюдения, и советы. При своей внешней отчетливой ретроспективной направленности такие работы всегда перспективны. Они не просто дань памяти и тёплое воспоминание о прошедшем, не просто попытка сохранить живыми тех, кого уже нет с нами, но еще и проявление отчетливой уверенности в том, что сделанное настоящим учителем никогда не прекращается (никуда не исчезает) с его уходом, остаётся с нами и продолжается в позитивных действиях. В науке такие книги стали традиционными. Достойный образец продолжения этой традиции – книга трёх авторов, рассказывающая о профессоре Г. И. Тимофееве, который оставил значительный вклад в области металлургии.

Книга включает в себя три части. Первая часть – размышления и воспоминания А. И. Евстигнеева о том, каким был его учитель и кем он остаётся. Вторая часть – рассказ профессора А. Л. Сивкова о жизни, творческой и административной карьере Г. И. Тимофеева, о его роли в отечественной науке. Третья часть – воспоминания дочери Г. И. Тимофеева о своём отце. Такое построение книги, содержащей и глубоко личное восприятие и сухие архивные строки, позволяет авторам создать целостный образ человека, который с одинаковым успехом мог руководить аспирантами, факультетом, кафедрой, советом, заседать в эксперт-

ной комиссии ВАК, давать конкретные рекомендации производству и делать многое другое, относясь ко всем своим занятиям с заинтересованной ответственностью.

Повествование удачно дополнено многочисленными фотографиями, по которым можно проследить путь Г. И. Тимофеева от университетской скамьи до своего последнего пристанища, о котором тоже сказано в книге. По этим фотографиям видно, как меняется лицо учёного: становится старше, мудрее, приобретает жёсткость. Но при всех этих переменах постоянным остаётся одно – пытливый взгляд исследователя, с почти всегда присутствующей в нём лукавой искоркой.

Представляется, что самое ценное в книге – страницы, написанные профессором А. И. Евстигнеевым. Подытожив большую часть пройденного им научного и административного пути, автор приходит к выводу, что на этой дороге у него было много попутчиков, но самым главным среди них был его учитель, остающийся таковым и сейчас, когда учителя уже нет на материальном плане, а сам ученик достиг тех же самых вершин.

Из текста мы можем узнать множество живых интересных фактов, иллюстрирующих взаимодействие учителя и ученика. Эти сведения полезны каждому, поскольку говорят о нормальных человеческих отношениях, показывают пример позитивной преданности, сотрудничества и благодарности. Текст состоит из череды конкретных зарисовок (описания ситуаций), которые в своей совокупности создают многомерный портрет. Вот некоторые из них, каждая – важный жизненный урок. Нормальный рабочий день аспиранта длится с 07.00 до 20.00. Проведение исследования предполагает обязательные еженедельные отчёты. Жёсткая внешняя регламентация вовсе не отменяет внутреннюю свободу действий. На первую статью своего аспиранта объемом 1,5 страницы, учитель написал рецензию с замечаниями на 2 страницы. Перед защитой были ежедневные двухчасовые чтения диссертации по главам. Совет, который дал Г. И. Тимофеев своему ученику после присутствия их обоих на заседании экспертного совета ВАК: «Не пасовать перед кабинетами». В кабинете А. И. Евстигнеева висит портрет учителя, с которым автор и сейчас через внутренний монолог продолжает советоваться.

Эти и иные черты реальности вовсе не являются какими-то обязательными рекомендациями, залогом успеха или исключительными достижениями в области научной мысли. Но в своей совокупности они демонстрируют ту меру соединения жёсткости и свободы, без которой научное исследование невозможно, превращается в нудную непродуктивную деятельность или банальную погоню за степенями как за внешними украшениями.

Уверен, что информация, представленная в книге, одинаково полезна и научным руководителям и аспирантам. Первым она напомнит о необходимости ответственного отношения к своим подопечным. Вторым – даст образец верного восприятия процесса, своего статуса в нём и оптимального типа поведения.

