

Мироненко В. В., Полякова О. Е., Белых С. В.
V. V. Mironenko, O. E. Polyakova, S. V. Belykh

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТОЧНЫХ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ САМОЛЕТА ТИПА «КОМПЕНСАТОР» С ПОМОЩЬЮ СРЕДСТВ ВИРТУАЛЬНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

ON DESIGNING CLOSE-TOLERANCE BLANKS FOR AIRSTRUCTURES SUCH AS "COMPENSATORS" BY MEANS OF VIRTUAL PROCESS SIMULATION



Мироненко Владимир Витальевич – программист учебно-научного центра Autodesk кафедры «Самолетостроение и эксплуатация авиационной техники» Национального исследовательского Иркутского государственного технического университета (Россия, Иркутск); 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83; +79501110235. E-mail: mironenko_vv@istu.edu

Mr. Vladimir V. Mironenko – programming specialist, The Autodesk Educational and Research Centre under the Department of Aircraft Engineering and Operation, the National Research Technical University (Russia, Irkutsk); 83, Lermontov Str.; Irkutsk, 664074; +7 (950) 1110235. E-mail: mironenko_vv@istu.edu



Полякова Ольга Евгеньевна – начальник отдела внедрения информационных технологий в учебный процесс Национального исследовательского Иркутского государственного технического университета (Россия, Иркутск); 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83; +79501042079. E-mail: olgap@istu.edu

Mrs. Olga E. Polyakova – Head of Information Technologies in Education, the National Research Technical University (Russia, Irkutsk); 83, Lermontov Str.; Irkutsk, 664074; +7 (950) 1042079. E-mail: olgap@istu.edu



Белых Сергей Викторович – кандидат технических наук, проректор по науке и инновационной работе, доцент кафедры «Технология самолетостроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; +79141795213. E-mail: belykhsv@knastu.ru

Mr. Sergei V. Belykh – PhD in Engineering, Vice-rector for Science and Innovation, Associate Professor, Department of Aircraft Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Str., Komsomolsk-on-Amur, 681013; +7 (914) 1795213. E-mail: belykhsv@knastu.ru

Аннотация. Разработана методика получения объемной электронной модели развертки для профиля малой кривизны, с учетом технологической информации о местах приложения формирующих усилий, что позволило формализовать процесс формообразования на кромкопосадочных машинах и уменьшить влияние «человеческого фактора» на изготовление деталей данного класса.

Summary. The paper proposes a method for obtaining a three-dimensional e-model of a wide profile curvature's involute, taking into account technological information about the points of application of forming loads, which helps formalize the process of sheet metal forming and reduce the impact of "human factor" upon the manufacture of this type of components.

Ключевые слова: профильный полуфабрикат, получение разверток, моделирование.

Key words: profile semi-product, involute development, simulation.

УДК 621.7.04

Детали длиной до 250 мм из профилированного уголкового или таврового полуфабриката с отверстиями в полках и с малой обводной кривизной широко используются в конструкции самолета. Для обеспечения минимальной себестоимости изготовления таких деталей заготовки для них со вскрытыми отверстиями изготавливаются на высокопроизводительном станке с программным управлением. Кривизна профиля создается деформированием полки на кромкопосадочных машинах.

Задачей данного моделирования является получение объемной электронной модели развертки профиля (при наличии электронной модели детали), после формообразования которой погрешности контура и положения отверстий не будут превышать допустимого значения, которое составляет 0,1 мм.

Исследуемым объектом является типовая деталь типа «компенсатор», изготавливаемая из профильного полуфабриката таврового сечения из алюминиевого сплава Д19 (см. рис. 1).

В качестве метода формирования контура заготовки с учетом условий деформирования использовалось математическое моделирование в программном комплексе RAM-STAMP 2G французской фирмы ESI Group.

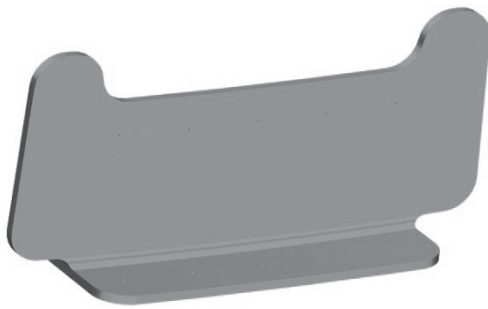


Рис. 1. Электронная модель детали типа «компенсатор»

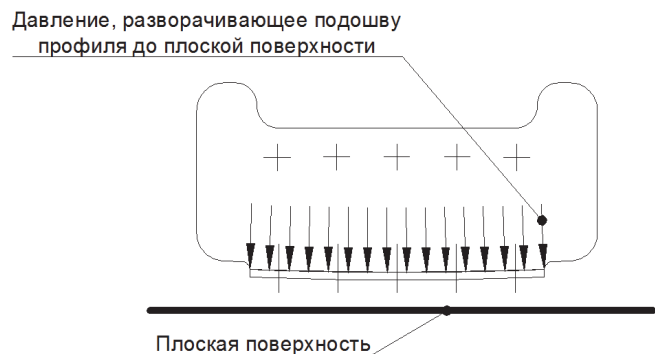


Рис. 2. Первая схема разворачивания профиля

Проверка результатов моделирования осуществлялась реальным деформированием на кромкосводящем станке Eskold заготовок, изготовленных на станке с программным управлением. Электронная модель заготовок получена в результате математического моделирования с учетом условий формообразования.

При решении поставленной задачи было рассмотрено четыре схемы воздействия на деталь для разворачивания профиля.

Первая схема заключается в разворачивании профиля на плоскую, абсолютно жесткую поверхность путем приложения давления на подошву профиля (см. рис. 2).

По схеме 1 получена объемная электронная модель развертки детали, по модели развертки изготовлена заготовка и выполнено формообразование детали.

При контроле контура детали отклонение от шаблона составило 0,39 мм.

Таким образом, полученный контур детали не соответствует требованию точности контура, поэтому продолжен поиск приемлемой схемы получения объемной развертки.

Схема 2 представляет собой доработанный вариант схемы 1. Суть ее сводится к тому, что помимо давления на подошву, к полке профиля прикладываются усилия, моделирующие кромкосводящие усилия станка (см. рис. 3). Как и в первом случае, была получена объемная электронная модель развертки, по которой была изготовлена заготовка.

Давление, разворачивающее подошву
профиля до плоской поверхности

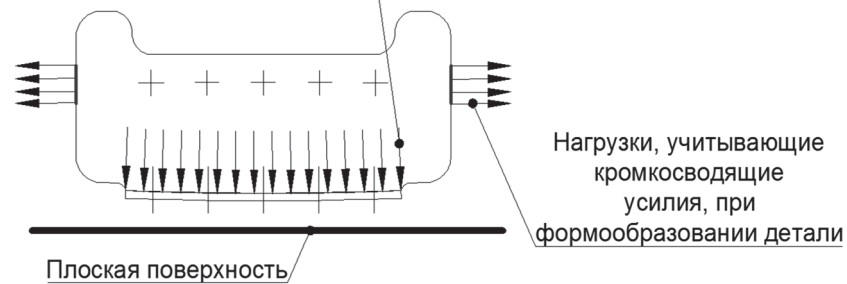


Рис. 3. Вторая схема для разворачивания профиля

После формообразования заготовки отклонение полученного контура детали от шаблона составило 0,33 мм. Незначительное уменьшение отклонения конура детали от шаблона говорит о том, что недостаточно точно учтены условия формообразования и приложения формовочных усилий.

Для более полного учета условий формообразования и приложения формовочных усилий подробно рассмотрен процесс формообразования заготовки, который заключается в приложении локальных кромкосводящих усилий в разных зонах полки профиля, которые в результате приводят к формообразованию заготовки (см. рис. 4).

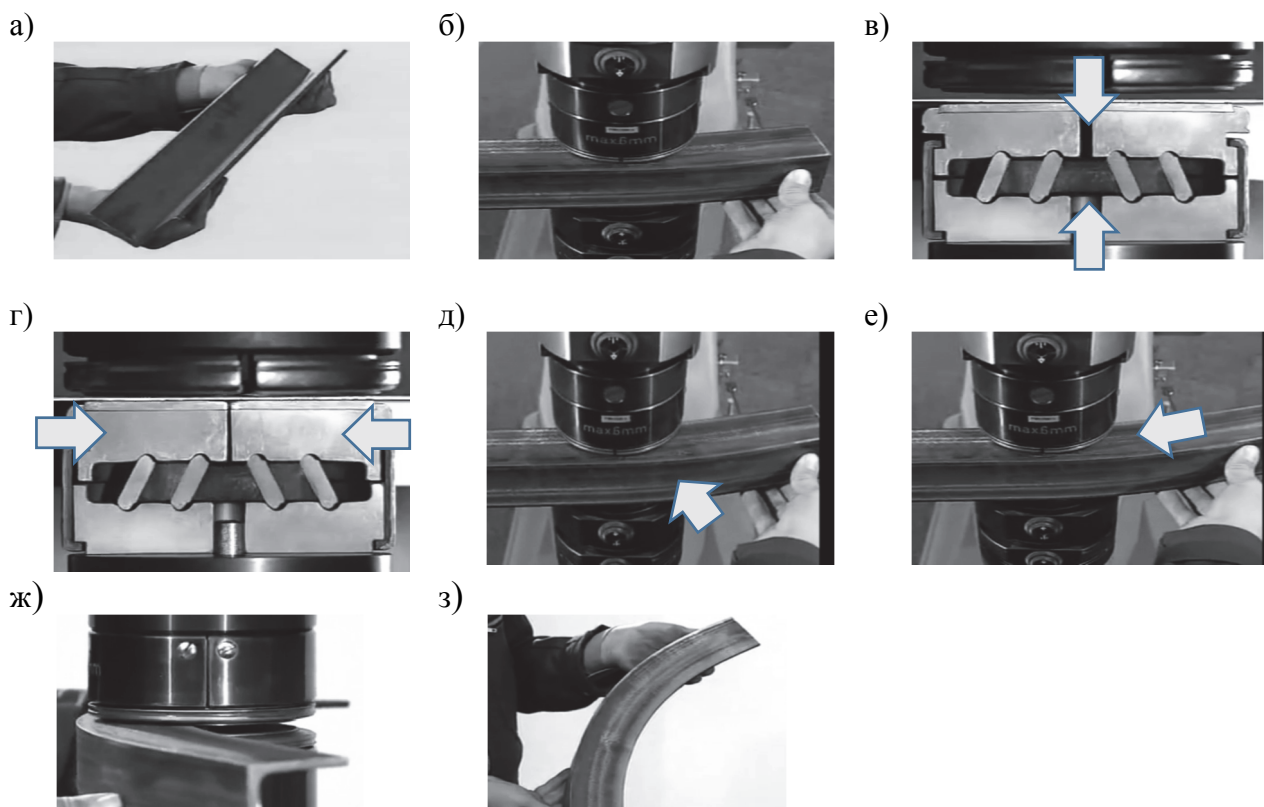


Рис. 4. Схема формообразования на кромкосводящем станке:

а - исходная заготовка; б - установка в станок; в - исходное положение нижних губок станка; г - рабочее положение инструментов станка (направление формирующего усилия в момент сжатия нижних губок); д, е, ж - придание кривизны профилю путем приложения формирующих усилий на разные участки профиля; з - полученная кривизна на детали

Анализ способа формообразования дал однозначный вывод – для получения развертки необходим механизм моделирования процесса, обратного формообразованию. Этот вывод учтен в схеме 3 получения развертки.

Суть схемы 3 моделирования обратного процесса формообразования сводится к тому, что упрощенно моделируется сам рабочий инструмент и использованы кромкоразводящие воздействия на деталь (см. рис. 5, рис. 6).

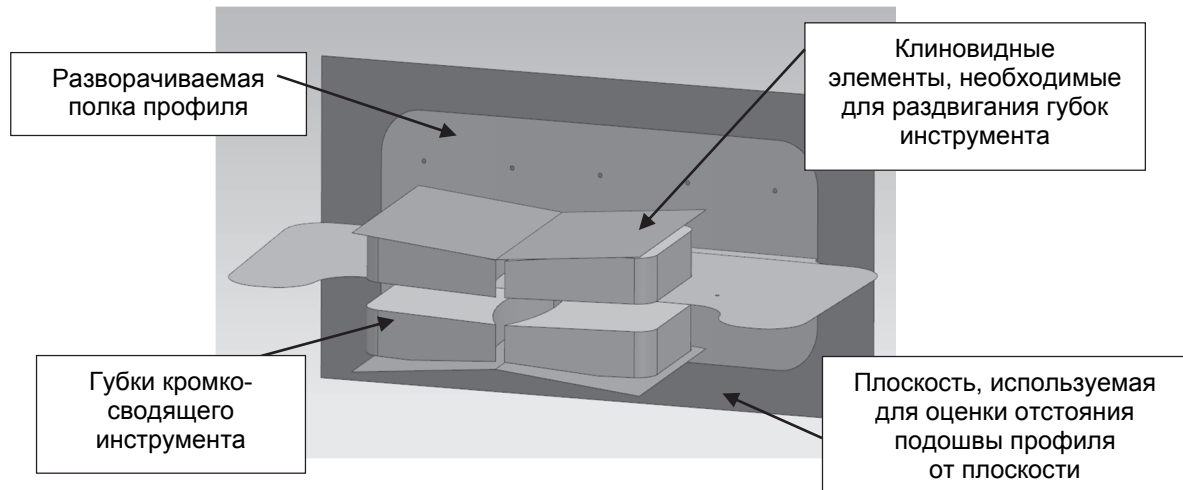


Рис. 5. Схема 3 разворачивания профиля

Стрелками показано направление движения клиновидных элементов инструмента, приводящих в движение губки.

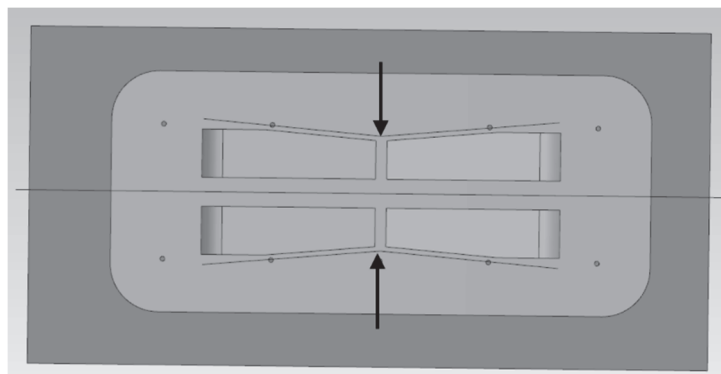


Рис. 6. Схема вертикального движения губок

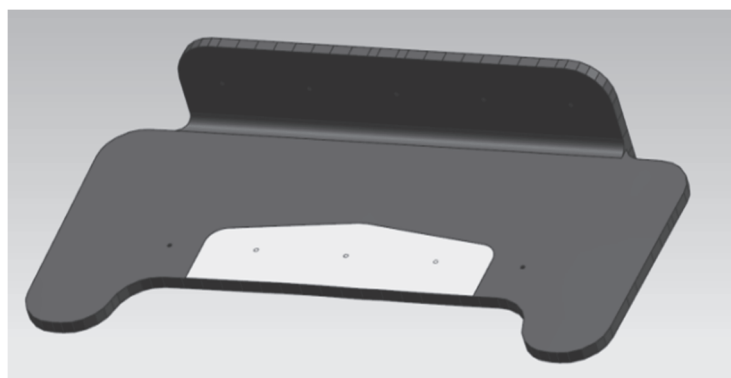


Рис. 7. Зона воздействия на профиль по схеме 3 моделирования

Зона приложения усилия выбрана в середине полки профиля для простоты технологического процесса и в связи с малой кривизной детали (см. рис. 7).

Разворачивание проводилось за четыре удара в указанной зоне воздействия (см. рис. 8).

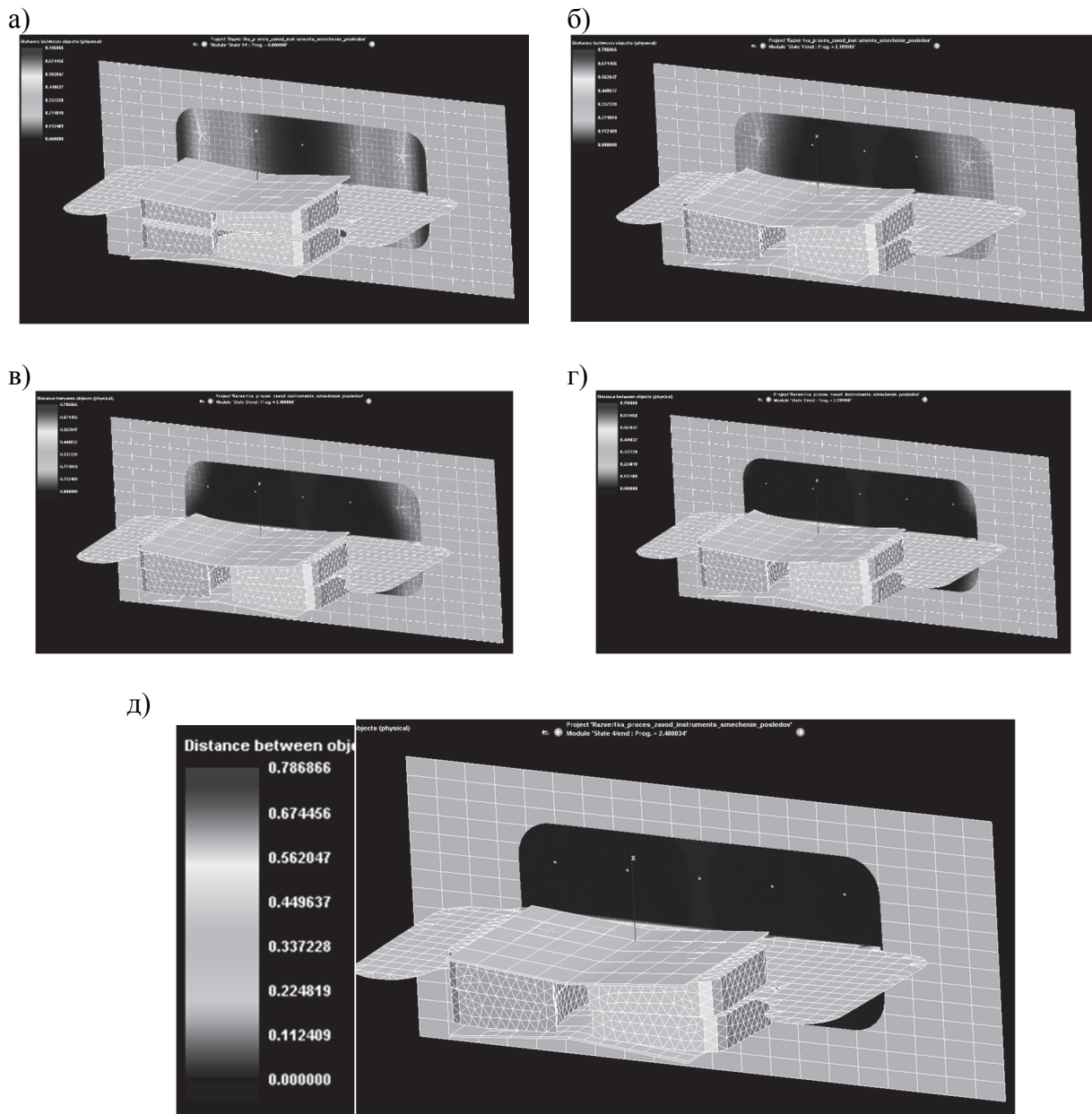


Рис. 8. Моделирование процесса разворачивания профиля за четыре удара: а - исходное положение (максимальное отстояние – 0,78); б - первый удар (максимальное отстояние – 0,51); в - второй удар (максимальное отстояние – 0,34); г - третий удар (максимальное отстояние – 0,16); д - четвертый удар (максимальное отстояние – 0,01)

Максимальное отстояние подошвы детали в исходном положении от плоской поверхности составляло 0,78 мм. В процессе разворачивания отстояние уменьшается до 0,01, что говорит о том, что подошва стала плоской и процесс разворачивания завершен.

Полученная в результате моделирования по схеме 3 заготовка была изготовлена и отформована. Максимальное отклонение контура полученной детали относительно контура шаблона составило 0,25 мм, что также превышает заданный допуск. Максимальные отсто-

яния были с левой и правой стороны полки профиля. Таким образом, можно сделать вывод, что для уменьшения отклонения необходимо увеличить зону воздействия губок станка на профиль для более равномерного перераспределения материала на полке профиля.

При формировании схемы 4 была расширена зона воздействия губок на полку профиля (см. рис. 9) и увеличено количество ударов до восьми с перемещением заготовки относительно губок (см. рис. 10).