И всё же, в первую очередь, я бы рекомендовал эту книгу молодым исследователям, заинтересованным в адекватном восприятии своего места в научной парадигме.

Шунейко А. А.
A. A. Shuneyko

КОМСОМОЛЬСКОМУ-НА-АМУРЕ ГОСУДАРСТВЕННОМУ ТЕХНИЧЕСКОМУ УНИВЕРСИТЕТУ 60 ЛЕТ

SIXTIETH ANNIVERSARY OF KOMSOMOLSK-ON-AMUR STATE TECHNICAL UNIVERSITY

Шунейко Александр Альфредович – доктор филологических наук, профессор кафедры лингвистики и межкультурной коммуникации Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27. E-mail: shuneyko@ya.ru.

Mr. Alexander A. Shuneyko – Dr.habil. of Philology, Professor, Department of Linguistics and Cross-cultural Communication, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russia. E-mail: shuneyko@ya.ru.

Семнадцатого июня 1955 г. был открыт Комсомольский-на-Амуре вечерний политехнический институт, ныне – ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет». С тех пор прошло 60 лет. Много изменилось за это время. В формате небольшой статьи нельзя даже просто перечислить все разнообразные трансформации и поименно назвать всех заслуживающих упоминания ныне живых и уже покойных уважаемых людей, которые своим трудом, творческой энергией и заинтересованностью создавали университет и сейчас определяют его имидж. Но можно пунктирно наметить перечень главных успехов, характеризующих судьбу университета и его нынешний статус, поскольку за этот период не только в три раза увеличилось количество слов в имени университета, а произошли и более значительные события. Все их можно разделить на внутренние и внешние.

Внутренние достижения акцентируют внимание на том, что происходило с самим университетом, как он рос, развивался, приобретал сегодняшний вид, превращался из вечернего института в один из лучших университетов региона.

Обратимся к статистике, которая в цифрах позволяет увидеть кардинальные изменения качества самой организации и её образовательных услуг.

В 1955 г. в институте было два факультета (механико-технологический и строительный); в 2015 г. в университете двенадцать факультетов и институтов, на которых осуществляется подготовка по 58 образовательным программам, 29 научным специальностям в аспирантуре и пяти – в докторантуре. К 1956 г. в институте работало 36 преподавателей (в их числе три доцента и кандидата наук); к 1960 г. преподавателей было 104; в 2015 г. профессорско-преподавательский состав включает 329 человек (в их числе 34 доктора наук и 182 кандидата наук). Первоначально в институт набрали 200 абитуриентов, в 2015 году на первом курсе университета обучается 2038 человек. Первый выпуск института – 33 человека, в 2014 г. дипломы университета получили 2171 человек.

Впечатляет и рост учебной базы. В первые три года существования института, с 1955 по 1958 гг., собственных помещений (своего дома) у него не было вообще: учёба проводилась в зданиях судостроительного, строительного техникумов, педагогического института, в Доме политического просвещения и в заводских лабораториях. В 1958 – 1961 гг. в две очереди был сдан первый корпус. В 1969 г. построен второй лабораторный корпус. В 1980 г. были сданы третий и четвёртый (первоначально – студенческое общежитие) корпуса. Открывались представительства и филиал [2].

Университет постоянно растёт: увеличивается всё – и учебные площади, и объёмы работ, и количество выпускников, и объёмы предоставляемых услуг, и количество преподавателей. Темпы роста находятся в соответствии с важными качественными изменениями.

Во всех этих изменениях значительна роль ректоров (до 1974 г. – директоров). Эту должность последовательно занимали: с 1955 по 1956 гг. – В. П. Швайко; с 1956 по 1962 гг. – М. М. Негеевич; с 1962 по 1975 гг. – А. Д. Куликов; с 1976 по 1982 гг. – Ф. Н. Рыжков; с 1982 по 1995 гг. – В. М. Власенков; с 1995 по 2006 гг. – Ю. Г. Кабалдин; с 2006 по 2014 гг. – А. М. Шпилёв; с 2014 г. по настоящий день – Э. А. Дмитриев. Каждый из этих руководителей внёс ощутимый вклад в развитие университета. При А. Д. Куликове (16 июля 1974 г.) институт был преобразован из вечернего в дневной. При Ф. Н. Рыжкове (в 1980 г.) были построены третий и четвёртый учебные корпуса. При В. М. Власенкове (27 ноября 1994 г.) институт стал университетом и (в 1994 г.) получило развитие гуманитарное направление. При Ю. Г. Кабалдине были открыты диссертационные советы. При А. М. Шпилёве (в 2010 г.) началось издание научного журнала.

Но усилия самого замечательного ректора ничто без поддержки коллектива. На успех работают все: вспомогательный персонал, лаборанты, ассистенты, инженеры, старшие преподаватели, доценты и профессора. Вот что об отношении к коллегам говорит бывший ректор, ныне директор ИНИТа, советник ректора, главный редактор журнала «Учёные записки КНАГТУ», доктор технических наук, профессор А. М. Шпилёв: «Людей, которые с тобой трудятся бок о бок, необходимо, в первую очередь, уважать. Надо помнить: они являются основой всего дела. Твой успех – их успех. И наоборот. Исходя из этого, я старался сделать больше зарплаты. Любая железка через пять лет стареет, а то и раньше. А хорошего специалиста найти сложно и нужно беречь, потому что он дорог. В отличие от железки, он со временем большую ценность приобретает. Нужно защищать затраты. Один умный человек сказал: “Можно экономить, но лучше больше зарабатывать”».

Сейчас в университете ещё работают люди, которые застали его первые годы. Начальник научно-исследовательского отдела, кандидат технических наук Г. А. Колыхалов является одним из старейших сотрудников университета. В 1958 г. он стал первокурсником вечернего политехнического, затем закончил его и после небольшого перерыва, в 1965 г., вернулся в его же стены, где трудился на различных должностях, а ныне отслеживает и сводит воедино показатели эффективности научно-исследовательской работы университета. С доброй улыбкой вспоминает он о том, что перед первым корпусом раньше стоял МИГ-15, как самолет заносили в помещение, как молодых ассистентов отправляли на стажировки в Новосибирск и многое другое. «Университет – это вся моя жизнь», – итожит Г. А. Колыхалов свой рассказ, из которого понятно, что жизнь эта проходит не зря и продолжает быть наполненной позитивным созидательным содержанием.

Не менее внутренних значительны внешние успехи университета, демонстрирующие, какую роль играет университет в окружающем пространстве, как его значение проявляется в экономической и в культурной сферах города, края и региона в целом.

Роль университета в экономической сфере демонстрируется тем, что Комсомольск-на-Амуре – самый значительный промышленный центр Хабаровского края. При этом в городе нет ни одного крупного или среднего промышленного предприятия, где не работали бы выпускники университета. То есть экономическая мощь города, края и всего Дальнего Востока в существенной степени базируется на кадрах, обученных в КНАГТУ. Университет в буквальном смысле этого слова создаёт гуманитарное обеспечение экономики. И делает это за счёт того, что обеспечивает самые разные организации не только инженерами, но и переводчиками, архивистами, юристами, экономистами, социальными работниками, архитекторами, программистами. Университет готовит большинство актуальных для эффективного функционирования экономики специалистов.