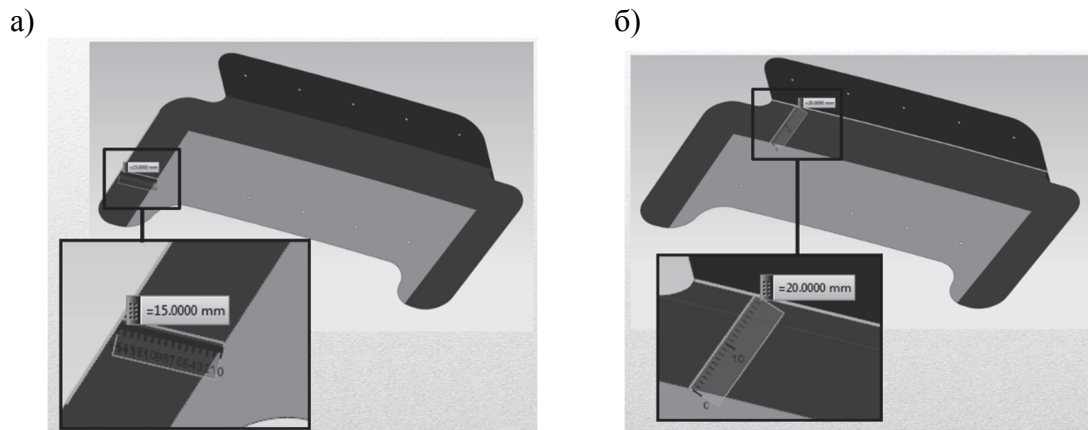


Рис. 9. Увеличенная зона воздействия губок на полку:

- а - ограничение зоны воздействия губок на полку по краям;
- б - ограничение зоны воздействия губок на полку со стороны подошвы

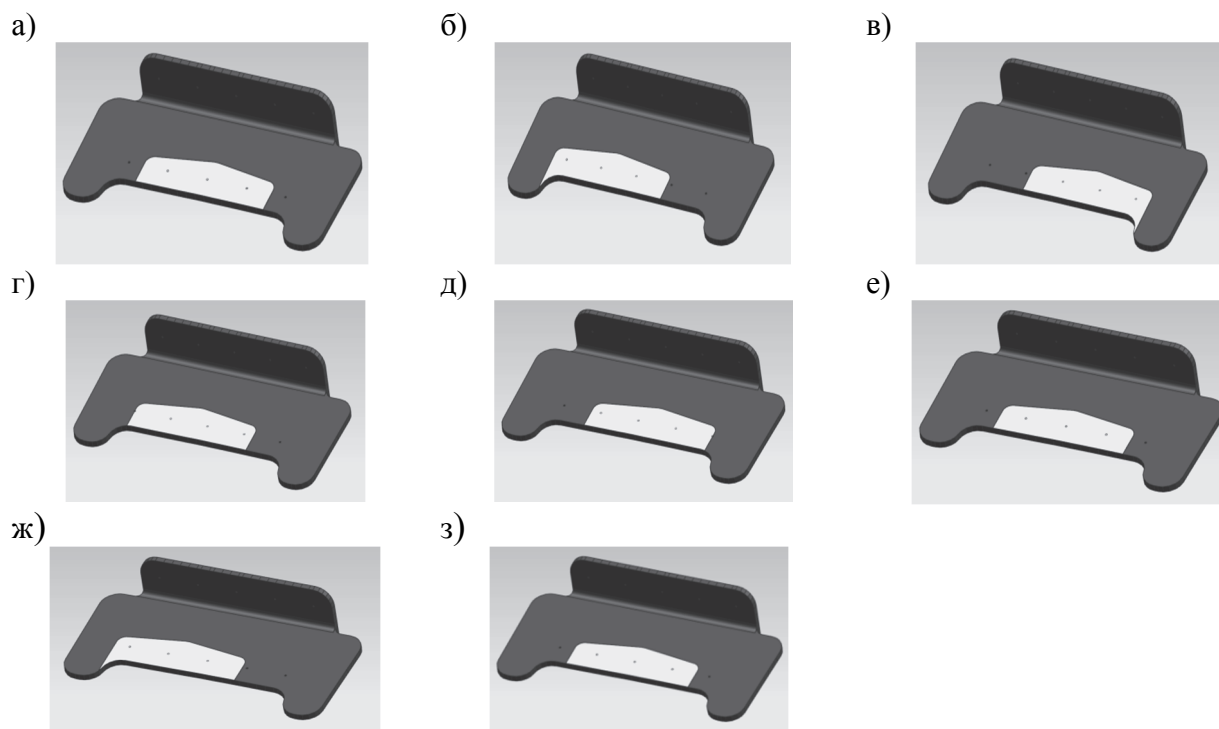


Рис. 10. Схема распределения ударов:

- а - первый удар в середине профиля; б - второй удар - смещение от середины профиля влево на 17 мм; в - третий удар - смещение от середины профиля вправо на 17 мм; г - четвертый удар - смещение от середины профиля влево на 8,5 мм; д - пятый удар - смещение от середины профиля вправо на 8,5 мм; е - шестой удар - середина профиля; ж - седьмой удар - смещение от середины профиля влево на 17 мм; з - восьмой удар - середина профиля

Максимальное отстояние подошвы детали от плоской поверхности в начале процесса составляло 0,78 мм и в процессе разворачивания оно уменьшилось до 0,03. Это говорит о том, что подошва стала плоской и процесс разворачивания закончен.

В результате моделирования была получена объемная электронная модель развертки профиля, изготовлена заготовка, после чего произведено формообразование с учетом заданного количества ударов и зон воздействия. Максимальное отклонение контура полученной детали относительно контура шаблона составило 0,03 мм. Это удовлетворяет заданному условию (см. рис. 11).



Рис. 11. Деталь, полученная из заготовки, изготовленной по результатам моделирования по схеме 4 разворачивания профиля

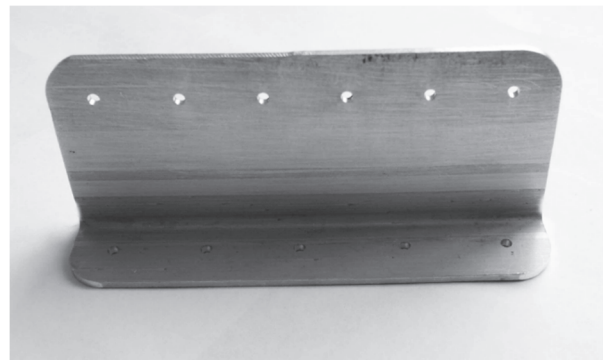


Рис. 12. Вторая деталь, полученная из заготовки, изготовленной по результатам использования методики разворачивания профилей по схеме 4

Разработанная методика разворачивания профилей по схеме 4 опробована на следующей детали этого же класса. При формообразовании была получена деталь, соответствующая требованиям на изготовление (см. рис. 12).

В результате выполнения анализа моделирования процесса разворачивания детали из профилированного полуфабриката:

- была разработана методика получения объемных разверток деталей из профилированного полуфабриката с помощью программного комплекса PAM-STAMP;
- разработанная методика была апробирована при изготовлении разверток для двух деталей;
- было произведено формообразование двух разверток и получены две детали, удовлетворяющие требованиям по допускаемым отклонениям по контуру;
- применение разработанной методики позволяет получать объемную электронную модель развертки для профиля малой кривизны, а также получать технологическую информацию о местах приложения формующих усилий, что в свою очередь, позволяет формализовать процесс формообразования на кромкопосадочных машинах и уменьшить влияние «человеческого фактора» на изготовление деталей данного класса.

Статья подготовлена по материалам работ, выполненных по проекту «Разработка и внедрение комплекса высокоэффективных технологий проектирования, конструкторской и технологической подготовки и изготовления самолета МС-21» в рамках реализации Постановления Правительства РФ от 09.04.2010 г. № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».



ЛИТЕРАТУРА

1. Мироненко, В. В. Расчет разверток деталей летательных аппаратов с учетом изменения толщины листа в результате формовки / В. В. Мироненко, А. А. Чеславская, С. В. Белых // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2014. – №1-1(17).
2. Формообразование профильных заготовок с помощью листового обтяжного прессы / А. А. Кривенко, А. В. Станкевич, С. И. Феоктистов, Р. Ф. Крупский, С. В. Белых // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2013. – № II-1(14) – С. 4-8.
3. Моделирование процессов гибки листовых заготовок эластичными и эластосыпучими средами / С. Б. Марьин, Д. Г. Колыхалов, В. В. Мироненко, В. В. Маценко // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2014. – № 4.
4. Сайт «ECKOLD – ДЛЯ ЛИСТОВЫХ МЕТАЛЛОВ И ПРОФИЛЕЙ» – Режим доступа: <http://www.eckold.com/ru-ru/home.aspx>.

Чепурных И. В.
I. V. Chepurnykh

РАСЧЁТ МАССЫ ПОДКОСНОГО КРЫЛА САМОЛЁТА

STRUT-BRACED WING'S WEIGHT CALCULATION



Чепурных Игорь Владимирович – доцент кафедры «Технология самолётостроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: igorekcoms@gmail.com.

Mr. Igor V. Chepurnykh – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Aircraft Engineering, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Str., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: igorekcoms@gmail.com.

Аннотация. В работе представлена методика расчета массы подкосного крыла с использованием известных весовых формул для свободносущего крыла. Кроме того, приведен алгоритм весового параметрического анализа несущей системы на этапе формирования облика самолёта.

Summary. This paper proposes a method for weight calculations of a strut-braced wing by means of using well-known weight formulas for cantilever wings. In addition, I suggest an algorithm for the weight parametric analysis of an airplane's lift system at the stage of concept design.

Ключевые слова: подкосное крыло, свободносущее крыло, изгибающий момент, параметрический анализ, несущая система, облик самолёта.

Key-words: strut-braced wing, cantilever wing, bending moment, parametric analysis, lift system, aircraft concept.

УДК 629.7.02.539.4

На этапе формирования облика самолёта необходимо выбрать схему несущей системы (подкосный или свободносущий моноплан, биплан и т.д.), затем с помощью весового параметрического исследования вычислить рациональные значения её основных проектных параметров. В частности, для подкосного крыла важно знать не только его массу, но также влияние на неё количества подкосов, а также мест расположения узлов крепления подкосов.

На сегодняшний день известно более 50 весовых формул крыла [4; 7]. При этом около 90 % весовых формул рассматривают свободносущее крыло. В то же время недостаточно внимания в весовом анализе уделяется подкосному крылу, хотя такая схема применяется не только в лёгких самолётах, но и в перспективных самолётах транспортной категории. Характерным примером этого применения служит активно разрабатываемый фирмой Boeing проект экологически чистого самолёта с комбинированной силовой установкой и подкосным крылом сверхбольшого удлинения (см. рис. 1).

Предлагается следующая методика параметрической оценки подкосных крыльев с использованием имеющихся весовых формул для свободносущих крыльев. Установка подкосов в первую очередь снижает изгибающий момент, действующий на крыло, что в итоге приводит к уменьшению массы элементов продольного силового набора (лонжеронов и стрингеров). По статистике [1] масса элементов продольного набора свободносущих крыльев лёгких самолётов составляет 30...36 % от массы всего крыла. Тогда, используя известные весовые формулы, находим массу свободносущего крыла, равновеликого подкосному.

Затем, умножая полученную массу на статистический коэффициент 0,33, находим массу элементов продольного набора свободносущего крыла. После этого определяем массу элементов продольного набора подкосного крыла и массу подкосов. Вычитая из полученной массы свободносущего крыла массу элементов его продольного силового набора и добавляя к остатку массу элементов продольного набора подкосного крыла и массу подкосов, получим искомую массу подкосного крыла в функции основных проектных параметров.



Рис. 1. Проект «зелёного» самолёта SUGAR Volt фирмы Boeing

Перейдём к реализации данной методики. В первом приближении полагаем, что воздушная нагрузка распределяется по размаху крыла пропорционально хордам. При расчёте массы элементов продольного набора трапециевидного крыла в работе [6] Н. Н. Фадеев показал, что сначала можно рассматривать прямоугольное крыло постоянного профиля, а затем вводить поправочные коэффициенты, учитывающие форму крыла в плане и действительное распределение воздушной нагрузки по размаху крыла. Поступим аналогично.

Для прямоугольного крыла (см. рис. 2) погонную воздушную нагрузку q определяем по приближённой формуле

$$q = \frac{G \cdot n^P}{2l_k},$$

где G – полётный вес самолёта; n^P – расчётная перегрузка; l_k – длина консоли.

Расчётная перегрузка n^P вычисляется по формуле

$$n^P = n_{\max}^{\exists} \cdot f,$$

где n_{\max}^{\exists} – максимальная эксплуатационная перегрузка; f – коэффициент безопасности.

Изгибающий момент $M_{из}$ в сечении z свободнонесущего крыла:

$$M_{из} = \frac{q \cdot z^2}{2}.$$

Усилие в панели $P_{пан}$:

$$P_{пан} = \frac{M_{из}}{k \cdot \bar{c} \cdot b},$$

где $k < 1$ – коэффициент, учитывающий уменьшение средней высоты силового кессона по сравнению с толщиной профиля крыла; \bar{c} – относительная толщина профиля крыла в сечении z ; b – хорда крыла в сечении z .

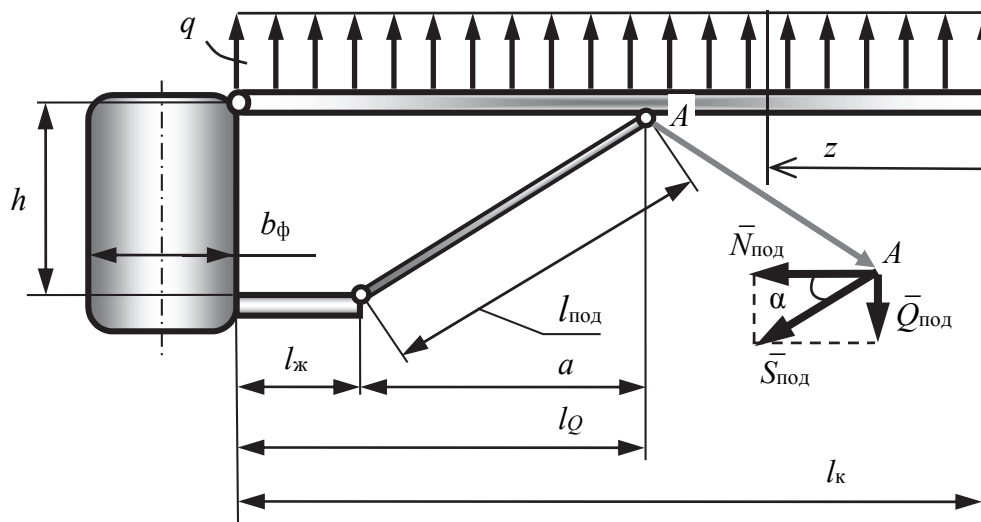


Рис. 2. Схема подкосного крыла и его нагружение

Площадь поперечного сечения панели $F_{пан}$:

$$F_{пан} = \frac{P_{пан}}{\sigma^P},$$

где σ^P – разрушающее напряжение материала панели.

Силовая масса элементов продольного набора двух консолей $m_{прод}$:

$$\begin{aligned} m_{прод} &= 2 \int_0^{l_k} dm = 2 \int_0^{l_k} \rho \cdot dV = 2 \int_0^{l_k} \rho \cdot 2F_{пан} dz = 4\rho \int_0^{l_k} \frac{P_{пан}}{\sigma^P} \cdot dz = \frac{4\rho}{\sigma^P} \int_0^{l_k} \frac{M_{из}}{k \cdot \bar{c} \cdot b} \cdot dz = \\ &= \frac{2\rho \cdot q}{\sigma^P k \cdot \bar{c} \cdot b} \int_0^{l_k} z^2 dz = \frac{2\rho}{\sigma^P k \cdot \bar{c} \cdot b} \cdot \frac{G \cdot n^P}{2l_k} \cdot \frac{l_k^3}{3} = \left(\frac{\rho \cdot G \cdot n^P l_k}{\sigma^P k \cdot \bar{c} \cdot b} \right) \cdot \left(\frac{l_k}{3} \right), \end{aligned}$$

где ρ – плотность конструкционного материала панели.

Если установить подкосы и шарнирно соединить консоль с фюзеляжем (см. рис. 2), то в сечении $z = l_k - l_Q$ появятся сосредоточенные поперечная сила $Q_{\text{под}} = \frac{q \cdot l_k^2}{2l_Q}$ и сжимающее

$$\text{усилие } N_{\text{под}} = \frac{Q_{\text{под}}}{\text{tg} \alpha} = \frac{Q_{\text{под}} \cdot a}{h} = \frac{q \cdot l_k^2 \cdot a}{2l_Q \cdot h}.$$

Усилие $N_{\text{под}}$ не изменяет суммарную силовую массу панелей, а только перераспределяет её между верхней и нижней панелями, поэтому в дальнейших расчётах массы подкосного крыла $N_{\text{под}}$ можно не учитывать.

Тогда масса элементов продольного силового набора $m_{\text{прод}}$ равна:

$$\begin{aligned} m_{\text{прод}} &= \frac{4\rho}{\sigma^P \cdot k \cdot \bar{c} \cdot b} \int_0^{l_k} M_{\text{из}} dz = \frac{4\rho}{\sigma^P \cdot k \cdot \bar{c} \cdot b} \left\{ \int_0^{l_k} \frac{qz^2}{2} dz - \int_{l_k - l_Q}^{l_k} [Q_{\text{под}} (z - (l_k - l_Q))] dz \right\} = \\ &= \frac{4\rho}{\sigma^P \cdot k \cdot \bar{c} \cdot b} \left(\frac{ql_k^3}{6} - \frac{ql_k^2 l_Q}{4l_Q} \right) = \left(\frac{\rho \cdot G \cdot n^P l_k}{\sigma^P \cdot k \cdot \bar{c} \cdot b} \right) \cdot \left(\frac{l_k}{3} - \frac{l_{Qk}}{2} \right). \end{aligned}$$

Учтём массу двух подкосов длиной $l_{\text{под}} = \sqrt{a^2 + h^2}$:

$$m_{\text{под}} = 2k_1 \cdot l_{\text{под}} \cdot F_{\text{под}} \cdot \rho,$$

где k_1 – коэффициент, учитывающий тип подкоса.

Величина коэффициента k_1 определена в работе [2]: $k_1 = 1$ для одинарного подкоса; $k_1 = 1,1$ для V-образного подкоса; $k_1 = 1,2$ для двойного подкоса.

При этом площадь поперечного сечения подкоса $F_{\text{под}} = \frac{S_{\text{под}}}{\sigma^P}$ и растягивающее усилие

в подкосе $S_{\text{под}} = \frac{Q_{\text{под}}}{\sin \alpha} = \frac{q \cdot l_k^2 \cdot l_{\text{под}}}{2l_Q \cdot h}$, тогда

$$m_{\text{под}} = 2k_1 \cdot l_{\text{под}} \cdot \frac{q \cdot l_k^2 \cdot l_{\text{под}}}{2l_Q \cdot h \cdot \sigma^P} \cdot \rho = \left(\frac{\rho \cdot G \cdot n^P l_k}{\sigma^P \cdot k \cdot \bar{c} \cdot b} \right) \cdot \left(\frac{k_1 \cdot l_{\text{под}}^2}{2l_Q \cdot h} \right).$$

Суммарная масса всех силовых элементов подкосного крыла, воспринимающих изгиб, $m_{\text{прод.под}}$:

$$m_{\text{прод.под}} = m_{\text{прод}} + m_{\text{под}} = \frac{\rho \cdot G \cdot n^P l_k}{\sigma^P} \cdot \left(\frac{l_k}{k \cdot \bar{c} \cdot b} - \frac{l_Q}{2} + \frac{k_1 \cdot l_{\text{под}}^2}{2l_Q \cdot h} \right).$$

Таким образом, получаем отношение массы силовых элементов, воспринимающих изгиб в подкосном крыле, к массе таких же элементов в свободносущем крыле:

$$\frac{m_{\text{прод.под}}}{m_{\text{прод.св}}} = \frac{\frac{l_k}{k \cdot \bar{c} \cdot b} - \frac{l_Q}{2} + \frac{k_1 \cdot l_{\text{под}}^2}{2l_Q \cdot h}}{\frac{l_k}{3k \cdot \bar{c} \cdot b}}. \quad (1)$$

Формулой (1) можно пользоваться, если эпюра изгибающих моментов для подкосного крыла будет одного знака (см. рис. 3, а).