Но выпускниками влияние университета на экономические процессы не ограничивается. Второй составляющей участия является то, что кадровый состав самого университета включён в оптимизацию промышленного производства через различные виды контактов с предприятиями. В первую очередь, через хоздоговорные работы и иные способы финансирования. Например, в 1981 г. план хоздоговорных научно-исследовательских работ был выпол-

нен на 145 %, документально подтверждённый промышленными предприятиями экономический эффект от внедрения результатов научно-исследовательских работ (НИР) составил 2657 тысяч рублей (1980 г. – 2500 тысяч рублей). Сейчас общие объёмы НИР университета значительно выше, если суммировать все показатели, то получится, что в 2013 г. они составили 45 148,6 тысяч рублей, в 2014 – 46 896,6 тысяч рублей [1]. Реальный вклад в экономику вносят не только технические, но гуманитарные кафедры. Например, кафедра иностранных языков с первых лет существования университета на договорной основе переводила техническую литературу и вела кружки иностранных языков на заводах. Сейчас эта ориентированная на производство и на реализацию общих задач университета работа продолжается и обретает новые формы, обусловленные спецификой экономических запросов региона.

Роль университета в культурной сфере для многих не так очевидна. На первый взгляд, сама постановка вопроса звучит парадоксально: технический университет и решение культурных проблем. Но следует помнить, что именно в этой сфере реализуется основная миссия любого университета. Речь в данном случае идёт не только о том, что сейчас в университете масса гуманитарных специальностей. При их наличии и несомненной роли университет был и остаётся, в первую очередь, техническим. Речь о другом – о том, как университет в культурном плане изменил город.

Университет является центром селекции и распространения образованного сословия. Сначала он привлекает образованное сословие извне в место, где его нет. Потом он сам начинает создавать, культивировать и распространять его. Он осуществляет передачу студентам научных и духовных ценностей, формирует культурную среду города.

Этот сложный и долговременный процесс осуществляется различными способами. Перечислим некоторые из них. Прямая передача знаний в процессе культурно-просветительской работы с населением. Например, только в 1957 – 1958 гг. преподавателями института было прочитано около 230 лекций и инструктивных докладов на общественно-политические и научные темы для населения города и района, велось консультирование работников промышленных предприятий, преподаватели участвовали в работе методических секций и учительских конференций, являлись членами городской организации общества «Знание». Работа с населением велась не только через просветительскую и популяризаторскую деятельность на различных предприятиях и повышение квалификации трудящихся. Сотрудники университета активно публиковались в городских и краевых средствах массовой информации (газетах «Дальневосточный Комсомольск», «Тихоокеанская звезда», «Молодой дальневосточник»), выступали по городскому и краевому радио и телевидению.

Выпускники университета идут непосредственно к тем, кто копает траншеи, строит дома, клепают самолёты, сваривает корпуса кораблей, льёт металл, перегоняет нефть и т.д. То есть они идут к трудовому народу. В общении они транслируют определённые культурные ценности, способствуют формированию интеллектуального и нравственного облика жителей города.

Влияет университет и на улучшение физического облика горожан. Значительна его роль в области физической культуры и спорта: не одно поколение получило установку на здоровый образ жизни. Университет воспитал чемпионов практически всех уровней и мастеров, примеру которых стремятся следовать другие жители. Немалая заслуга в этом принадлежит профессору, заслуженному работнику физической культуры и спорта, заслуженному тренеру России, мастеру спорта СССР В. К. Стручкову.

Если итожить все эти и многие другие достижения, то вывод очевиден: университет сделал город городом. Он в значительной степени сформировал его экономический и культурный облик. Он не один осуществлял эти сложные процессы – и школы, и театры, и студия телевидения и иные образовательные центры в этом тоже участвовали. Но если учесть тот очевидный факт, что именно в техническом университете сконцентрирован куда больший интеллектуальный потенциал, чем в иных образовательных центрах, то можно прийти к

выводу, что на формирование культурного и экономического облика города в наибольшей мере повлиял именно он.

Университет гордится своими выпускниками, среди них и простые инженеры, и руководители всех уровней, и известные учёные, и два ректора, и нынешний губернатор Хабаровского края В. И. Шпорт.