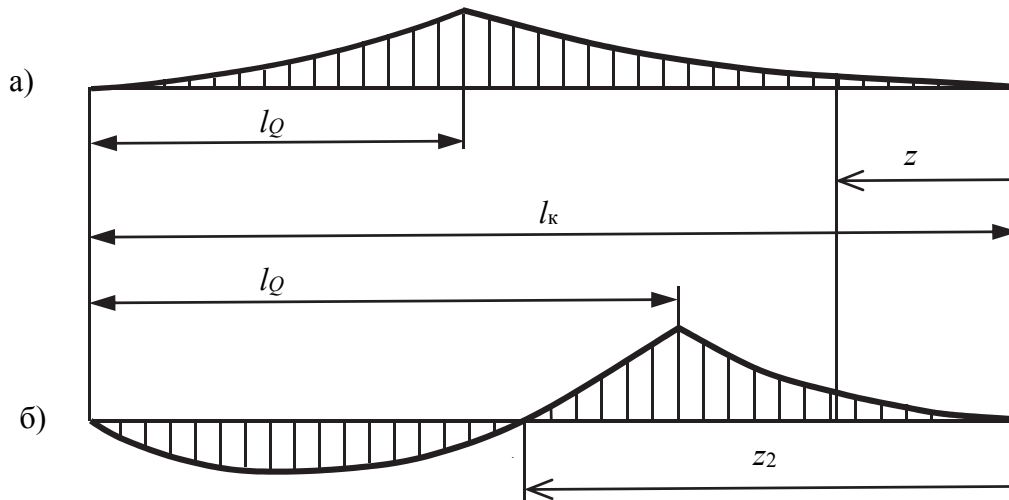


Рис. 3. Эпюры изгибающего момента для подкосного крыла:
а – короткие подкосы; б – длинные подкосы

Найдём максимальное значение l_Q , при котором формула (1) ещё работает. Для этого приравняем к нулю выражение для изгибающего момента:

$$M_{из} = \frac{q \cdot z^2}{2} - Q_{под} (z - (l_k - l_Q)) = z^2 - \frac{l_k^2}{l_Q} \cdot z + \frac{l_k^2}{l_Q} \cdot (l_k - l_Q) = 0.$$

Получили квадратное уравнение, имеющее два корня, один из которых $z_1 = l_k$. Найдём второй корень:

$$(z - z_1) \cdot (z - z_2) = (z - l_k) \cdot (z - z_2) = z^2 - \frac{l_k^2}{l_Q} \cdot z + \frac{l_k^2}{l_Q} \cdot (l_k - l_Q).$$

После преобразований получим

$$z_2 = \frac{l_k^2}{l_Q} - l_k. \quad (2)$$

Пусть $z_2 = l_k$, тогда $l_Q = \frac{l_k}{2}$, т.е. формулой (1) можно пользоваться, если $l_Q \leq \frac{l_k}{2}$.

Пример. Сравнить массы одинаковых по геометрии свободнонесущего и подкосного крыльев. Исходные данные: $G = 24$ кН; $n^p = 4,5$; $l_k = 6$ м; $l_Q = 3$ м; $a = 1,5$ м; $h = 1,3$ м; $b = 1,8$ м; $\bar{n} = 0,12$; $\kappa = 0,9$; подкос одинарный.

Поскольку $l_Q = \frac{l_k}{2}$, то можно использовать формулу (1):

$$\frac{m_{прод.под}}{m_{прод.св}} = \frac{\frac{6}{3} - \frac{3}{2}}{0,9 \cdot 0,12 \cdot 1,8} + \frac{1,5^2 + 1,3^2}{2 \cdot 3 \cdot 1,3} \approx 0,3.$$

Если массу свободонесущего крыла принять за 100 %, то масса подкосного крыла составит примерно $(1 - 0,33 + 0,33 \cdot 0,3) \cdot 100 \% = 77 \%$.

Формулу (1) можно применить для анализа предельного варианта при креплении подкоса в концевом сечении при $z = 0$ ($l_k = l_Q$). В этом случае первое слагаемое в числителе формулы (1) необходимо брать по модулю. Если для нашего примера принять $l_Q = l_k = 6$ м и $a = 4,5$ м, то

$$\frac{m_{\text{под.под}}}{m_{\text{под.св}}} = \frac{\left| \frac{6}{3} - \frac{6}{2} \right| + \frac{4,5^2 + 1,3^2}{2 \cdot 6 \cdot 1,3}}{6} \approx 0,637.$$

$$\frac{m_{\text{под.под}}}{m_{\text{под.св}}} = \frac{0,9 \cdot 0,12 \cdot 1,8}{3 \cdot 0,9 \cdot 0,12 \cdot 1,8} \approx 0,637.$$

Таким образом, выигрыш в массе составит примерно $(1 - 0,637) \cdot 33 \% = 12 \%$.

На самом деле выигрыш в массе будет меньше, поскольку распределение воздушной нагрузки по размаху реального крыла определяется кривой циркуляции и центр давления на крыле будет смещен к корневому сечению.

Если $l_Q \geq \frac{l_k}{2}$, то эпюра изгибающих моментов для подкосного крыла будет иметь вид,

представленный на рис. 3, б. Координата z_2 определяется формулой (2). Интеграл $\int_0^{l_k} M_{\text{из}} dz$ разбиваем на три части с пределами интегрирования от 0 до $(l_k - l_Q)$, от $(l_k - l_Q)$ до z_2 и от z_2 до l_k . На последнем участке интеграл берём со знаком минус. Получим:

$$\int_0^{l_k} M_{\text{из}} dz = \int_0^{l_k - l_Q} \frac{qz^2}{2} dz + \int_{l_k - l_Q}^{z_2} \left[\frac{qz^2}{2} - Q_{\text{под}}(z - l_k + l_Q) \right] dz - \int_{z_2}^{l_k} \left[\frac{qz^2}{2} - Q_{\text{под}}(z - l_k + l_Q) \right] dz =$$

$$= \frac{q}{2} \left\{ \frac{1}{3} (2z_2^3 - l_k^3) + \frac{l_k^2}{l_Q} \left[-z_2^2 + \frac{(l_k - l_Q)^2 + l_k^2}{2} + (l_k - l_Q) \cdot (2z_2 - 2l_k + l_Q) \right] \right\}.$$

Подставим значение z_2 в последнюю формулу:

$$\int_0^{l_k} M_{\text{из}} dz = \frac{Gn^p l_k}{4} \left\{ \frac{l_k}{3} \left[\frac{2(l_k - l_Q)^3}{l_Q^3} - 1 \right] + \frac{1}{l_Q} \left[\frac{(l_k - l_Q)^2 + l_k^2}{2} - \frac{l_k^2 (l_k - l_Q)^2}{l_Q^2} + (l_k - l_Q) \cdot \left(\frac{2l_k (l_k - l_Q)}{l_Q} - 2l_k + l_Q \right) \right] \right\}.$$

Обозначим выражение в фигурных скобках через A , тогда

$$\int_0^{l_k} M_{\text{из}} dz = \frac{Gn^p l_k}{4} \cdot A.$$

Масса элементов продольного силового набора:

$$m_{\text{прод}} = \frac{4\rho}{\sigma^P \kappa \cdot \bar{c} \cdot b} \int_0^{l_k} M_{\text{изг}} dz = \frac{\rho \cdot G \cdot n^P \cdot l_k}{\sigma^P \kappa \cdot \bar{c} \cdot b} \cdot A.$$

Суммарная масса всех силовых элементов подкосного крыла, работающих на изгиб:

$$m_{\text{прод.под}} = m_{\text{прод}} + m_{\text{под}} = \frac{\rho \cdot G \cdot n^P l_k}{\sigma^P} \cdot \left(\frac{A}{\kappa \cdot \bar{c} \cdot b} + \frac{\kappa_1 \cdot l_{\text{под}}^2}{2l_Q \cdot h} \right).$$

По аналогии с формулой (1) можно записать

$$\frac{m_{\text{прод.под}}}{m_{\text{прод.св}}} = \frac{\frac{A}{\kappa \cdot \bar{c} \cdot b} + \frac{\kappa_1 \cdot l_{\text{под}}^2}{2l_Q \cdot h}}{\frac{l_k}{3\kappa \cdot \bar{c} \cdot b}}. \quad (3)$$

Проиллюстрируем формулу (3), определив, при каком отношении (l_Q/l_k) будет иметь место минимум массы крыла. Все исходные данные взяты из примера. Результаты расчётов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Отношение силовых масс, воспринимающих изгиб, в подкосном и свободнонесущем крыле

$\frac{l_Q}{l_k}$	0,55	0,6	0,62	0,63	0,64	0,65	0,7	0,75	0,8	0,9	1,0
$\frac{m_{\text{прод.под}}}{m_{\text{прод.св}}}$	0,237	0,20	0,195	0,193	0,194	0,195	0,217	0,26	0,32	0,469	0,637

Минимум отношения масс имеет место, когда (l_Q/l_k) = 0,63. При этом выигрыш в массе подкосного крыла составит $(1 - 0,193) \cdot 33 \% = 26,6 \%$.

Поиск рациональных параметров несущей системы можно вести по условию минимума суммы массы крыла $m_{\text{кр}}$ и массы топлива $m_{\text{т.кр}}$, необходимого для преодоления аэродинамического сопротивления от несущей системы на крейсерском этапе полёта [2]:

$$m_{\text{кр}} + m_{\text{т.кр}} \Rightarrow \min. \quad (4)$$

Поэтому для дальнейшего анализа необходимо рассчитать размеры поперечного сечения подкоса. Здесь компромиссным с точки зрения прочности, устойчивости, аэродинамики и технологии является сечение каплевидной формы (рис. 4) с отношением сторон ($a_{\text{п}}/b_{\text{п}}$) = 3, которое может быть получено, к примеру, сплющиванием тонкостенной металлической трубы толщиной δ или намоткой угле- или стеклоткани на профилированную оправку.

Геометрические характеристики поперечного сечения такого профилированного подкоса приведены в источнике [5]. Площадь поперечного сечения

$$F_{\text{под}} = 1,57 \cdot (a_{\text{п}} + b_{\text{п}}) \cdot \delta = 6,28 \cdot b_{\text{п}} \cdot \delta.$$

Осевой момент инерции

$$J_x = (0,8a_{\text{п}} - 1,24b_{\text{п}}) \cdot b_{\text{п}}^2 \cdot \delta = 1,16 \cdot b_{\text{п}}^3 \cdot \delta.$$

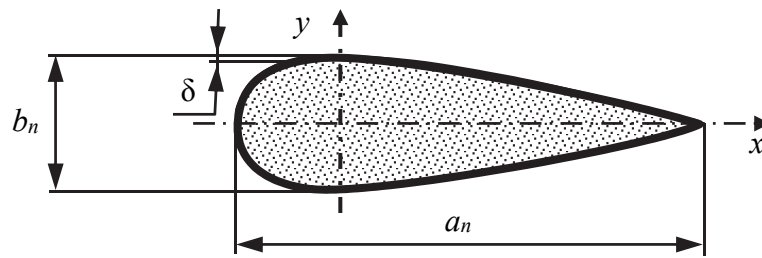


Рис. 4. Сечение подкоса

Для определения двух размеров b_n и δ используем три неравенства, отражающие условие прочности и условия общей и местной потери устойчивости подкоса.

Из условия прочности получим

$$\frac{S_{\text{под}}}{F_{\text{под}}} \leq \sigma^P \Rightarrow b_n \cdot \delta \geq 0,04 \frac{G \cdot n^P l_{\text{к}}}{l_Q} \cdot \frac{l_{\text{под}}}{h} \cdot \frac{1}{\sigma^P}. \quad (5)$$

Согласно расчётным случаям нагружения крыла D и D' , сжимающее усилие в подкосе составляет 40 % от растягивающего усилия. Формула Эйлера для критической нагрузки $P_{\text{кр}}$ учитывает общую потерю устойчивости подкоса:

$$P_{\text{кр}} = \frac{\pi^2 EJ_x}{l_{\text{под}}^2} \geq 0,4 \cdot S_{\text{под}} \Rightarrow b_n^3 \cdot \delta \geq 0,0087 \frac{G \cdot n^P l_{\text{к}}}{l_Q} \cdot \frac{l_{\text{под}}^3}{h} \cdot \frac{1}{E}, \quad (6)$$

где E – модуль упругости.

Критические напряжения местной потери устойчивости подкоса определяют по формуле из [3]:

$$\sigma_{\text{кр.м}} = \kappa_3 \frac{E \cdot \delta}{R} \geq 0,4 \cdot \frac{S_{\text{под}}}{F_{\text{под}}}.$$

Здесь $R = \frac{(a_n/2)^2}{(b_n/2)} = 4,5 \cdot b_n$; среднее значение коэффициента устойчивости $\kappa_3 = 0,4$.

После преобразований получим

$$\delta \geq 0,423 \sqrt{\frac{G \cdot n^P l_{\text{к}}}{l_Q} \cdot \frac{l_{\text{под}}}{h} \cdot \frac{1}{E}}. \quad (7)$$

Сначала рассчитаем размер δ из условия (7). Затем находим размер b_n из условий (5) или (6). Если b_n будет определяться условием (6), то целесообразно поставить контрподкос и тогда данный размер можно уменьшить в 1,6 раза.

Для иллюстрации возьмем данные из примера и рассчитаем геометрию поперечного сечения подкоса, изготовленного из дюралюминиевой трубы с модулем упругости $E = 0,7 \cdot 10^5$ МПа и пределом прочности $\sigma^P = 400$ МПа. Из формулы (7) получим

$$\delta \geq 0,423 \sqrt{\frac{24000 \cdot 4,5 \cdot 6}{3} \cdot \frac{1,98}{1,3} \cdot \frac{1}{0,7 \cdot 10^5}} = 0,91 \text{ мм}.$$



Из условия прочности (5) имеем $b_1 \geq 36$ мм, из условия общей потери устойчивости (6) находим $b_1 \geq 56$ мм. Поставим контрподкос, и тогда $b_1 \geq 56/1,6 = 35$ мм. Окончательно получим $\delta = 1$ мм; $a_{\text{п}} = 36$ мм; $b_{\text{п}} = 108$ мм.

Масса топлива, затрачиваемая на преодоление воздушного сопротивления от крыла и двух подкосов при полёте с крейсерской скоростью $V_{\text{кр}}$ на высоте H на дальность L

$$m_{\text{т.кр}} = \frac{(c_{\text{х.кр}}S + 2(c_{\text{х.под}}S) \cdot l_{\text{под}} + 2(c_{\text{х.уз}}S)) \cdot \frac{\rho_H V_{\text{кр}}^2}{2} \cdot L}{\eta_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{р}} \cdot \eta_{\text{в}} \cdot c_{\text{т}}},$$

где $c_{\text{х.кр}}$ – коэффициент сопротивления свободнонесущего крыла; $c_{\text{х.под}}$, $c_{\text{х.уз}}$ – коэффициенты сопротивления одного погонного метра подкосов и пары узлов крепления подкосов соответственно (их значения приведены в [1] как функции размера $b_{\text{п}}$); S – площадь крыла; ρ_H – плотность воздуха на высоте H ; $\eta_{\text{дв}}$, $\eta_{\text{р}}$, $\eta_{\text{в}}$ – КПД двигателя, редуктора и винта соответственно; $c_{\text{т}}$ – теплотворная способность топлива.

Таким образом, представленные формулы и алгоритмы позволяют разработчику оценить массу подкосного крыла и проводить весовой параметрический анализ несущей системы по условию (4) на этапе формирования облика самолёта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бадягин, А. А. Проектирование лёгких самолётов / А. А. Бадягин, Ф. А. Мухамедов. – М.: Машиностроение, 1978. – 208 с.
2. Бадягин, А. А. Сравнение лёгких самолётов с подкосным и свободнонесущим крылом / А. А. Бадягин // Известия вузов: Авиационная техника. – 1980. – № 4. – С. 11-17.
3. Лизин, В. Т. Проектирование тонкостенных конструкций / В. Т. Лизин, В. А. Пяткин. – 3-е изд. – М.: Машиностроение, 1994. – 384 с.
4. Приходько, Н. Б. Об исследовании эффективности и уменьшения массы крыла унифицированного самолёта / Н. Б. Приходько // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № IV-1(8). – С.9-11.
5. Справочная книга по расчёту самолёта на прочность / М. Ф. Астахов, А. В. Караваяев, С. Я. Макаров [и др]. – М.: Оборонгиз, 1954. – 708 с.
6. Фадеев, Н. Н. Теоретическая формула веса трапециевидного крыла / Н. Н. Фадеев // Труды МАИ. – 1961. – № 138. – С. 28-47.
7. Шейнин, В. М. Весовое проектирование и эффективность пассажирских самолётов : справ. / В. М. Шейнин, В. И. Козловский. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1984. – 552 с.

Ким К. К., Зазыбина Е. Б.
K. K. Kim, E. B. Zazybina

ПРОЦЕССЫ ДИФФУЗИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В МАГНИТОПРОВОД МАГНИТНОГО ПОДШИПНИКА

MAGNETIC FIELD DIFFUSION INTO THE MAGNETIC BEARING'S



Ким Константин Константинович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9; 89030965770. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Mr. Konstantin K. Kim – Dr.habil. of Engineering, Professor, Head of the Department of Electric Engineering Theory, St.-Petersburg State Transport University (Russia, Saint-Petersburg); 9, Moskovsky Ave., Saint-Petersburg, 190031; +7 (903) 0965770. E-mail: kimkk@inbox.ru.



Зазыбина Елена Борисовна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретические основы электротехники» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9; 89602452557. E-mail: ktOE@pgups.edu.

Mr. Elena B. Zazybina – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Electric Engineering Theory, St.-Petersburg State Transport University (Russia, Saint-Petersburg); 9, Moskovsky Ave., Saint-Petersburg, 190031; +7 (960) 2452557. E-mail:

ktOE@pgups.edu.

Аннотация. Рассматриваются процессы диффузии магнитного поля в магнитопроед магнитного подшипника при резких изменениях токов в обмотках подшипников. Выводится формула для эффективного времени релаксации, связанного с возникновением вихревых токов при скачкообразном изменении поля подшипника.

Summary. We consider the process of magnetic field diffusion into the magnetic core of a magnetic bearing when current steps take place in the bearing's windings. We deduce a formula for the effective relaxation time linked to the emergence of Foucault currents during the bearing field steps.

Ключевые слова: магнитный подшипник, магнитопроед, диффузия, магнитное поле, время релаксации.

Key words: magnetic bearing, magnetic core, magnetic field, relaxation time.

УДК 621.2:62-25

В последнее время в различных областях техники проблеме магнитного удержания тел уделяется все большее внимание [1]. Сущность магнитного удержания состоит в том, что сила тяжести тела и приложенная к нему нагрузка уравнивается силой, создаваемой магнитным полем, в результате чего тело находится в подвешенном состоянии или совершает движение, не контактируя с окружающими телами.

Указанная сила есть результат функционирования так называемых магнитных подшипников, в большинстве случаев, представляющих собой систему из удерживаемого ферромагнитного тела (например, цапфа вращающегося вала) и датчиков его положения, связанных с удерживающими электромагнитами отрицательными обратными связями. Электромагниты могут быть выполнены в виде полюсов кольцеобразного магнитопроеда. На

рис. 1 показан фрагмент магнитного подшипника. Таким образом, магнитопровод удерживающего электромагнита и цапфа – основные элементы системы магнитного удержания вала. Их магнитные свойства во многом определяют характеристики системы, поэтому возникла необходимость рассмотреть вопросы, связанные с процессами установления магнитного поля в этих элементах при резких изменениях токов в обмотках электромагнитов. Вероятно, что дополнительная инерционность системы, связанная с диффузией магнитного поля в магнитопроводы и цапфу, может влиять на характеристики устойчивости системы автоматического управления.

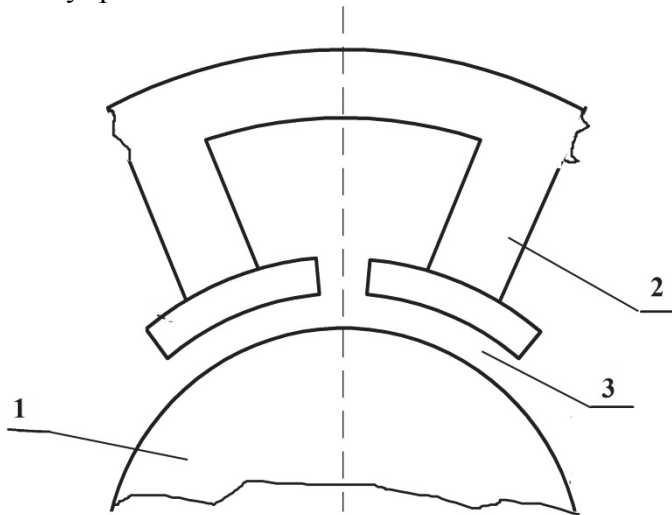


Рис. 1. Фрагмент магнитного подшипника: 1 – цапфа; 2 – полюс; 3 – воздушный зазор

Рассмотрим задачу в следующей постановке. Пусть в декартовой системе координат x, y, z область $-T < z < 0$ занята ферромагнитным телом с относительной магнитной проницаемостью μ и удельной электропроводностью σ . Для областей $z > 0$ и $z < -T$ указанные параметры имеют значения $\mu = 1$ и $\sigma = 0$, причём в области $z > 0$ располагается источник, создающий магнитное поле, которое считается известным. До момента времени $t = 0$ источник поля не работает, включение источника происходит в момент $t = 0$ с последующим переходным процессом. Для времени $t \rightarrow \infty$ (установившийся режим) поле источника считается известным и

независимым от времени. Задачей является определение поля внутри ферромагнитной плиты ($-T < z < 0$) и над ней ($z > 0$) как функции времени.