Экономическая и культурная, внешняя и внутренняя сферы деятельности университета находятся в отношениях тесной взаимной обусловленности. Думается, что не каждая из них сама по себе, а именно их гармоническое взаимодействие позволили создать конгломерат интеллектуальных и духовных качеств, способный влиять на окружающее пространство и трансформировать его в направлении увеличения и стабилизации культурного потенциала населения. А показатель его уровня – это и есть тот вклад, который внёс университет в социокультурное развитие г. Комсомольска-на-Амуре, формирование интеллектуального и духовного облика его жителей.

Дело просвещения, которому служит университет, свой главный итог проявляет не в том, что большая часть населения больше знает, а в том, что она приобретает творческое отношение к профессиональной деятельности, испытывает потребность в саморазвитии и живёт по гуманистическим законам, соизмеряющим потребности тела, духа и души.

К настоящему времени университетом подготовлено 34 704 дипломированных специалистов, 995 бакалавров, 166 магистров, более 300 кандидатов наук и более 30 докторов наук.

Сейчас, во время вступления в европейское образовательное пространство, университет активно использует новые формы работы, проводит конференции и конкурсы, стимулирующие исследовательскую активность студентов и преподавателей. Прямыми подтверждениями реальной интеграции университета в общие процессы являются защиты иностранных граждан в диссертационных советах университета и публикации преподавателей в журналах Web of Science и Scopus.

Сейчас университет успешно осваивает новые виды деятельности: тестирует мигрантов, принимает на обучение иностранных граждан, строит бизнес-инкубатор для реализации масштабной инновационной программы. Всё это – знаки того, что он продолжает активно развиваться. Такое динамичное развитие возможно только на хорошем устойчивом фундаменте.

Как принято в дни юбилеев, необходимо с благодарностью оглянуться назад, поблагодарить всех тех, кто 60 лет создавал достойную базу, и с надеждой и уверенностью в том, что накопленный потенциал будет не утерян, а преумножен, поприветствовать будущее.

ЛИТЕРАТУРА

1. Наука и инновации КнАГТУ / Э. А. Дмитриев, А. И. Евстигнеев, Г. А. Колыхалов, С. В. Белых. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2015.
2. Пора зрелости: Комсомольскому-на-Амуре государственному техническому университету – 50 лет. – Хабаровск: Дальневост. кн. изд-во «Приамурские ведомости», 2005. – 192 с.

Шунейко А. А.
A. A. Shuneyko

ДМИТРИЕВ Э. А., ЕВСТИГНЕЕВ А. И., КОЛЫХАЛОВ Г. А., БЕЛЫХ С. В.
НАУКА И ИННОВАЦИИ КНАГТУ – КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ:
ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2015

DMITRIEV E. A., YEVSTIGNEEV A. I., KOLYKHALOV G. A., BELYH S. V.
NAUKA I INNOVATSII KNAGTU – KOMSOMOLSK-NA-AMURE:
FGBOU VPO «KNAGTU», 2015 (DMITRIEV E. A., YEVSTIGNEEV A. I.,
KOLYKHALOV G. A., BELYH S. V. RESEARCH AND INNOVATION
IN KOMSOMOLSK-ON-AMUR STATE TECHNICAL UNIVERSITY. – KOMSOMOLSK-
ON-AMUR STATE TECHNICAL UNIVERSITY PUBLISHING, 20125)

Шунейко Александр Альфредович – доктор филологических наук, профессор кафедры лингвистики и межкультурной коммуникации Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27.

E-mail: shuneyko@ya.ru.

Mr. Alexander A. Shuneyko – Dr.habil. of Philology, Professor, Department of Linguistics and Cross-cultural Communication, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Ave., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: shuneyko@ya.ru.

За 60 лет существования КНАГТУ университетская наука в нём прошла большой, сложный и интересный путь. Он показательно характеризуется сопоставлением следующих цифр. В 1955 – 1958 гг. в институте работали всего три кандидата наук и не было ни одного доктора наук. К настоящему времени только в диссертационных советах самого университета защитились 35 докторов наук и 341 кандидат наук. Эти цифры демонстрируют, как возросла результативность научной работы: за ними стоят большие усилия по созданию, организации и осуществлению устойчивой деятельности университетских структур, обеспечивающих эффективное функционирование возрастающих объемов научных исследований; они итожат труд множества людей, в различное время работавших в стенах университета, на кафедрах и в лабораториях.

Именно этим вопросам и посвящена рецензируемая книга: тому, как в университете функционировала наука, что она собой представляет сейчас, каковы перспективы её развития. Этот аспект деятельности университета очень важен, потому что его миссия, кроме непосредственной подготовки кадров, предполагает организацию прикладных и фундаментальных научных исследований, подготовку кадров высшей квалификации для нужд университетов.

В книге представлено огромное количество информации, включающей этапы развития университета и перечисление руководителей структурных подразделений, ориентированных на НИР. Здесь же содержатся показатели роста объема НИР по различным направлениям финансирования: количество поддержанных грантов, инновационные проекты, договоры, программы. Перечислены предприятия, с которыми сотрудничает университет.

Особое внимание уделено формированию опытно-экспериментальной базы университета, которая включает в себя гидродинамический бассейн, аэродинамическую трубу переменной плотности, лабораторию лазерной техники и технологии, лабораторию поверхностных методов обработки материалов, экспериментальный стенд для исследования высокоскоростных турбин, установку для исследования динамических процессов при резании металлов, автоматизацию технологической подготовки производства и другие объекты.

Отдельные разделы посвящены инновационной деятельности: технопарку, тематическим направлениям исследований, студенческим конструкторским бюро. Описаны регио-

нальный центр энергосбережения и центр комплексного использования научного оборудования, включающий в себя комплекс научных лабораторий.

Показано, как и кем осуществляется подготовка и аттестация специалистов высшей квалификации (аспирантура, докторантура, диссертационные советы). Охарактеризованы по нескольким параметрам сложившиеся в университете научные школы и направления, в том числе не обойдены вниманием и гуманитарные, что справедливо, поскольку гуманитарные исследования имеют существенный удельный вес в общем немалом объеме научных исследований университета.

Отсутствие изоляции проводимых исследований демонстрируют интеграционные проекты с различными научными учреждениями.

О росте интеллектуальной собственности красноречиво говорит следующий факт: почти за 60 лет (с 1966 г.) в результате изобретательской деятельности получено более 1000 охранных документов на объекты интеллектуальной собственности.

Привлечение молодежи к исследовательской деятельности – одно из приоритетных направлений развития университета. В книге подчеркнута постоянное заинтересованное внимание, которое уделяется научным исследованиям студентов. Первое студенческое конструкторское бюро было создано в 1968 г. Показательно, что первая медаль ВДНХ, полученная в институте в 1969 г., была присуждена именно за студенческую разработку. Это хороший пример для современных студентов, ориентир и указание на достойную традицию.

Постоянно прослеживается свойственная университетской науке преемственность, на конкретных примерах показано, как студенческие работы перерастают в научные направления. Это является отличным заделом на будущее, свидетельством стабильности.

Кроме многочисленных достижений и наград, которые итожат пройденный путь и говорят о его результативности, в книге указана перспектива – стратегическая программа развития центра инжиниринга, позволяющая на практике осуществлять установку на партнерство науки, бизнеса и производства.

Достоинством книги являются многочисленные иллюстрации, которые позволяют в реальном пространстве увидеть то, о чём повествуется.

Достаточное место в работе уделено непосредственным участникам научных процессов – людям, которые создавали подразделения, руководили ими, участвовали в их работе, осуществляли исследования, достигали значительных результатов. При этом констатации не ограничиваются прошедшим временем, а в равной мере описывают настоящее и ориентируются на будущее.

В целом книгу отличает внимание к истории, взвешенно соотносённое с мыслями о завтрашнем дне.