Используем уравнение диффузии магнитного поля:

$$\Delta \vec{B} = \mu \mu_0 \sigma \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}. \quad (1)$$

Здесь \vec{B} – вектор индукции, μ_0 – магнитная постоянная, Δ – оператор Лапласа. К уравнению (1) должны быть добавлены граничные условия, выражающие непрерывность нормальной компоненты \vec{B} и тангенциальной компоненты вектора напряжённости магнитного поля $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu \mu_0}$. Если верхними индексами (1) и (2) обозначать граничные значения величин по разные стороны границы (соответственно в областях 1 и 2), то названные граничные условия имеют вид:

$$B_z^{(1)} = B_z^{(2)}, \quad (2)$$

$$H_{x,y}^{(1)} = H_{x,y}^{(2)}. \quad (3)$$

Применим Фурье-преобразование по переменным x, y и Лаплас-преобразование по временной переменной t к уравнению (1). Чтобы избежать усложнения в записи, не будем для изображения вводить новые обозначения. Различие между оригиналом и изображением будет подчёркиваться различием в их аргументах:

$$\vec{B}(\vec{k}, z, p) = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint_{-\infty}^{\infty} e^{i\vec{k}\vec{r}} d\vec{r} \int_0^{\infty} e^{-pt} \vec{B}(\vec{r}, z, t) dt, \quad (4)$$

здесь введены обозначения: $\vec{r} = x\vec{e}_x + y\vec{e}_y$, $\vec{k} = k_x\vec{e}_x + k_y\vec{e}_y$ (\vec{e}_x и \vec{e}_y – орты вдоль направления координатных осей x, y).

Применительно к изображению $\vec{B}(\vec{k}, z, p)$ уравнение (1) имеет вид:

$$\frac{d^2 \vec{B}}{dz^2} = \alpha^2 \vec{B}, \quad \alpha = \sqrt{k^2 + \mu \mu_0 \sigma p} \quad (5)$$

где $k^2 = |\vec{k}|^2$ и для радикала, определяющего α , выбирается (с целью определённости) ветвь, отвечающая положительным α при вещественном положительном значении величины $k^2 + \mu \mu_0 \sigma p$.

Так как основной интерес представляет временная зависимость для полей вне и внутри ферромагнитной пластины, далее не будем в явном виде совершать обратное Фурье-преобразование по пространственной координате \vec{r} . То есть считаем, что источник магнитного поля имеет вид единственной пространственной гармоники $\exp(i\vec{k}\vec{r})$ с заданным волновым вектором \vec{k} . Такой подход не уменьшает общности в постановке задачи, поскольку при известном решении, отвечающем указанному источнику, решение для источника ограниченного размера находится путём вычисления обратного Фурье-преобразования. Однако на практике в этом часто нет необходимости, так как форма реального источника приближенно может учитываться по отдельным гармоникам, вносящим основной вклад в пространственный спектр.

Рассмотрим решение уравнения (5) при граничных условиях (2), (3) для двух смежных полупространств с границей $z = 0$. Пусть в области 1 (при $z > 0$) имеем $\mu = \mu_1$ и $\alpha = \alpha_1$, а в области 2 соответственно $\mu = \mu_2$ и $\sigma = \sigma_2$. Будем считать, что источник, расположенный в области 1, создает на этой границе $z = 0$ -компоненту вектора индукции с единичной амплитудой. В соответствии с уравнением (5) решения для z -компоненты B_z в областях 1 и 2 могут быть представлены соответственно в форме:

$$B_z^1 = \mathcal{R}e^{-\alpha_1 z} + e^{\alpha_1 z}, \quad (6)$$

$$B_z^2 = \mathcal{T}e^{\alpha_2 z}. \quad (7)$$

Второе слагаемое в формуле (6) отвечает наличию источника в области 1. При этом соотношение (6) справедливо при $z < h$, где $z = h$ – координата расположения источника. Величины \mathcal{R} и \mathcal{T} имеют смысл коэффициентов отражения и преломления для z -компоненты B_z и подлежат определению с учетом граничных условий.

Подстановка (6) и (7) в (2) даёт:

$$\mathcal{T} = \mathcal{R} + 1. \quad (8)$$

Для использования условия (3) выразим x - и y -компоненты вектора \vec{B} через его z -компоненту. Условие $\text{rot}_z \vec{B} = 0$ в Фурье-представлении приводит к соотношению

$$k_x B_y^{(1,2)} = k_y B_x^{(1,2)}. \quad (9)$$

Условие же $\text{div} \vec{B} = 0$ даёт соответственно для областей 1 и 2 при $z = 0$:

$$\begin{cases} ik_x B_x^{(1)} + ik_y B_y^{(1)} - \alpha_1 \mathcal{R} + \alpha_1 = 0, \\ ik_x B_x^{(2)} + ik_y B_y^{(2)} + \alpha_2 \mathcal{T} = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Подстановка (9) и (10) позволяет выразить величины $B_x^{(1)}$ и $B_x^{(2)}$ через коэффициенты отражения и преломления:

$$\begin{cases} B_x^{(1)} = \frac{-ik_x \alpha_1 (\mathcal{R} - 1)}{k^2}, \\ B_x^{(2)} = \frac{ik_x \alpha_2 \mathcal{T}}{k^2}. \end{cases} \quad (11)$$

Тогда соотношение (3) для z -компоненты получает вид:

$$\frac{\alpha_1}{\mu_1} (\mathcal{R} + 1) = \frac{\alpha_2}{\mu} \mathcal{T}. \quad (12)$$

Система уравнений (8) и (12) позволяет найти \mathcal{R} и \mathcal{T} :

$$\mathcal{R} = \frac{\alpha_1 \mu_2 - \alpha_2 \mu_1}{\alpha_1 \mu_2 + \alpha_2 \mu_1}, \quad (13)$$

$$\mathcal{T} = \frac{2\alpha_1 \mu_2}{\alpha_1 \mu_2 + \alpha_2 \mu_1}. \quad (14)$$

В дальнейшем для того, чтобы подчеркнуть, что магнитное поле проникает из среды 1 в среду 2, величины \mathcal{R} и \mathcal{T} в (13) и (14) будем снабжать индексом 12. Если же считать, что источник находится в среде 2, то в соотношениях (13) и (14) следует поменять местами индексы 1 и 2. Получающиеся при этом величины \mathcal{R} и \mathcal{T} будем отмечать индексом 21.

После проведённого вспомогательного рассмотрения магнитное поле вне и внутри ферромагнитной пластины, имеющей толщину T , может быть рассчитано на основе оптического подхода [2]. При этом «отражённое» поле, то есть полное поле в области 1 при $z = 0$ за вычетом поля источника, даётся рядом:

$$\mathcal{R}_{\text{полн}} = \mathcal{R}_{12} + \mathcal{T}_{12} \mathcal{T}_{21} \mathcal{R}_{21} e^{-2\alpha_2 T} + \mathcal{T}_{12} \mathcal{T}_{21} \mathcal{R}_{21}^3 e^{-4\alpha_2 T} + \dots = \mathcal{R}_{12} + \frac{\mathcal{T}_{12} \mathcal{T}_{21} \mathcal{R}_{21} e^{-2\alpha_2 T}}{1 - \mathcal{R}_{21}^2 e^{-2\alpha_2 T}}.$$

Явное выражение для величины $\mathcal{R}_{\text{полн}}$ через параметры системы находится при учёте соотношений $\mu_1 = 1$, $\mu_2 = \mu$, $\alpha_1 = k$, $\alpha_2 = \alpha$ и формул (13) и (14):

$$\mathcal{R}_{\text{полн}} = \frac{k\mu - \alpha}{k\mu + \alpha} - \frac{\frac{1}{\alpha} k\mu \frac{k\mu - \alpha}{(k\mu + \alpha)^3} e^{-2\alpha T}}{1 - \left(\frac{k\mu - \alpha}{k\mu + \alpha}\right)^2 e^{-2\alpha T}} = \frac{k\mu - \alpha}{k\mu + \alpha} \times \frac{1 - e^{-2\alpha T}}{1 - \left(\frac{k\mu - \alpha}{k\mu + \alpha}\right)^2 e^{-2\alpha T}}. \quad (15)$$

Сначала определим временную зависимость «отражённого» поля. Для этого перепишем выражение (15) следующим образом:

$$\mathcal{R}_{\text{полн}} = \frac{k^2 \mu^2 - \alpha^2}{(k^2 \mu^2 + \alpha^2) + 2k\mu\alpha \operatorname{cth} \alpha T}. \quad (16)$$

Искомая временная зависимость поля определяется теперь из (16) с помощью обратного преобразования Лапласа:

$$B(t) = \frac{B_0}{2\pi i} \oint_c \frac{e^{pt}}{p} \times \frac{k^2 \mu^2 - \alpha^2}{k^2 \mu^2 + \alpha^2 + 2k\mu\alpha \operatorname{cth} \alpha T} dp. \quad (17)$$

Здесь коэффициент B_0 учитывает реальную величину поля источника на границе $z = 0$, а множитель $\frac{1}{p}$ под интегралом отвечает включению поля в момент $t = 0$. Контур интегрирования c расположен справа от особенностей подынтегрального выражения и может совпадать с прямой $(s - i\infty, s + i\infty)$, $s > 0$. Отметим, что в соответствии с (5) величина α в (17) зависит от переменной интегрирования p .

При анализе выражения (17) выполним замену переменной в соответствии с формулой $p = \frac{k^2(z^2 - 1)}{\mu\mu_0\sigma}$. Для новой переменной z контур интегрирования представляет собой гиперболу с асимптотами $\arg z = \pm \frac{\pi}{4}$, пересекающую вещественную ось в точке $z = 1 + \frac{\mu\mu_0\sigma}{k^2} > 1$. Обозначая этот контур символом Γ , перепишем формулу (17) для переменной z :

$$B(t) = \frac{B_0 e^{-vt}}{\pi i} \oint_{\Gamma} \frac{z(\mu^2 - z^2) e^{z^2 vt} dz}{(z^2 - 1)(\mu^2 + z^2 + 2\mu z \operatorname{cth} \theta z)}, \quad (18)$$

где

$$v = \frac{k^2}{\mu\mu_0\sigma}, \quad \theta = kT. \quad (19)$$

Для случая толстой пластины, когда $\theta \rightarrow \infty$ ($\text{cth } \theta z \rightarrow 1$), имеем:

$$B(t) = \frac{B_0 e^{vt}}{\pi i} \oint_{\Gamma} \frac{z(\mu - z)e^{z^2 vt} dz}{(z^2 - 1)(\mu + z)}. \quad (20)$$

Контур Γ в (20) находится правее точки $z = 1$, являющейся полюсом подынтегрального выражения. Если учесть вычет в этом полюсе и переместить контур Γ на мнимую ось (поведение подынтегральной функции на плоскости z позволяет произвести соответствующую деформацию контура), то, вводя обозначение $x = -iz$, получаем:

$$B(t) = \frac{\mu - 1}{\mu + 1} B_0 - \frac{2\mu B_0 e^{-vt}}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x^2 e^{-x^2 vt} dx}{(1 + x^2)(\mu^2 + x^2)}. \quad (21)$$

Записывая интеграл в виде разности:

$$\frac{1}{\mu^2 - 1} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \frac{x^2 e^{-x^2 vt}}{1 + x^2} dx - \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x^2 e^{x^2 vt}}{\mu^2 + x^2} dx \right]$$

и учитывая формулу [2]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{x^2 e^{-\beta x^2}}{a^2 + x^2} dx = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sqrt{x} e^{-\beta x}}{a^2 + x} dx = \sqrt{\frac{\pi}{\beta}} - \pi a e^{a^2 \beta} \text{erfc}(a\sqrt{\beta}), \quad (22)$$

где интеграл вероятности $\text{erfc}(x)$ определяется выражением

$$\text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt, \quad (23)$$

находим следующее аналитическое выражение:

$$B(t) = B_0 \left\{ \frac{\mu - 1}{\mu + 1} - \frac{2\mu^2}{\mu^2 - 1} \left[e^{-(\mu^2 - 1)vt} \text{erfc}(\mu\sqrt{vt}) - \frac{1}{\mu} \text{erfc}\sqrt{vt} \right] \right\}. \quad (24)$$

Характер этой функции зависит от значения величин относительной магнитной проницаемости и проводимости σ , определяющих в совокупности параметры μ и ν в (24). Нетрудно определить в частности, что для идеального диамагнетика ($\mu = 0$) или для бесконечно высокой проводимости σ (при этом $\nu = 0$ для конечных μ) имеем $B(t) = -B_0$. Нас, однако, интересует случай больших по величине (но конечных) значений μ и конечных ν . При $\mu \gg 1$ из (24) получаем приближенную формулу

$$B(t) \approx B_0 [1 - 2e^{-\mu^2 vt} \text{erfc}(\mu\sqrt{vt})], \quad (25)$$

соответствующую данному случаю, когда не принимается во внимание конечная толщина T ферромагнитной пластины. Как видно из формулы (25), задержка, определяющая время установления процесса, равна

$$\tau_0 = \frac{1}{\nu \mu^2} = \frac{\mu_0 \sigma}{k^2 \mu}. \quad (26)$$

Таким образом, для толстой ферромагнитной пластины (количественные требования на величину T определяются ниже) инерционность, связанная с конечным временем диффузии магнитного поля в плиту, становится существенной при частотах порядка $f_0 = \frac{1}{\tau_0}$ и выше. Например, для $k = 20 \text{ м}^{-1}$, $\mu = 600$ и $\sigma = 10^7 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$ имеем $f_0 \approx 2 \times 10^4 \text{ Гц}$.

Поясним физический смысл формулы (25). При $t = 0$, когда величина внешнего поля меняется скачком, в тонком поверхностном слое плиты индуцируются вихревые токи весьма большой плотности и плита работает как идеальный диамагнетик. Этому случаю по формуле (25) отвечает значение $B(t = 0) = -B_0$. При $t \rightarrow \infty$, когда вихревые токи затухли, плита ведет себя как ферромагнитное тело в статическом режиме, и при учете сделанного предположения о высоком значении магнитной проницаемости μ из (25) получаем $B(t \rightarrow \infty) = B_0$,

что отвечает режиму работы идеального ферромагнетика ($\mu = \infty$). Таким образом, с увеличением времени функция $B(t)$ плавно изменяется от значения $-B_0$ до значения B_0 , проходя при $t \approx \tau_0$ через нулевое значение.

Теперь перейдём к учёту конечной толщины T ферромагнитной пластины. Здесь не удаётся получить для функции $B(t)$ аналитического выражения типа (24), поэтому ограничимся приближённой оценкой, определяющей влияние толщины T на ход процесса.

Вернемся к формуле (18). При конечном θ подинтегральное выражение имеет два полюса на вещественной оси $z = \pm 1$ и набор полюсов на мнимой оси, определяемых уравнением:

$$\mu^2 + z^2 + 2\mu z \operatorname{cth} \theta z = 0. \quad (27)$$

Вводя обозначение $z = ix$, перепишем уравнение (27) в виде:

$$\frac{x^2 - \mu^2}{2\mu x} = \operatorname{cth} \theta x. \quad (28)$$

Уравнение (28) имеет бесконечное число корней: $\pm x_1, \pm x_2, \pm x_3, \dots$ (значения x_n считаются положительными и растущими с увеличением номера n). Переходя в (18) к интегрированию по мнимой оси и учитывая вычет в полюсе $z = 1$ и системы полувычетов при $z = \pm ix_1, \pm ix_2, \pm ix_3, \dots$, получаем:

$$B(t) = B_0 \left\{ \frac{\mu^2 - 1}{\mu^2 + 1 + 2\mu \operatorname{ctg} \theta} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x_n (\mu^2 + x_n^2) e^{-x_n^2 vt}}{(x_n^2 + 1) \left(x_n - \mu \operatorname{ctg} \theta x_n + \frac{\mu x_n \theta}{\sin^2 \theta x_n} \right)} \right\}. \quad (29)$$

Последнее выражение удобно для вычисления функции $B(t)$ при больших значениях t . Поскольку соседние корни уравнения (28) отстоят друг от друга на величину порядка $\frac{\pi}{\theta}$, то вследствие наличия в (29) экспоненциального множителя $\exp(-x_n^2 vt)$ бесконечный ряд можно заменить его первым членом ($n = 1$), если $t \gg \frac{\theta^2}{v\pi^2}$. Учитывая далее, что при $\mu \gg 1$ $x_1 \approx \frac{\pi}{\theta}$, имеем приближённо:

$$B(t) \approx B_0 \left\{ \frac{\mu^2 - 1}{\mu^2 + 1 + 2\mu \operatorname{cth} \theta} - q e^{-\frac{\pi^2 vt}{\theta^2}} \right\}, \quad t \gg \frac{\theta^2}{\pi^2 v}, \quad (30)$$

где q – коэффициент, зависящий от параметров системы. Таким образом, как следует из (29), при учёте конечной толщины ферромагнитной пластины скорость установления процессов при $t \gg \frac{\theta^2}{v\pi^2}$ определяется постоянной времени τ_1 , равной:

$$\tau_1 = \frac{\theta^2}{\pi^2 v} = \mu \mu_0 \frac{\sigma T^2}{\pi^2}. \quad (31)$$

Существенно отметить, что формула (30) определяет временные изменения функции $B(t)$ лишь при больших t , когда процесс почти установился. Для получения оценки реального времени задержки при конечной толщине пластины T необходимо рассмотреть изменение функции $B(t)$ при малых временах t . Для этого вернёмся к формуле (18) и будем считать, что интегрирование считается вдоль прямой, параллельной мнимой оси: $z = a + ix$. Постоянную a будем считать положительной и большой, а x изменяющимся от $-\infty$ до $+\infty$. В этом случае для функции $\operatorname{cth} \theta z$ на линии интегрирования справедливо приближённое представление вида $\operatorname{cth} \theta z = 1 + 2e^{-2\theta z}$, которое является тем более точным, чем больше величина a . Интеграл (18) может быть переписан в следующей форме:

$$B(t) = \frac{B_0 e^{(a^2-1)vt}}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(a + ix)[\mu^2 - (a + ix)^2] e^{-vtx^2} e^{2ivtax} dx}{[(a + ix)^2 - 1][\mu^2 + (a + ix)^2 + 2\mu(a + ix)(1 + 2e^{-2a\theta - 2i\theta x})]}. \quad (32)$$

Записывая выражение (32) в виде:

$$B(t) = \frac{B_0 e^{(a^2-1)vt}}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \varphi(x) e^{2ivtax} dx, \quad (33)$$

где

$$f(x) = \frac{(a + ix)[\mu^2 - (a + ix)^2]}{[(a + ix)^2][\mu^2 + (a + ix)^2 + 2\mu(a + ix)(1 + 2e^{-2a\theta - 2i\theta x})]}, \quad (34)$$

$$\varphi(x) = e^{-\nu t x^2}. \quad (35)$$

воспользуемся для вычисления интеграла (33) при малых t обобщённой формулой Парсеваля [3], согласно которой:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)\varphi(x)e^{i\lambda x} dx = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(s)\Phi(\lambda - s) ds. \quad (36)$$

Функции F и Φ в (36) являются Фурье-образами соответственно функций f и φ , так что, например, для функции F имеем

$$F(s) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{isx} f(x) dx, \quad (37)$$

аналогичный вид имеет связь функций Φ и φ . Определим функцию $F(s)$ по (37), где функция f задана равенством (34). С этой целью, принимая во внимание малость величин $\exp(-2a\theta)$ в знаменателе формулы (34), запишем $f(x)$ в следующей форме:

$$f(x) \cong f_0(x) + f_1(x)e^{-2a\theta}, \quad (38)$$

где

$$f_0(x) = \frac{(a + ix)[\mu - (a + ix)]}{[(a + ix)^2 - 1][\mu + (a + ix)]}, \quad (39)$$

$$f_1(x) = \frac{-\frac{1}{\mu}(a + ix)^2[\mu - (a + ix)]e^{-2i\theta x}}{[(a + ix)^2 - 1][\mu + (a + ix)]^3}. \quad (40)$$

Если при вычислении интеграла (33) по формуле (36) подставить для $f(x)$ в (37) приближение $f_0(x)$, то получится формула (24), определяющая временной процесс при бесконечной толщине ферромагнитной пластины. Следовательно, второе оставшееся слагаемое в формуле (38), пропорциональное $\exp(-2a\theta)$, есть поправка, обусловленная конечным значением толщины пластины. Для определения данной поправки в соотношении (37) вместо $f(x)$ будем подставлять величину $f_1(x) \exp(-2a\theta)$.

Итак, рассмотрим интеграл:

$$F(s) = -4\mu e^{-2a\theta} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(a + ix)^2[\mu - (a + ix)]e^{ix(s-2\theta)}}{[(a + ix)^2 - 1][\mu + (a + ix)]^3} dx. \quad (41)$$

Вычисляя его через вычеты в полюсах $x = i(a \pm 1)$ и через вычет в полюсе третьего порядка $x = i(\mu + a)$, находим:

$$F(s) = 4\pi\mu e^{as} \left[\frac{\mu - 1}{(\mu + 1)^3} e^{s-2\theta} - \frac{\mu + 1}{(\mu - 1)^3} e^{-(s-2\theta)} + \chi(s)e^{-\mu(s-2\theta)} \right] h(s - 2\theta), \quad (42)$$

где

$$\chi(s) = 8\mu \frac{1 + \mu^2}{(\mu^2 - 1)^3} + 2(s - 2\theta) \left[\frac{1 + 3\mu^2}{(\mu^2 - 1)^2} - 1 \right] + \frac{2\mu^3}{\mu^2 - 1} (s - 2\theta)^2 \quad (43)$$

и функция $h(s - 2\theta)$ определена соотношением $h(x) = 0$ при $x < 0$ и $h(x) = 1$ при $x \geq 0$.

Подставляя теперь в формулу (36) вместо функции $\Phi(\lambda - s)$ Фурье-образ функции (35), равный $\sqrt{\frac{\pi}{\nu t}} e^{-\frac{(\lambda-s)^2}{4\nu t}}$, а вместо $F(s)$ – выражение (43), находим для величины $B(t)$, определяемой соотношением (33), следующее значение:

$$B(t) = -4\mu B_0 e^{-vt} \sqrt{\frac{\pi}{vt}} \int_{2\theta}^{\infty} e^{-\frac{s^2}{4vt}} \times \\ \times \left[\frac{\mu-1}{(\mu+1)^3} e^{s-2\theta} - \frac{\mu+1}{(\mu-1)^3} e^{-(s-2\theta)} + \chi(s) e^{-\mu(s-2\theta)} \right] ds. \quad (44)$$

Это значение не зависит от произвольно выбранного параметра a . Заменой переменной $s = \sqrt{x^2 + 4\theta^2}$ последний интеграл сводится к виду:

$$B(t) = -4\mu B_0 e^{-vt} \sqrt{\frac{\pi}{vt}} \int_0^{\infty} \frac{x e^{-\frac{x^2+4\theta^2}{4vt}}}{\sqrt{x^2 + 4\theta^2}} \times \\ \times \left[\frac{\mu-1}{(\mu+1)^3} e^{x_1-2\theta} - \frac{\mu+1}{(\mu-1)^3} e^{-(x_1-2\theta)} + \chi(x_1) e^{-\mu(x_1-2\theta)} \right] dx, \quad (45)$$

где $x_1 = \sqrt{x^2 + 4\theta^2}$. Асимптотическое при $t \rightarrow 0$ значение интеграла (45) может быть получено по методу Лапласа. При этом следует иметь в виду, что разложение по степеням величины $x_1 - 2\theta$ в экспоненциальных множителях (45) и полиноме (43) соответствует при малых значениях переменной интегрирования x разложению по степеням величины $\frac{x^2}{\theta}$, если $x \ll 2\theta$. Таким образом, множитель перед $\exp\left(-\frac{x^2}{4vt}\right)$ в подынтегральном выражении формулы (45) при малых x представляет собой полином вида $a_0 x + a_1 x^3 + a_2 x^5 + \dots$. Непосредственным подсчётом легко найти, что $a_0 = 0$, а для величины a_1 при $\mu \gg 1$ имеем $a_1 \approx \frac{1}{\theta^2}$. Учёт члена a_1 при x^5 и следующих за ним может не производиться, поскольку для асимптотического разложения они отвечают более высоким степеням t , чем главный член a_1 . Принимая во внимание, что при $\alpha \rightarrow \infty$ справедлива следующая асимптотическая оценка:

$$\int_0^{\infty} x^3 e^{-\alpha x^2} f(x) dx = \frac{1}{2\alpha^2} f(0),$$

находим выражение для $B(t)$ при $vt \leq 1$:

$$B(t) \cong \frac{32\sqrt{\pi}\mu B_0}{\theta^2} (vt)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-vt - \frac{\theta^2}{vt}\right). \quad (46)$$

Эта формула является одним из выражений, определяющих постоянную времени (время релаксации) для процессов, связанных с диффузией магнитного поля в ферромагнетик конечной толщины. При этом данная формула определяет добавку при малых значениях t к временной зависимости (24), относящейся к случаю бесконечно толстой ферромагнитной пластины (анализируемая временная зависимость при больших значениях времени t даётся формулой (30)). Как и следовало ожидать, при $t = 0$ формула (46) даёт нулевое значение для $B(t)$. Это объясняется тем, что в начале вихревые токи сосредоточены в бесконечно тонком слое, и при этом реальная толщина ферромагнитной пластины не влияет на результирующее поле.

Проанализируем полученные результаты. Как видно из выражения (46), при $\mu \gg 1$ поправка к временной зависимости для индукции магнитного поля, учитывающая конечность толщины ферромагнитной пластины, содержит в общем случае две постоянные времени: $\tau_2 = \frac{1}{v}$, $\tau_3 = \frac{\theta^2}{v}$ (при $\theta \ll 1$ можно считать, что имеется лишь одна постоянная времени τ_2). При обычных условиях обе постоянные τ_2 и τ_3 значительно больше, чем величина τ_0 , определяемая соотношением (26). Поскольку поправка (46) предполагается малой, естественно потребовать, чтобы при $t = \tau_0$ выражение (46) было меньше B_0 . Это позволяет получить приближённое условие на величину θ , для которой справедливо приведённое рассмотрение:

$$\frac{32\sqrt{\pi}}{\theta^2 \mu^2} e^{-\theta^2 \mu} \ll 1. \quad (47)$$



При получении оценки (47) соблюдены условия $\mu \gg 1$, $\mu \gg \theta$. Как правило, для реальных систем магнитного удержания условие (47) выполняется заведомо. При этом, в соответствии со сказанным выше, постоянная времени, определяющая эффективное время релаксации при диффузии магнитного поля, равняется величине $\tau_0 = \frac{\mu_0 \sigma}{k^2 \mu}$, отвечающей случаю бесконечно толстой пластины ($\theta \rightarrow \infty$).

Приведённое выше рассмотрение относилось к случаю расчёта поля над ферромагнитной пластиной. Теми же методами может быть произведён расчёт поля внутри пластин. При этом используются коэффициенты отражения и преломления (13) и (14), найденные выше, но расчёт величины $B(t)$ внутри пластины предусматривает иной способ суммирования отражённых от границ полей. Итоговое выражение для поля $B(t)$ содержит интеграл типа (17), но теперь оказывается зависящим от координаты z . Отметим, однако, что при анализе временной зависимости для сил, действующих на удерживаемое тело (в принятой модели это ферромагнитная плита), нет необходимости в расчёте поля внутри плиты, поскольку сила взаимодействия целиком определяется характеристикой внешнего поля.

В заключение обсудим возможное влияние идеализации принятой расчётной модели на результат оценки эффективного времени релаксации. Реальная конструкция системы магнитного подвешивания предполагает расположение n -полюсного кольцеобразного магнитопровода (в исследованиях предполагалось $n = 8$) вокруг цилиндрической ферромагнитной цапфы (см. рис. 1). При этом полюса имеют чередующуюся полярность, и на краю полюсного наконечника магнитное поле в зазоре испытывает резкое изменение. В этих условиях для основной доли полярных чисел k , вносящих вклад в пространственный спектр магнитного поля в зазоре, выполняется соотношение $kR \gg 1$, где R – радиус ферромагнитной цапфы. Последнее неравенство, однако, показывает, что эффектами, связанными с кривизной поверхности цапфы, можно пренебречь, и при оценке времени релаксации считать границу плоской. Приближение плоской границы является тем более оправданным, что благодаря высокому значению магнитной проницаемости μ в соответствии с неравенством (47) даже при конечной и сравнительно небольшой толщине пластины эффективное время релаксации отвечает величине τ_0 , соответствующей бесконечной толщине пластины.

Таким образом, время, связанное с инерциальностью проникновения магнитного поля в ферромагнитное тело, при анализе работы систем подвешивания может быть принято равным $\tau_0 = \frac{\mu_0 \sigma}{k^2 \mu}$. Влияние указанной инерциальности на характеристики устойчивости системы автоматического управления может быть изучено стандартными методами. Можно, однако, предположить, что это влияние будет небольшим вследствие малости величины τ_0 в условиях, отвечающих работе системы магнитного удержания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Повышение точности вращения валов высокоскоростных роторных систем / А. В. Космынин, В. С. Щетинин, С. М. Копытов [и др.] // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2013. – № III-1(15). – С. 47-51.
2. Ким, К. И. Теория электродинамической левитации. Основные результаты и дальнейшие задачи / К. И. Ким, В. М. Кочетков, И. И. Трещев. // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1981. – № 1. – С. 72-91.
3. Градштейн, И. С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И. С. Градштейн, И. М. Рыжиков. – М.: ГИФМЛ, 1963. – 352 с.

Гнидюк А. Ф.
A. F. Gnidyuk

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ТРАНСФОРМАТОРОВ

SIMULATING THE THERMAL OPERATING CONDITIONS OF POWER TRANSFORMERS



Гнидюк А. Ф. – старший руководитель проектов, ООО «АББ» (Россия, Москва); 117997, г. Москва, ул. Обручева, дом 30/1; 8-985-253-98-92. E-mail: alexeygnidyuk@mail.ru.

Mr. Alexey F. Gnidyuk – senior project manager, ООО “ABB” (Russia, Moscow); 30/1 – 2, Obrutcheva Str.; Moscow, 117997; 7 (985) 2539892. E-mail: alexeygnidyuk@mail.ru.

Аннотация. В статье рассматриваются принципы моделирования тепловых режимов работы силового трансформатора. Принцип построения модели силового масляного трансформатора представлен как математическая модель сложной нелинейной термогидравлической системы. С помощью программного пакета Comsol Multiphysics созданы варианты моделей трансформатора как с дефектами, так и без таковых. Трансформатор представлен в виде прямоугольного бака, заполненного трансформаторным маслом и с располагающимися внутри него обмотками и сердечником. Дополнительно вокруг бака создана область, заполненная воздухом. Задание дефектов производилось посредством введения дополнительных источников теплоты в созданную модель. В основу расчетов данного программного пакета лег получивший широкое распространение для расчетов и решения дифференциальных уравнений с частными производными метод конечных элементов.

Моделирование тепловых процессов, протекающих в трансформаторном оборудовании, позволяет установить с высокой долей вероятности наличие и идентификацию неисправностей на начальной стадии развития дефекта, что может позволить уйти от проведения плановых ремонтов, устанавливаемых на основании срока эксплуатации трансформатора, и получить экономию от снижения издержек на эксплуатацию, снизить до минимума переменные расходы от убытков, вызванных потенциальным выходом из строя трансформаторного оборудования.

Summary. The paper reviews the principles of simulation of the operating thermal conditions of a power transformer. The principle of the oil filled power transformer modelling is presented as a mathematical simulation of a complex nonlinear thermal hydraulic system. For the modeling of transformers with or without defects I use the Comsol Multiphysics software package. The transformer is presented as rectangular tank filled with transformer oil having the core and the windings inside. Additionally I designed an area around the tank that is filled with air. Defects are introduced in the model as additional sources of heat. The calculation basis of this software package is the widely adopted finite elements method. The heat process simulation in a transformer allows us to detect and identify emerging defects at early stages. Thus, the method could help reduce the amount of routine maintenance and repair needed for a transformer in accordance with its operational lifetime, and cut operational costs. Also this can minimize the variable costs linked to a potential transformer breakdown.

Ключевые слова: силовой трансформатор, нагрев, срок эксплуатации, идентификация, математическая модель.

Key words: power transformer, heating, operating lifetime, identification, mathematical model.

УДК 621.31: 621.25

Введение

При работе трансформаторов возникают потери электрической энергии, превращающиеся в конечном счете в теплоту. Теплота повышает температуру обмоток трансформаторов, активной стали, контактных соединений, конструктивных деталей и одновременно рас-



сеивается в окружающую среду [1], [2]. Нагревание оборудования ограничивает его мощность и является главной причиной старения изоляции. Моделирование же тепловых процессов и распределения тепловых полей, происходящих в трансформаторе на стадии проектирования, позволяет оптимально разнести конструктивные элементы таким образом, чтобы при эксплуатации распределение температуры по объему трансформатора стремилось к высокой степени однородности. Проведенный анализ научно-технической отечественной и зарубежной литературы показал, что работ, непосредственно посвященных мониторингу и моделированию тепловых полей сложных электротехнических элементов и устройств, имеется небольшое количество. Недостаточно исследованы процессы распределения тепловых потоков внутри и снаружи трансформаторов, а также их моделирование и контроль. Почти не рассмотрены вопросы определения и идентификации внутренних повреждений и их степени как для трансформаторного, так и для иного электротехнического оборудования, выполненного на основании мониторинга тепловых полей, и внесения корректировок в тепловую модель трансформаторного оборудования. Некоторые проведенные ранее исследования создали предпосылки для решения задач по идентификации внутренних нарушений и повреждений трансформаторного оборудования, влияющих на тепловой режим работы оборудования, а также определения температуры дефекта и его месторасположения. Поэтому теоретическое обобщение процессов теплового распределения с учетом динамического движения трансформаторного масла в трансформаторном оборудовании и идентификация на этой основе его повреждений и мониторинг работоспособности является актуальной научной задачей.

Принципы моделирования тепловых режимов работы трансформатора

В настоящее время разработано и аппаратно реализовано множество систем защиты, а также определенное число эффективных систем диагностики и мониторинга состояния высоковольтных силовых трансформаторов. Экономический эффект от использования систем диагностики и мониторинга обусловлен предупреждением аварийного выхода из строя оборудования и переходом от проведения планово-предупредительных ремонтов к проведению ремонтов по состоянию. Так, при номинальной частоте 50 Гц основную часть паспортных потерь составляют потери Джоуля – Ленца (на активном сопротивлении, близком по своему значению к сопротивлению постоянному току), а также потери на гистерезис и токи Фуко в магнитопроводе. Остальные потери являются добавочными и составляют несколько процентов от основных.

Перспективным направлением является создание системы мониторинга для предупреждения различных повреждений трансформаторного оборудования. Очевидно, что при каждом определенном дефекте будет иметь место свое уникальное распределение теплового поля, а значит и свои последствия. Идентификация потенциально возможных дефектов с помощью анализа распределения теплового поля – довольно эффективный способ избежать выхода из строя трансформаторного оборудования.

В большинстве случаев для оценки состояния оборудования создаются математические модели, содержащие в себе большое количество расчетов, требующих большого количества времени как для расчета каждого отдельного узла, так и единицы трансформаторного оборудования. К тому же, при расчете сложных систем нередко ошибки чисто математического характера.

Создание модели можно условно разбить на три стадии. Первая стадия – это сбор данных для моделирования, цель этой стадии собрать максимальное количество релевантной информации, требующейся для создания модели. Вторая стадия – непосредственно само моделирование, оптимизация алгоритмов и отдельных элементов модели. Третья стадия – это оценка модели, сравнение показателей модели с реальными экспериментами, данными об эксплуатации трансформаторного оборудования, что является необходимым для условия принятия модели или решения о ее доработке.

На рис. 1 приведена типовая блок-схема процесса создания модели с указанием движения информации согласно стадиям моделирования, указанным выше.

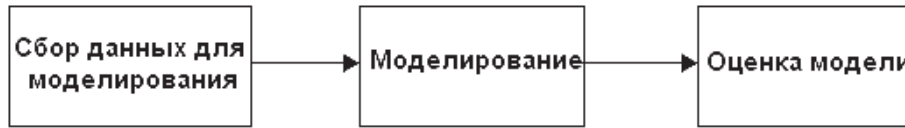


Рис. 1. Блок-схема процесса создания модели

Более перспективным и наглядным является создание интерактивных моделей в различных программных пакетах [3]. Они позволяют создавать модели, близкие к реальным, при этом не требуя глубоких математических знаний.

В данной работе для моделирования был использован программный пакет Comsol Multiphysics [4]. Comsol Multiphysics – это мощная интерактивная среда, служащая для моделирования и расчетов большинства научных и инженерных задач, основанных на дифференциальных уравнениях в частных производных и интегральных уравнениях методом конечных элементов. С этим программным пакетом можно расширять стандартные модели, использующие одно дифференциальное уравнение (прикладной режим), в мультифизические модели для расчета связанных между собой физических явлений. Таким образом, в основе расчетов программного пакета Comsol Multiphysics лежит использование метода конечных элементов [5].

Полную трёхмерную компьютерную модель такой сложной нелинейной термогидравлической системы, как реальный масляный силовой трехфазный трансформатор, можно определить как общую теплогидравлическую макромоделю трансформатора [3]. Она может включать в себя описание как геометрии, так и детальной структуры всех трёх фаз, включающих в себя магнитопровод и рабочие обмотки трансформатора. Задача такой модели состоит в обеспечении получения достоверных основных интегральных характеристик системы тепловыделения, распределения температуры на выделенных поверхностях, а также определения температуры отдельных точек.

Для упрощения процесса моделирования на уровне макромоделю обмотка была представлена эквивалентным сплошным твёрдым телом без отдельного рассмотрения конвекции в межкатушечных горизонтальных каналах и детальной структуры катушек с изоляцией и дистанцирующими прокладками. Задачей макромоделю является описание и общий расчёт теплогидравлических процессов всего трансформатора с обязательным учётом всех (как основных, так и дополнительных) тепловыделений, имеющих место в трансформаторе.

С помощью Comsol Multiphysics были созданы варианты моделей трансформатора как с наличием дефектов, так и без таковых. Упрощенная модель трансформатора представлена в виде прямоугольного бака, заполненного трансформаторным маслом и с располагающимися внутри него обмотками и сердечником. Дополнительно вокруг бака была создана область, заполненная воздухом. Дефекты были заданы как дополнительные источники теплоты.

Проведенные расчеты распределения теплового поля наглядно показали распределение теплового поля по всей поверхности модели, включая температуры на ребрах и границах. Проведены расчеты для моделей с дефектами в одной из обмоток, в сердечнике, одновременно в разных частях трансформатора. В области, где был расположен дефект, температура выше, чем в аналогичной области модели с заданием нормального режима работы (наличие дефектов отсутствует), следовательно, температура на поверхности трансформатора также повышается.

На рис. 2 представлен пример полученной модели силового трехфазного трансформатора без наличия дефектов.

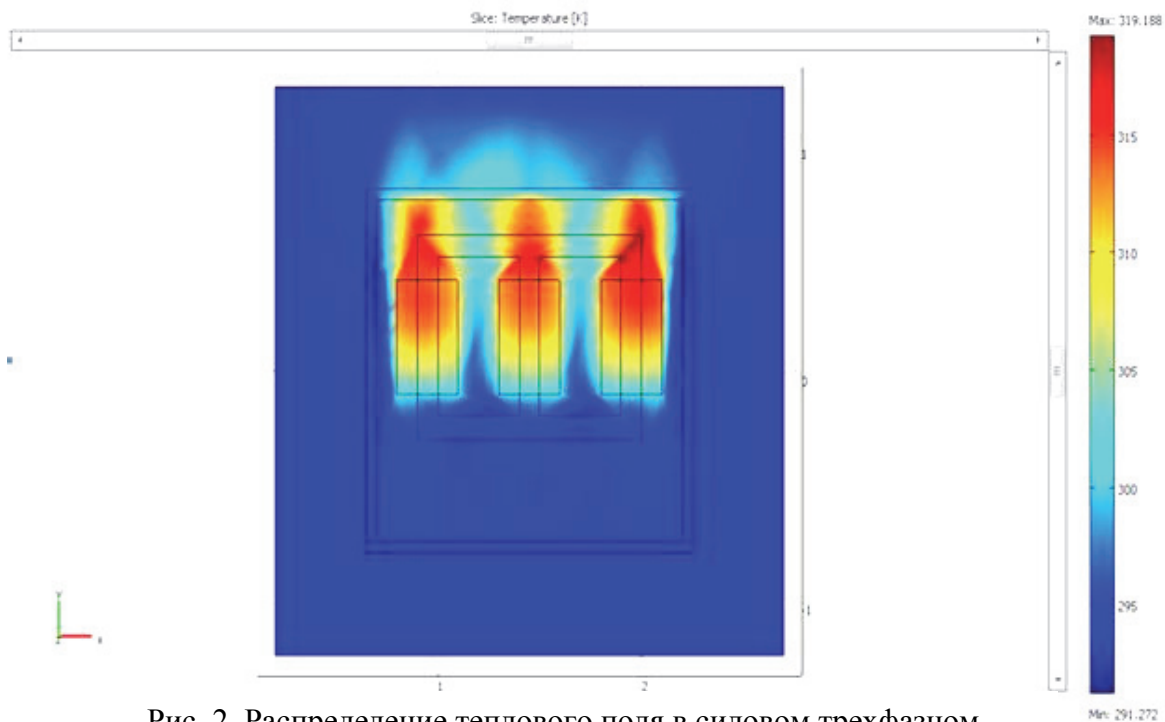


Рис. 2. Распределение теплового поля в силовом трехфазном трансформаторе без дефектов

Таким образом, Comsol Multiphysics позволяет смоделировать и наглядно продемонстрировать распределение температурных полей при заданном режиме работы трансформатора. Создание интерактивной модели может стать очень удобным и перспективным способом диагностики и мониторинга дефектов в различных его частях. Это позволяет прогнозировать и предупреждать развитие различных дефектов и, следовательно, продлевать срок службы оборудования (рис. 3).

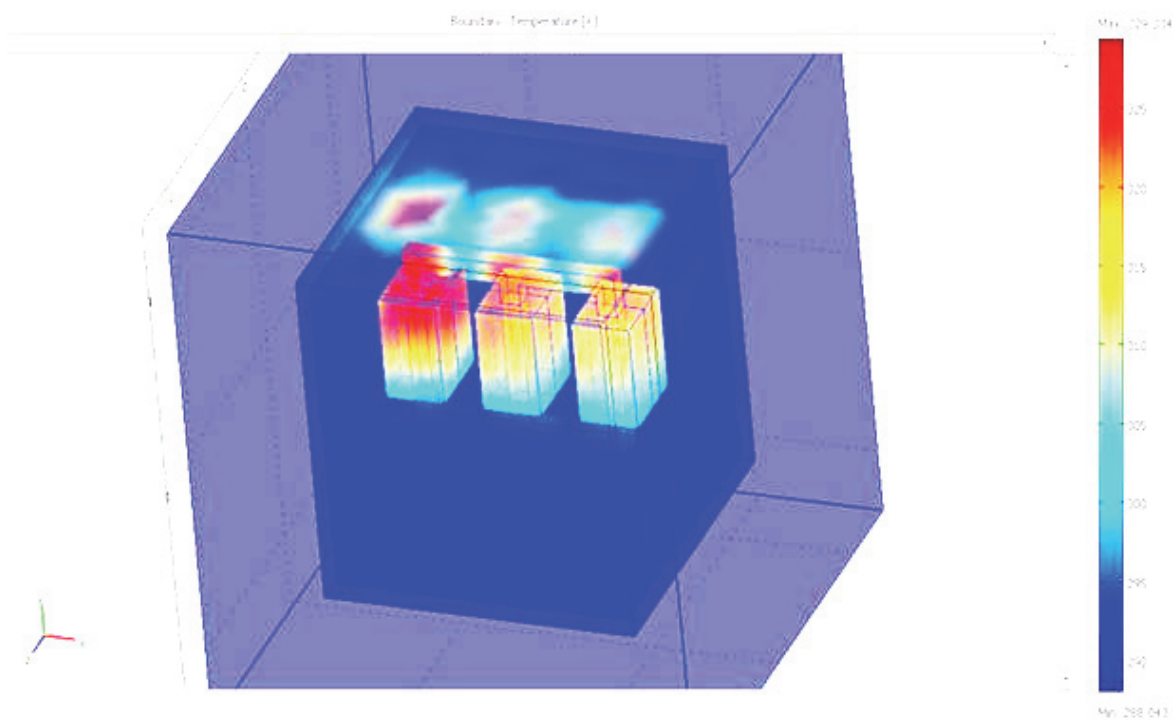


Рис. 3. Распределение теплового поля в силовом трехфазном трансформаторе с дефектом фазы А (левая обмотка)



Выводы

Моделирование тепловых процессов трансформаторного оборудования позволяет предотвратить значительное число неисправностей, связанных с неравномерным распределением тепла в трансформаторе, а также устанавливать с высокой долей вероятности потенциальные неисправности во время эксплуатации трансформаторов, т.е. на начальной стадии развития дефекта. Таким образом, моделирование и мониторинг тепловых процессов позволяет в значительной степени снизить внеплановые ремонты, связанные с перегревом трансформаторов. В свою очередь, результатом будет снижение издержек на эксплуатацию и уменьшение потенциальных убытков от выхода оборудования из строя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Roger W. Pryor Multiphysics modeling using Comsol: a first principles approach. Jones and Bartlett Publishers London W6 7PA United Kingdom, 2011. – 871 с.
2. 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 государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2014. – № I-1(17). – С. 15-21.
3. Дульнев, Г. Н. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена: учеб. пособие для теплофизич. и теплоэнергетич. спец. вузов // Г. Н. Дульнев, В. Г. Парфенов, А. В. Сигалов. – М.: Высш. шк., 1990. – 207 с.
4. Исаченко, В. П. Теплопередача: учеб. для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
5. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд.– М.: Мир, 1979. – 392 с.
6. Ministry of Energy of the Russian Federation. Режим доступа: <http://minenergo.gov.ru/en/>
7. ABB Review The corporate technical journal (November, 2012). Special report transformers, November, 2012. Режим доступа: [http://www05.abb.com/global/scot/scot271.nsf/veritydisplay/c3791bac5b25bd10c1257ab80037553b/\\$file/ABB%20SR%20Transformers-121031.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot271.nsf/veritydisplay/c3791bac5b25bd10c1257ab80037553b/$file/ABB%20SR%20Transformers-121031.pdf).
8. U.S. Energy Information Administration (2014). Режим доступа: <http://www.eia.gov/>.
9. The international monthly magazine Modern Power Systems (2014). Режим доступа: <http://www.modernpowersystems.com/>.
10. Global research and consulting for the energy industry (2014). Режим доступа: <http://energy.globaldata.com/>.

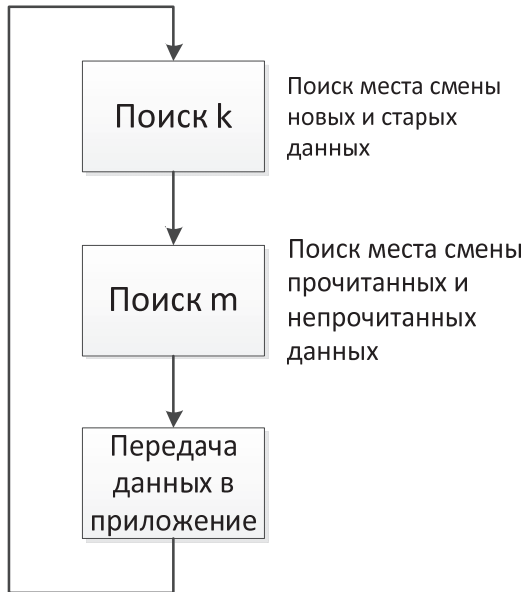


Рис. 4. Универсальный алгоритм обработки данных в циклическом буфере

Практический интерес представляет реализация блоков алгоритма. Для языка C++ эта реализация может выглядеть следующим образом.

Первый шаг:

```

// поиск места смены данных в буфере от новых к старым (граница k)
BYTE N = 256; //число слов в буфере
//цикл опроса временных меток соседних слов буфера
for (BYTE k = 1; k < N; k++)
    if (buf[k].time < buf[k-1].time) break;
  
```

```
if(k == 256) k=0;
```

На первом шаге производится последовательный опрос временных меток пришедших слов. Каждая пара соседних меток сравнивается друг с другом. Как только очередная метка оказывается меньше предыдущей – граница между новыми и старыми данными буфера найдена. Это граница k на рис. 3. Результатом работы блока является переменная k , в которой будет находиться значение искомой границы.

Второй шаг:

```

// поиск места смены уже извлеченных ранее из буфера данных
// и еще не прочитанных (граница m)
BYTE m = k; //начальный индекс границы m принять равный границе k

for (BYTE j = 0; j < N; j++, m++)
    {if (m > 256) m = 0; //смена индекса при переходе кольца буфера
    if (buf[m].time > timeOld) break;}

if(j == 256) return;
  
```

На втором шаге поиск границы m начинается от границы k . Программа движется по кольцу буфера (см. рис. 3), пока время прибытия текущего слова не окажется больше времени последнего слова в ранее прочитанном буфере. Это время находится в глобальной переменной $timeOld$ и сохраняется в конце обработки каждого считывания буфера. Если цикл поиска границы m окончился без принудительного выхода, значит в буфере нет новых данных и дальнейший анализ буфера следует прервать (команда `return`). Иначе – результатом работы блока является переменная m , в которой будет находиться значение искомой границы m .

Третий шаг:

```

//передача новых данных из буфера в прикладную программу
for (BYTE i = 0; i < N - (m-k); i++, m++)
    {if (m > 256) m = 0; //смена индекса при переходе кольца буфера
    PP = buf[m];
    }

timeOld = buf[m-1].time;
  
```

На третьем шаге передача данных из буфера в прикладную программу происходит в цикле по индексу m . Интересны границы счетчика цикла i , которые вычисляются через ранее



Попов Э. И., Репин Ю. М.

E. I. Popov, Yu. M. Repin

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СТЕФАНА ДЛЯ МЕТАЛЛА, ДВИЖУЩЕГОСЯ В ОХЛАЖДАЮЩЕЙ СРЕДЕ

STEFAN TASK SOLUTION FOR METAL MOVING IN A COOLANT MEDIUM

Попов Эрколи́й Ива́нович – кандидат технических наук, ведущий инженер Уральского научно-исследовательского института метрологии (Россия, Екатеринбург). E-mail: popovei@uniim.ru.

Mr. Erkoły I. Popov – PhD in Engineering, Senior Project Engineer, the Urals Research Institute for Metrology (Russia, city of Yekaterinburg). E-mail: popovei@uniim.ru

Репин Ю́рий Миха́йлович – кандидат физико-математических наук, доцент Уральского федерального университета (Россия, Екатеринбург). E-mail: yuri.repin@usu.ru.

Mr. Yuri M. Repin – PhD in Engineering, Assistant Professor, the Urals Research Institute for Metrology (Russia, city of Yekaterinburg). E-mail: yuri.repin@usu.ru.

Аннотация. Составляются уравнения и формулируются граничные условия для частного случая затвердевания жидкого металла в установившемся режиме непрерывного литья. Задача имеет осевую симметрию и решается в цилиндрических координатах.

Summary. To solve the task, we formulate equations and lay down boundary conditions for a particular case of liquid metal solidification at steady mode continuous casting. The problem has axial symmetry and is solved in cylindrical coordinates.

Ключевые слова: задача Стефана, затвердевание жидкого металла, непрерывное литьё, двухфазная зона.

Key words: Stefan problem, solidification of liquid metal, continuous casting, two-phase zone.

УДК 539.3; 621.74

Введение

Потребность в моделировании процесса затвердевания появилась из-за проблем, возникающих при непрерывном горизонтальном литье медных заготовок: как прутковых, так и трубных. Без осмысления физической стороны технологии такого литья трудно предсказать механические свойства отливки, объяснить происхождение дефектов, оценить влияние скорости литья, длины кристаллизатора, интенсивности первичного и вторичного охлаждения отливаемой заготовки. Уравнения теплопроводности для условий непрерывного литья присутствуют во многих публикациях для конкретных случаев [1; 2; 7], но их решение – температурные поля при различных краевых условиях – не приводятся и не анализируются.

Получается, что те или иные особенности технологии непрерывного литья не вытекают непосредственно из анализа решений этих уравнений. Поэтому мы считаем, что прежде, чем начать математическое моделирование процесса непрерывного литья для определения конструктивных особенностей разрабатываемой установки, новой технологии, учёта качества исходного сырья, полезно рассмотреть и проанализировать решение идеализированной задачи фазового перехода в металле, движущемся в охлаждающей среде.

Физическая модель

Остановимся на модельных представлениях объекта и процесса. Примем некоторые упрощения и допущения в физической модели и в описании процессов в затвердевающем металле.

1. Считаем, что для решения тепловой задачи достаточно учитывать температурную зависимость коэффициента теплопроводности $\lambda = \lambda(T)$ и удельной теплоёмкости $c = c(T)$. Не будем учитывать температурную зависимость плотности ρ ввиду слабого влияния на её величину температуры и, как следствие, малозаметное отражение этого на тепловых процессах в металле (см. рис. 1).

2. Скорости движения твёрдой и жидкой фаз металла по этой причине одинаковы. На самом деле расхождение в скоростях есть, и определяется оно разностью плотностей, поэтому скорость движения затвердевшего металла меньше скорости движения жидкого металла. При решении тепловой задачи мы эту разницу не учитываем. Поэтому остаётся неизменным и сечение движущегося металла при фазовом превращении.

3. Не учитываем в движущейся жидкой фазе конвективные явления. При моделировании горизонтального литья это приводит к осевой симметрии системы, исключает зависимость температуры от угла при записи уравнения теплопроводности в цилиндрических координатах. В частности лунка жидкого металла всегда осесимметрична, хотя в случае горизонтального литья это не так. К этому же приводит неучёт температурной зависимости плотности.

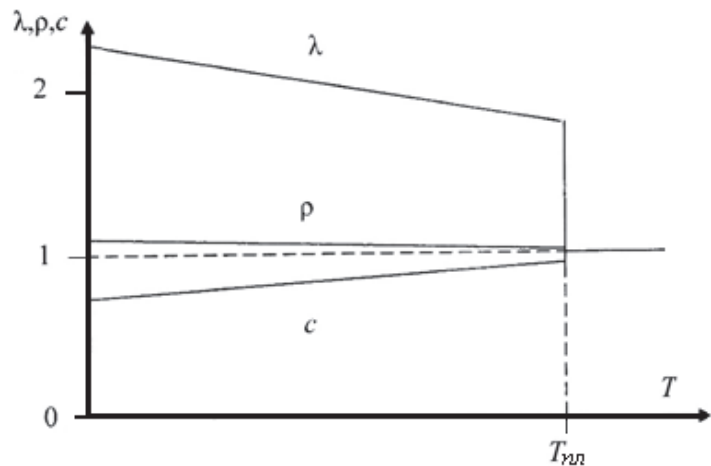


Рис. 1. Схематическое представление температурных зависимостей: коэффициента теплопроводности λ , удельной теплоемкости c и плотности ρ для меди. Для наглядности значения этих величин у жидкой меди приняты за единицу

4. Вводим искусственный температурный интервал в окрестностях температуры плавления: $T_{nl} \pm \Delta T$, появляется искусственная двухфазная зона с температурой ликвидуса $T_l = T_{nl} + \Delta T$ и температурой солидуса $T_s = T_{nl} - \Delta T$ шириной $2\Delta T$. Таким образом, от классической постановки задачи Стефана, когда формулируются граничные условия на границе двух фаз, уходим. Правда, этот температурный интервал предполагаем узким. Описание такого «размазывания» границы фазового перехода приведено в книге [3]. В таком подходе нас оправдывает ещё и то, что этот узкий интервал одновременного и одноместного присутствия двух фаз всегда есть на практике из-за наличия примесей в металле. Допущение существования двухфазной зоны на шкале температур даёт возможность распространить эту методику нахождения границы фаз и на сплавы.

5. Упрощённо можно представить, что температурная зависимость коэффициента теплопроводности твёрдого металла носит линейный характер, а для жидкого металла есть величина постоянная для температур, не сильно превышающих температуру плавления. При температуре плавления имеет место скачок теплопроводности. В нашем представлении о наличии двухфазной зоны этот скачок величины коэффициента теплопроводности заменяется линейной зависимостью этого коэффициента от температуры в интервале от T_l до T_s

$$\lambda(T) = \lambda(T_s) - \frac{\lambda(T_s) - \lambda(T_l)}{T_l - T_s} (T - T_s),$$

изображенной на рис. 2, а.

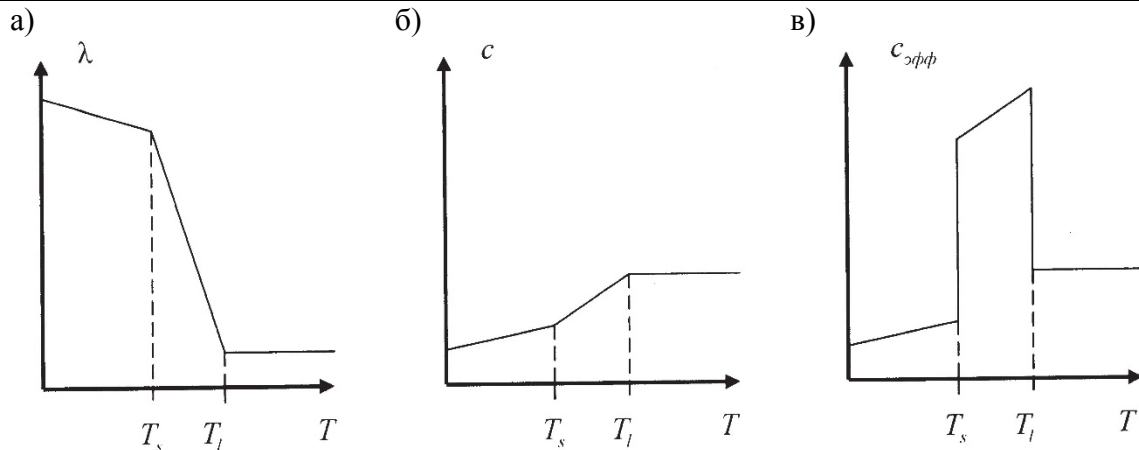


Рис. 2. Схемы температурных зависимостей в двухфазной зоне:

а – коэффициента теплопроводности $\lambda(T)$; б – удельной теплоемкости $c(T)$;
в – эффективной теплоемкости $c_{эфф}(T)$

6. Аналогично вместо скачка удельной теплоёмкости при температуре плавления используем температурную зависимость $c(T)$ в двухфазной зоне

$$c(T) = c(T_s) + \frac{c(T_l) - c(T_s)}{T_l - T_s} (T - T_s).$$

Эта зависимость изображена на рис. 2, б.

7. Допустив существование двухфазной зоны между изотермическими поверхностями ликвидуса и солидуса, мы должны определиться с закономерностью выделения теплоты фазового перехода – этого скрытого источника тепла, существующего в интервале температур ликвидус-солидус. На эту тему в литературе существуют различные точки зрения [2; 5]. В упрощённом виде избранная квазиравновесная модель затвердевания такова, что выделение скрытой теплоты плавления носит постоянный (на градус) характер и определяется закономерностью перехода жидкой фазы в твёрдую [1]:

$$-\frac{d\Psi}{dT} = \frac{1}{T_l - T_s}.$$

Здесь Ψ – отношение объема твердой фазы к общему объему двухфазной области. В этом случае можно отождествить источник тепла с некой удельной теплоемкостью c^* .

$$c^* = \frac{L}{T_l - T_s}, \quad T_s \leq T \leq T_l,$$

где L – удельная теплота фазового перехода. Вне указанного температурного интервала $c^* = 0$. Таким образом, можно записать эффективную теплоемкость металла как функцию температуры:

$$c_{эфф}(T) = \begin{cases} c(T) = const & \text{при } T > T_l; \\ c(T) + \frac{L}{T_l - T_s} & \text{при } T_s \leq T \leq T_l; \\ c(T) & \text{при } T < T_s, \end{cases}$$

то есть $c_{эфф}(T) = c(T) + c^*$. Зависимость $c_{эфф}(T)$ в двухфазной зоне изображена на рис. 2, в.

Нужно заметить, что можно использовать и другие закономерности выделения тепла фазового перехода в двухфазной зоне. В нашем случае это только способ нахождения изотермической поверхности, образующей лунку жидкого металла.

8. Влияние внешней среды будем учитывать коэффициентом теплоотдачи. Коэффициент теплоотдачи в общем случае может являться функцией координаты, вдоль которой происходит движение металла.

Математическая модель

Математическая модель – это описание тепловых процессов в предложенной физической модели с помощью дифференциальных уравнений теплообмена: уравнений теплопроводности, движения, сплошности, теплоотдачи и условий однозначности (в терминологии авторов [3]).

Допущения, сделанные нами в физической модели, позволили обойтись в её математическом описании без уравнений движения, сплошности и теплоотдачи, то есть решать уравнение теплопроводности с условиями однозначности (краевыми условиями).

Составить уравнение теплопроводности для нашего случая не представляет особых трудностей, в литературе имеются похожие описания [2; 7]. Уравнение теплопроводности для движущегося с постоянной скоростью металла цилиндрической формы, в котором происходят фазовые превращения из-за охлаждающего воздействия окружающей среды, записывается следующим образом:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda(T) r \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] - v \rho c_{эфф}(T) \frac{\partial T}{\partial x} = 0.$$

Здесь r и x – координаты в цилиндрической системе координат; v – скорость движения металла относительно окружающей среды.

Краевые условия: r изменяется в пределах от 0 до R , где R – это радиус цилиндра, x изменяется в пределах от 0 до такой величины, когда изменением температуры затвердевшего металла можно пренебречь.

В начале координат, при $x = 0$, температура жидкого металла постоянна, то есть $T(0, r) = T_{пл}$. При $r = R$ на поверхности цилиндра имеет место равенство

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} = [T(x, R) - T_{нар}(x)] \alpha(x).$$

Здесь $T(x, R)$ – температура на поверхности металла; $T_{нар}(x)$ – температура окружающей среды; $\alpha(x)$ – коэффициент теплоотдачи от металла к окружающей среде.

Для решения этой стационарной краевой задачи можно применить метод установления, сведя стационарную задачу к нестационарной, фиктивной. Для этого левую часть уравнения приравняем к производной от искомой функции по времени – по фиктивному времени τ .

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda(T) r \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] - v \rho c_{эфф}(T) \frac{\partial T}{\partial x}.$$

Эта фиктивная нестационарная задача используется только для построения разностной схемы одного из методов последовательного приближения, так называемого метода последовательной верхней релаксации [4].

Для выполнения расчётов в приведённом дифференциальном уравнении и краевых условиях производные приближённо заменяются разностными отношениями. Сетка узловых точек на плоскости (x, r) квадратная с шагом $\Delta x = \Delta r = h$.

Пусть $\Delta \tau$ – шаг по времени (фиктивному), тогда в левой части уравнения

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} \approx \frac{T_{i,j}^{k+1} - T_{i,j}^k}{\Delta \tau}.$$

Здесь k – номер очередной итерации; i – индекс вдоль координаты r ; j – индекс вдоль оси x .

Далее. Первое слагаемое правой части

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda(T)r \frac{\partial T}{\partial r} \right] \approx \frac{1}{r_i h} \left[\frac{\lambda_{i+1,j} r_{i+1} + \lambda_{i,j} r_i}{2} \times \frac{T_{i+1,j} - T_{i,j}}{h} - \frac{\lambda_{i,j} r_i + \lambda_{i-1,j} r_{i-1}}{2} \times \frac{T_{i,j} - T_{i-1,j}}{h} \right] =$$

$$= \frac{1}{2h^2 r_i} \left[(\lambda_{i+1,j} r_{i+1} + \lambda_{i,j} r_i)(T_{i+1,j} - T_{i,j}) - (\lambda_{i,j} r_i + \lambda_{i-1,j} r_{i-1})(T_{i,j} - T_{i-1,j}) \right].$$

Аналогично - для второго слагаемого

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] \approx \frac{1}{2h^2} \left[(\lambda_{i,j+1} + \lambda_{i,j})(T_{i,j+1} - T_{i,j}) - (\lambda_{i,j} + \lambda_{i,j-1})(T_{i,j} - T_{i,j-1}) \right].$$

Суммируя две последние формулы, получим

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda(T)r \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] \approx \frac{1}{2h^2} Q,$$

где

$$Q = \frac{1}{r_i} \left[(\lambda_{i+1,j} r_{i+1} + \lambda_{i,j} r_i)(T_{i+1,j} - T_{i,j}) - (\lambda_{i,j} r_i + \lambda_{i-1,j} r_{i-1})(T_{i,j} - T_{i-1,j}) \right] +$$

$$+ \left[(\lambda_{i,j+1} + \lambda_{i,j})(T_{i,j+1} - T_{i,j}) - (\lambda_{i,j} + \lambda_{i,j-1})(T_{i,j} - T_{i,j-1}) \right].$$

Эффективная теплоёмкость – функция температуры, следовательно, третье слагаемое

$$\nu \rho c_{\text{эфф}}(T) \frac{\partial T}{\partial x} \approx \nu \rho c_{\text{эфф},j} \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j-1}}{2h}.$$

В конечном итоге получаем формулу для итераций

$$T_{i,j}^{k+1} = T_{i,j}^k + \frac{\Delta \tau}{2h^2} [Q^k - h \nu \rho c_{\text{эфф},k}^k (T_{i,j+1}^k - T_{i,j-1}^k)].$$

Ход итерационного процесса определяется величиной $\frac{\Delta \tau}{h^2}$. Если она очень мала, то

процесс будет сходиться весьма медленно, но если она слишком велика, процесс будет расходиться. На основе некоторых предварительных теоретических рассмотрений и пробных решений величина $\frac{\Delta \tau}{h^2}$ была принята равной $\frac{0,3}{\lambda_c}$, где λ_c – константа, примерно равная среднему значению коэффициента теплопроводности металла в температурном диапазоне от жидкого состояния до твёрдого при температуре 0 °С.

Упомянутые предварительные теоретические рассмотрения опираются на эвристический принцип замороженных коэффициентов с учётом условия Куранта-Фридрихса-Леви. Кроме того, используются некоторые необходимые условия устойчивости предложенной схемы. Обоснованием правильности выбора как физической модели, так и вычислительной схемы является удовлетворительное соответствие результатов расчёта с практикой.

Для применения приведённой выше итерационной формулы следует определить порядок перебора узлов. Примем, что индекс j изменяется от меньших значений к большим, это соответствует переходу от меньших значений координаты x к большим, и при фиксированном значении j перебираем значения i от больших значений к меньшим (от больших значений r к меньшим), от поверхности внутрь. Отметим, что итерации выполняются по зейделевскому типу, таким образом, только что подсчитанные значения $T_{i,j}^{k+1}$ немедленно используются (вместе с ещё не пересчитанными значениями) для вычисления T^k в порядке перебора узлов, указанном выше.

Решение одного варианта на персональном компьютере может занимать несколько часов. Непосредственной целью решения является нахождение температуры металла в любой его точке. По ним строятся кривые зависимостей температуры на оси и поверхности



металла, изотермы, изображающие, в частности, границу между жидким и твёрдым металлом (лунку).

Решение задачи Стефана

Теплофизические характеристики меди и их температурные зависимости взяты из справочников и схематически изображены на рис. 1.

Температуру жидкой меди при $x = 0$ принимаем близкой к температуре плавления меди, $T_0 = 1100$ °С. Температура окружающей среды $T_{нар} = 0$ °С.

Рассматривались варианты с величиной диаметра $D = 2R = 0,01; 0,02$ и $0,035$ м, с коэффициентом теплоотдачи $1000; 3000$ и $5000 \frac{Вт}{м^2 К}$, диапазоном скоростей от 0 до 4 м/мин.

Некоторое расстояние от начала координат движение меди происходит в условиях полной тепловой изоляции от окружающей среды, температура по сечению меди остаётся близкой к её начальному значению. Протяжённость такого участка с нулевым значением коэффициента теплоотдачи конечна, и при $x \geq x_1 = 0,04$ м коэффициент теплоотдачи принимает значение $\alpha_1 = \text{const} > 0$.

По мере приближения к координате $x = x_1$ охлаждающее действие уже остывшей меди усиливается, плоские температурные фронты в жидкой меди начинают искривляться. При малых скоростях движения осевая теплопроводность может привести к началу и даже завершению процесса фазового перехода до подхода к $x = x_1$.

Нас интересует процесс фазового перехода, который начинается и заканчивается при наличии радиального теплоотвода, характеризующегося коэффициентом теплоотдачи $\alpha = \text{const}$. Величины $x_1 = 0,04$ м и $T_0 = 1100$ °С позволяют изучать этот процесс для выбранного нами диапазона скоростей, диаметров и коэффициентов теплоотдачи, ставя все возможные варианты их сочетаний примерно в равные условия начала фазового перехода вблизи координаты $x = x_1$.

Результаты расчётов представлялись в виде зависимостей температуры на поверхности и оси цилиндра по мере продвижения металла вдоль координаты x . На рис. 3 приведён ход такой температурной кривой для $R = 0,01$ м, $v = 1$ м/мин и $\alpha = 3000 \frac{Вт}{м^2 К}$.

Снижение температуры жидкой меди за счёт осевой теплопроводности начинается при $x < 0,04$ м. Поверхностное охлаждение снижает температуру жидкого металла достаточно медленно из-за выделения скрытой теплоты затвердевания. На оси это замедление более ярко выражено, чем на поверхности. Именно такой характерный для всех случаев вид температурных кривых на участке затвердевания обусловлен выделением скрытой теплоты фазового перехода, компенсирующей отвод тепла в окружающую среду.

После завершения процесса затвердевания снижение температуры ускоряется, следуя экспоненциальному закону, температурные кривые для поверхности и оси сближаются, практически сливаясь при больших x .

Для этого конкретного случая температура 1084 °С на поверхности цилиндра наступает при $x = 0,0416$ м. Это начало затвердевания. Окончание затвердевания меди на оси цилиндра происходит при координате $x = 0,0988$ м, соответственно глубина лунки жидкого металла $H = 0,0572$ м, а время прохождения лунки (длительность процесса выделения скрытой теплоты или длительность фазового перехода) $t = 3,43$ с.

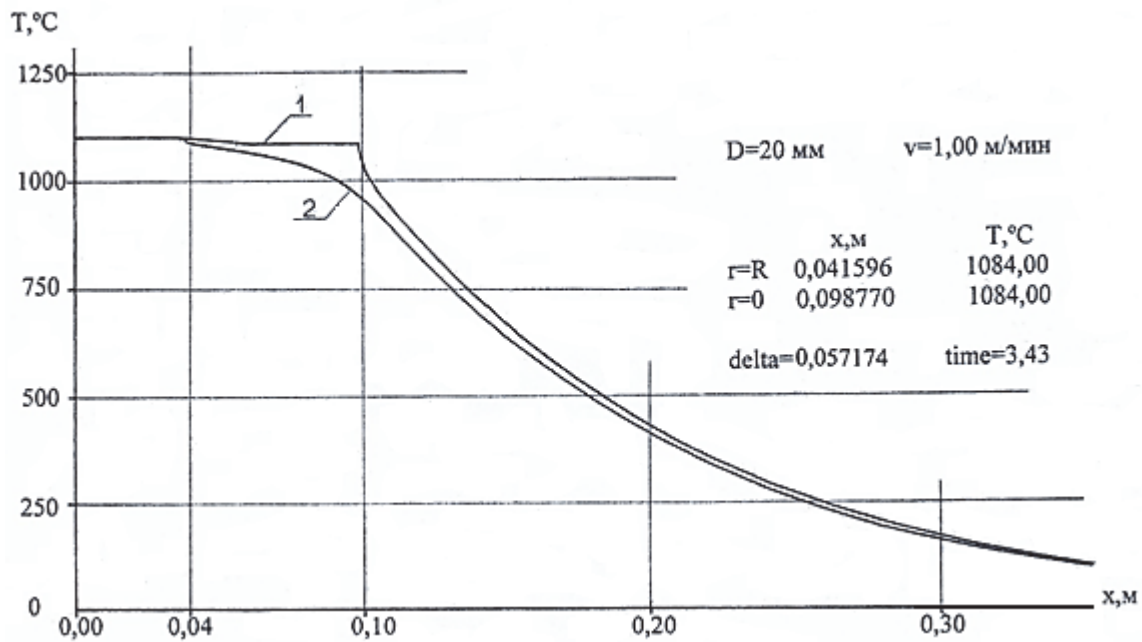


Рис. 3. Температура на оси (1) и поверхности (2) медного цилиндра для $R = 0,01$ м, $v = 1$ м/мин, $\alpha = 3000$ Вт/(м²·К)

Получены изображения изотермических поверхностей в продольном сечении цилиндра, в частности, для температуры фазового перехода. Семейство таких изотерм (профилей лунок) для различных скоростей движения приведено на рис. 4. Масштабы по осям одинаковы.

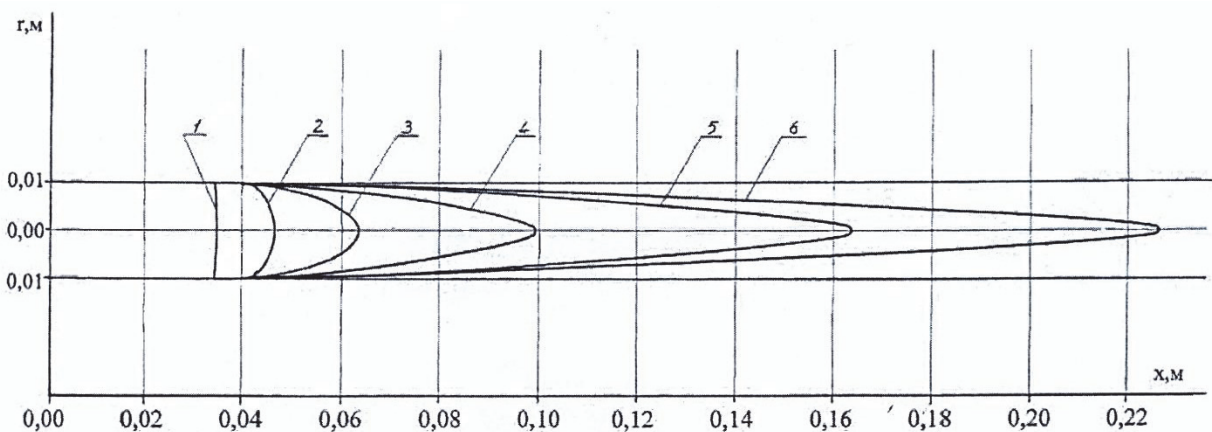


Рис. 4. Семейство изотерм 1084 °С для $R = 0,01$ м, $\alpha = 3000$ Вт/(м²·К) и скоростей движения v , м/мин: 1 – 0,2; 2 – 0,3; 3 – 0,5; 4 – 1,0; 5 – 2,0; 6 – 3,0

При низких скоростях движения процесс затвердевания происходит в условиях $\alpha = 0$. С увеличением скорости лунка жидкого металла целиком выходит в зону радиального отвода тепла с $\alpha = \alpha_1$, вытягивается, глубина её растёт, форма становится конусообразной.

Будем описывать процесс затвердевания через параметры: глубина лунки H и время t от начала затвердевания на поверхности до окончания затвердевания металла на оси. Отметим очень важную особенность – все точки зависимости глубины лунки от скорости движения (в области $\alpha = \alpha_1$) ложатся на прямую линию

$$H = kv - H_0,$$

где k – тангенс угла наклона этой прямой к оси абсцисс, на которой отложены значения скоростей, поэтому k имеет размерность времени; H_0 – отрезок на оси ординат, получающийся при продолжении полученной прямой до $v = 0$ (см. рис. 5).

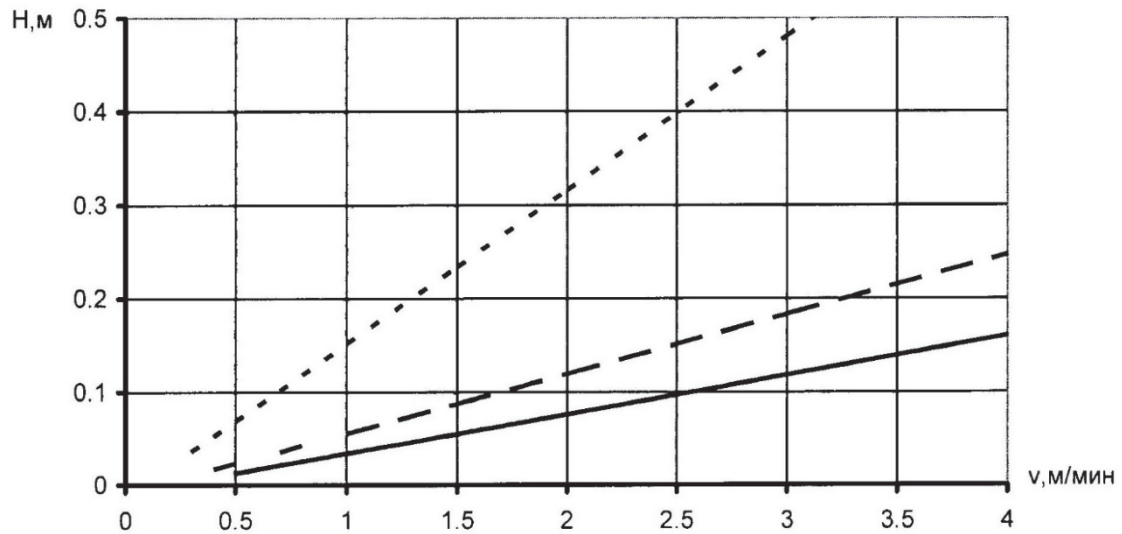


Рис.5. Зависимость глубины лунки H от скорости движения металла v для $R=0.01$ м и различных коэффициентов теплоотдачи $\alpha, \frac{Вт}{м^2 К}$:
 (---) – 1000; (- -) – 3000; (—) – 5000

Зависимость длительности фазового перехода от скорости движения имеет вид кривой, сначала быстро растущей, затем замедляющей свой рост, асимптотически приближающейся к некоторому пределу. Этим пределом является коэффициент $k, k = t_{max}$. Это означает, что при больших скоростях величины H и v связаны соотношением $H = kv$, а длительность процесса затвердевания становится постоянной величиной (см. рис. 6).

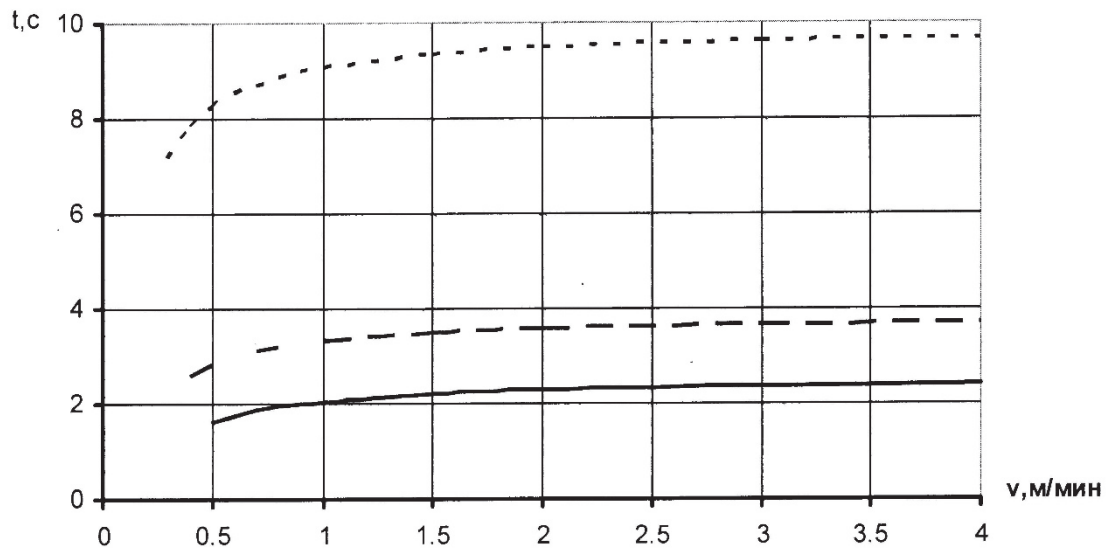


Рис.6. Длительность фазового перехода t как функция скорости движения металла v для $R=0.01$ м и различных значений коэффициентов теплоотдачи $\alpha, \frac{Вт}{м^2 К}$: (---) – 1000; (- -) – 3000; (—) – 5000

Такие пары зависимостей: $H = H(v)$ и $t = t(v)$ приведены на рис. 5 и 6 для некоторых вариантов исходных данных задачи. Величины k для всех вариантов сведены в табл. 1.

Таблица 1

Величина коэффициента $k = t_{\max}$, с, для различных вариантов исходных данных

$\alpha, \frac{Bm}{m^2K}$	$R, \text{ м}$		
	0,005	0,010	0,0175
1000	4,36	9,88	18,66
3000	1,80	3,83	7,78
5000	1,15	2,52	5,25

Величина k – очень важная характеристика описываемого процесса, она не только является собой предел длительности фазового перехода, служит оценкой интенсивности образования лунки, но и является основным показателем такой практически важной характеристики процесса затвердевания, как скорость.

Рассмотрим вопрос о скорости затвердевания жидкого металла в описываемых условиях. Объём затвердевшего металла в единицу времени равен произведению скорости движения на площадь поперечного сечения цилиндра, πR^2 . При малых скоростях движения, малых радиусах цилиндра и больших величинах α , когда лунка имеет незначительную глубину ($H \ll R$) скорость затвердевания V_3 практически совпадает со скоростью движения, $V_3 = v$. Увеличение скорости движения приводит к росту глубины лунки и её поверхности, на которой совершается процесс фазового перехода. На большей поверхности лунки скорость перехода меди из жидкого состояния в твёрдое замедляется. Для среднего значения V_3 справедливо выражение

$$\pi R^2 v = S_n V_{3, \text{cp}},$$

где S_n – площадь поверхности лунки; $V_{3, \text{cp}}$ – среднее по её поверхности значение скорости затвердевания (средняя скорость роста корочки твёрдого металла).

Если представлять лунку в виде конуса, то площадь его боковой поверхности

$$S_n = \pi R \sqrt{R^2 + H^2},$$

а средняя скорость затвердевания

$$V_{3, \text{cp}} = \frac{Rv}{\sqrt{R^2 + H^2}}.$$

Рассчитанные значения средней скорости затвердевания для некоторых вариантов исходных данных задачи как функции скорости движения представлены на рис. 7.

Отметим особенности такой зависимости. При малых скоростях, как уже отмечалось, имеет место совпадение скорости движения и скорости затвердевания, затем следует замедление роста скорости затвердевания, и при дальнейшем увеличении v кривые проходят через максимум, а при $v \rightarrow \infty$ асимптотически приближаются к некоторому значению, ниже которого не опускаются. Для больших скоростей движения $H \gg R$, лунка становится по форме очень близкой к конусу, а скорость затвердевания перестаёт зависеть от v .

$$V_3 = \frac{vR}{H} = \frac{R}{k}, \text{ м/с.}$$

Предельные значения скорости затвердевания для всех вариантов исходных данных при $v \rightarrow \infty$ приведены в табл. 2.

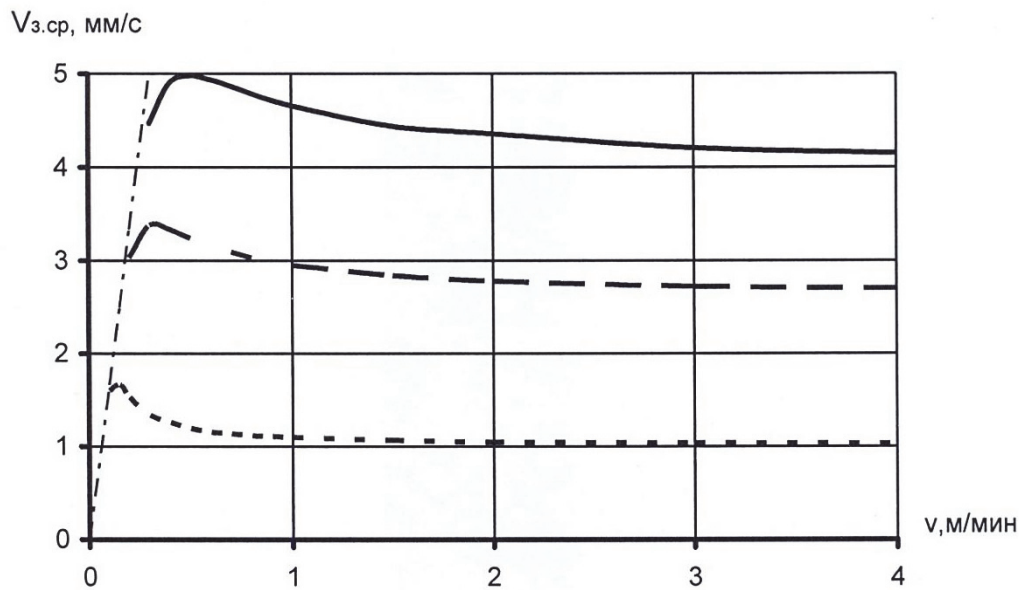


Рис.7. Зависимость средней скорости затвердевания металла $V_{z,sp}$ от скорости движения v для $R=0,01$ м и различных коэффициентов теплоотдачи $\alpha, \frac{Вт}{м^2К}$:
 (---) – 1000; (— —) – 3000; (—) – 5000; (— · —) – $V_{z,sp} = v$

Таблица 2

Предельные значения скорости затвердевания V_z , мм/с, при $v \rightarrow \infty$ для различных вариантов исходных данных

$\alpha, \frac{Вт}{м^2К}$	$R, м$		
	0,005	0,010	0,0175
1000	1,15	1,01	0,94
3000	2,78	2,61	2,25
5000	4,34	3,97	3,33

Данные этой таблицы получаются простым делением величины радиуса на величину k в соответствующей ячейке табл. 1.

Для каждой точки поверхности лунки (см. рис.4) скорость затвердевания равна проекции скорости движения на нормаль к поверхности, поэтому $V_z = v \cdot \sin \beta$, где β – угол между направлением движения и касательной к поверхности. Для $r = R$ этот угол минимален, и вместе с ним минимальна величина скорости затвердевания. Для $r = 0$ угол $\beta = 90^\circ$, и скорость затвердевания равна скорости движения металла.

При малых скоростях движения, когда $H \ll R$, фронт затвердевания плоский, и для всех его точек $V_z = v$.

При больших скоростях, когда $H \gg R$, лунка превращается в конус, у которого β – это половина угла при его вершине. Для всех значений r скорость затвердевания неизменна и равна R/k , кроме вершины конуса, эта особая точка затвердевает со скоростью движения металла.

В заключение отметим, что «размазывание» границы фазового перехода вместо задания граничных условий себя полностью оправдало. Очевидное удобство такого подхода и его перспективность не сопровождаются сколько-нибудь существенной потерей точности



расчётов при определении изотермической поверхности 1084 °С, чего следовало ожидать в связи с уменьшением ΔT . Уменьшение ΔT с 8 °С до 2 °С приводит к увеличению глубины лунки и длительности фазового перехода всего на 0,3 % для варианта с $v = 1$ м/мин, изображённом на рис. 4.

Выводы

1. Обнаруженные закономерности затвердевания металла, движущегося в охлаждающей среде, вместо временных зависимостей для описания нестационарного процесса («закон квадратного корня») потребовали использования зависимостей от скорости движения металла таких величин, как глубина образующейся лунки, длительность фазового перехода, скорость затвердевания («роста корочки твёрдой фазы»), характеризующих стационарный процесс.

2. Глубина лунки растёт линейно со скоростью движения металла. При больших скоростях движения лунка вырождается в конус.

3. Длительность фазового перехода незначительно увеличивается вместе со скоростью движения металла и при больших скоростях становится величиной постоянной.

4. Скорость затвердевания металла имеет максимум при некоторой величине скорости движения, в дальнейшем, снижаясь, перестаёт зависеть от неё, также становясь величиной постоянной.

5. Вид этих зависимостей позволяет объяснить многие странные, на первый взгляд, эффекты из практики непрерывного литья: качество отливки непонятным образом зависит от скорости литья и длины кристаллизатора, прочность бездефектной литой заготовки имеет максимум в области достаточно низких скоростей литья и другие. Но это уже не тема данной статьи.

6. Моделирование работы конструируемой установки непрерывного литья можно производить, решая приведённую в статье задачу, меняя лишь её граничные условия: температуру расплава и окружающей среды, используя коэффициент теплопередачи вместо коэффициента теплоотдачи, сделав его функцией координаты, и т. п.

ЛИТЕРАТУРА

1. Буланов, Л. В. Машины непрерывного литья заготовок / Л. В. Буланов, Л. Г. Корзунин [и др.]. – Екатеринбург: Уральский центр ПР и рекламы – «Марат», 2003. – С. 13-24.
2. Кац, А. М. Теплофизические основы непрерывного литья слитков цветных металлов и сплавов / А. М. Кац, Е. Г. Шадек – М.: Металлургия. 1983 – С. 17-23.
3. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
4. Самарский, А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский – М.: Наука, 1977. – С. 550-632.
5. Севастьянов, Г. М. Об одном способе расчёта границы фронта кристаллизации в расплаве стали / Г. М. Севастьянов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № II-1(6). – С. 76-80.
6. Тихонов, А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – М.: Наука. 1977. – С. 259-264.
7. Цаплин, А. И. Теплофизика в металлургии / А. И. Цаплин. – Пермь: Изд-во Пермского гос. техн. ун-та, 2008. – 230 с.

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

ТОКАРНАЯ ОБРАБОТКА ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЗАГОТОВКУ

LATHE MACHINING OF POLYMERIC MATERIALS BASED ON THE ELECTROPHYSICAL IMPACT UPON BLANKS



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. Oleg U. Yerenkov – Dr.habil. of Engineering, Professor, Department of Mechanical Engineering, 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, 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, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ek74@list.ru.

Аннотация. Рассмотрены особенности высокопроизводительной токарной обработки полимерных материалов, заключающиеся в изменении свойств обрабатываемого материала посредством электрофизического воздействия на его структуру с целью снижения энергосиловых параметров токарной обработки. Исследовалась прочность полимерного материала в зависимости от параметров обработки образцов наносекундными электромагнитными импульсами. На основе результатов эксперимента разработана концепция высокопроизводительной токарной обработки полимерных материалов, базирующаяся на аддитивном эффекте, возникающем при комбинировании обычной токарной обработки с электрофизическим воздействием на заготовку в виде облучения ее наносекундными электромагнитными импульсами.

Summary. The paper considers the high-performance turning machining of polymeric materials which aims at changing the properties of processed materials by means of electrophysical impact upon their structure for the purpose of decreasing the energy and power parameters of turning. We study the durability of polymeric materials depending on the parameters of processing the samples with nanosecond-long electromagnetic pulses. Relying on the results of the experiment, we propose a technique for high-performance turning of polymeric materials which is based on the additive effects arising from the combination of conventional lathe turning and electrophysical impact upon a blank through bombarding it by nanosecond-long EMPs.

Ключевые слова: полимерные материалы, высокоскоростная токарная обработка, наносекундный электромагнитный импульс.

Key words: polymeric materials, high-speed turning, nanosecond electromagnetic pulse.

УДК 621.921.8 (043)



Наличие у полимерных материалов специфичных свойств обуславливает резкое отличие процессов их резания от процессов резания металлов [1], в связи с чем реализация высокоскоростной и, следовательно, высокопроизводительной токарной обработки полимерных материалов представляет на сегодняшний день нерешенную научно-практическую проблему.

На практике производительность токарной обработки полимерных материалов лимитируется стойкостью режущего инструмента и качеством обработанной поверхности. При этом режимы обработки и параметры режущей части инструмента назначаются без учета состояния структуры полимерного материала, что и является причиной ограниченной производительности процесса на основе обычных методов обработки.

Таким образом, задача повышения производительности токарной обработки заготовок из полимерных материалов является актуальной для современного машиностроения, так как ее решение позволит улучшить технико-экономические показатели выпускаемой продукции.

Одним из путей решения данной задачи является разработка и реализация новой концепции высокопроизводительной токарной обработки полимерных материалов, техническая сущность которой заключается в изменении свойств обрабатываемого материала посредством электрофизического воздействия на его структуру с целью снижения энергосиловых параметров токарной обработки.

Ранее проведенными исследованиями [2] установлено, что для изменения структуры и, соответственно, свойств полимерных материалов используют электрофизические воздействия, такие как термообработка, обработка материалов ультразвуковыми колебаниями, магнитными и электрическими полями, электромагнитными импульсами.

Авторами проводились исследования прочности полимерного материала в зависимости от параметров обработки образцов наносекундными электромагнитными импульсами (НЭМИ). В качестве исследуемого материала использовался капролон, широко применяемый для изготовления деталей для различных машиностроительных производств. В качестве источника НЭМИ применялся специальный генератор ГНИ-01-1-6, изготовленный Южно-Уральским государственным университетом и имеющий следующие параметры:

- длительность импульсов – 1 нс;
- мощность одного импульса более 1 МВт;
- амплитуда импульсов более 8 кВ;
- максимальная допустимая частота следования генерирующих импульсов – 1000 Гц;
- напряженность электрического поля достигает $10^5 - 10^7$ В/м.

Характерной особенностью наносекундных электромагнитных импульсов является их однополярность, что приводит к отсутствию осциллирующих колебаний в излучаемом поле. Следствием этого выступает наличие пространственно-временного направленного действия силы за время одного импульса, создающего условия для воздействия на структуру и физико-химические свойства вещества [3].

Экспериментальные исследования влияния облучения НЭМИ на прочность капролона выполнялись следующим образом. На первом этапе плоские образцы капролона, изготовленные в виде двусторонних «лопаток» с прямоугольным сечением в рабочей зоне размером 3×2 мм, подвергались воздействию НЭМИ в течение определенного промежутка времени от 1 до 10 мин. Затем образцы подвергались одноосному растяжению при помощи нагружающего устройства универсальной установки АЛА ТОО ИМАШ 20-75. Кривая нагружения $\sigma = f(\tau)$ регистрировалась с помощью самописца разрывной установки, при этом испытания проводили при постоянных условиях проведения опытов: выдерживались технология изготовления образцов, температура, влажность, скорость и величина нагружения при одноосном растяжении, согласно ГОСТ 11262–80.

На рис. 1 представлены экспериментальные данные по исследованию прочности капролона в зависимости от времени воздействия НЭМИ, при этом прочность капролона оценивалась по пределу вынужденной эластичности. Анализ представленных данных показывает, что облучение капролона НЭМИ в течение 1, 5 и 10 мин приводит к снижению прочности образцов.

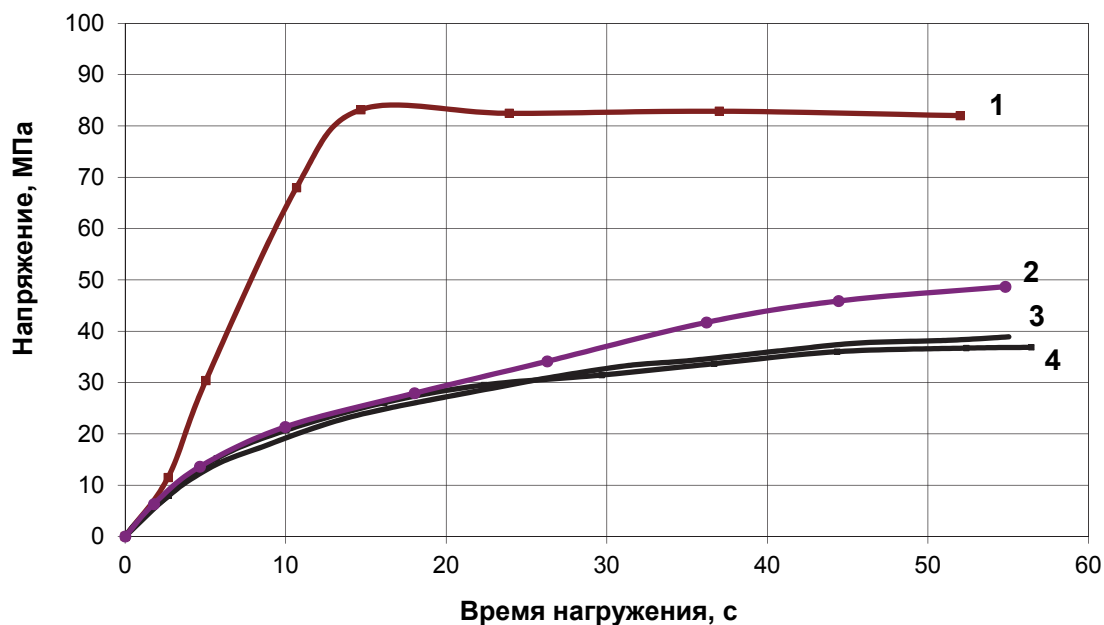


Рис. 1. Прочность капролона в зависимости от времени облучения НЭМИ:
1 – без облучения; 2 – время облучения 1 мин;
3 – время облучения 5 мин; 4 – время облучения 10 мин

Такой факт можно объяснить следующим образом. Как известно, полимерные материалы имеют тенденцию к изменению физико-механических свойств за счет электронного возбуждения полимерной структуры после электрофизического воздействия [4]. Если происходит электронное возбуждение полимерных цепей, то оно вызывает уменьшение энергий её связи. Данный эффект приводит к уменьшению механической стабильности нагруженной полимерной сетки и таким образом способствует разрыву цепи, возникновению разрушения или распространению микротрещин, увеличению дефектных мест, т. е. разрыхлению и охрупчиванию, и, следовательно, снижению механической прочности материала.

На основании представленных экспериментальных данных (см. рис.1) разработан способ обработки заготовок из капролона [5]. Технической задачей, на решение которой направлено изобретение, является повышение производительности обработки заготовки и физико-механических свойств изделий. Указанная задача решается тем, что предварительно точению заготовки из капролона предварительно обрабатывают НЭМИ. Заготовку из капролона закрепляют в токарном станке известным способом. Затем к торцам заготовки с помощью электродов подключают генератор наносекундных электромагнитных импульсов и производят обработку. После обработки заготовки капролона наносекундными электромагнитными импульсами её отсоединяют от генератора и обрабатывают механически на токарном станке обычными резцами.

С целью совершенствования технологического процесса разработан более совершенный способ обработки заготовок из капролона [6] и устройство для его реализации [7]. Техническая сущность способа заключается в том, что одновременно с резанием производят процесс облучения заготовки наносекундными электромагнитными импульсами, при этом в

качестве электродов для облучения наносекундными электромагнитными импульсами используют резец и скользящий элемент, которые контактируют с заготовкой из капролона и изолированы от металлических частей станка.

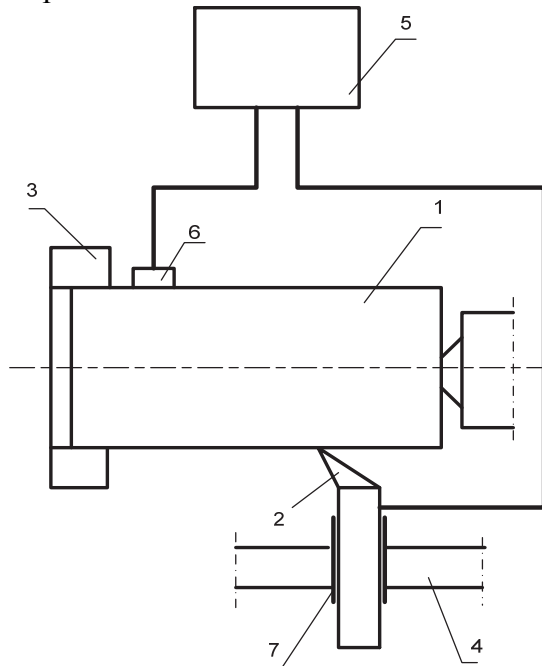


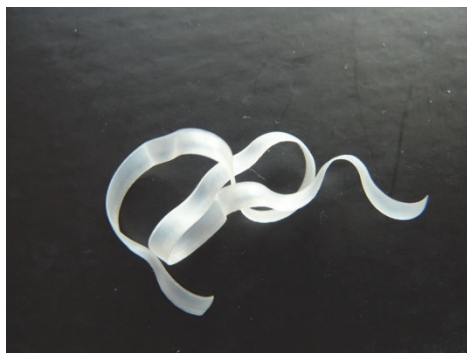
Рис. 2. Схема устройства для обработки заготовок из капролона

На рис. 2 приведена схема устройства для обработки заготовок из капролона. Заготовку 1 из капролона закрепляют в токарном станке известным способом. Затем к режущему инструменту 2 и к скользящему элементу 6 с помощью зажимов подключают генератор 5 наносекундных электромагнитных импульсов и производят обработку импульсами. Одновременно производят механическую обработку заготовки 1 режущим инструментом 2 с образованием стружки. Такая комбинированная обработка, в силу проявления вышеописанных эффектов, приводит к образованию разупрочненного поверхностного слоя материала, что позволит увеличить скорость резания и, следовательно, повысить производительность токарной обработки.

Подтверждением такого предположения служат фотографии стружек капролона, полученные при токарной обработке заготовок.

Стружка на рис. 3, а является непрерывной сливной. Такой вид стружки получается при обработке капролона в результате вязкого разрушения материала заготовки под действием режущих кромок инструмента. После добавления операции облучения заготовки НЭМИ характер стружкообразования резко изменяется, и стружка образуется элементная (рис. 3, б), т.е. состоящая из отдельных фрагментов. Такая стружка образуется в результате хрупкого разрушения материала под действием режущих кромок инструмента.

а)



б)

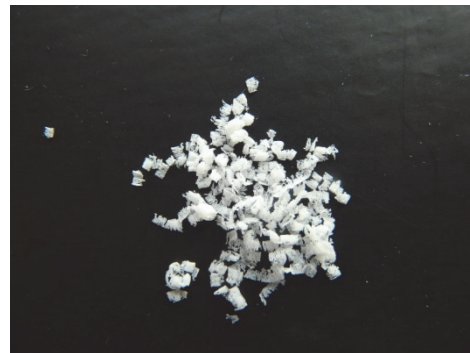


Рис. 3. Стружка капролона: а – после точения обычной заготовки; б – после точения заготовки, облученной НЭМИ

Факт образования элементной стружки (рис. 3, б) является экспериментальным подтверждением вышеописанных предположений об изменении структуры капролона под воздействием НЭМИ. При проведении токарной обработки заготовок производили измерение составляющей P_z силы резания при помощи балочного датчика силы СВ1А-КЗ, закрепленного на резце, аналогично ранее проведенным исследованиям [8]. Так, при точении обычной



заготовки из капролона составляющая P_z силы резания составляла 25 кН, а при точении заготовки, одновременно облучаемой НЭМИ, сила резания снижается до 12 кН. Снижение силы P_z объясняется технологическим разупрочнением поверхностного слоя обрабатываемой заготовки, которое происходит за счет развития имеющихся и образования новых внешних и внутренних дефектов в виде микротрещин благодаря воздействию НЭМИ.

Параметры токарной обработки устанавливаются на основании ранее проведенных исследований [8; 9] и составляли: скорость резания 145 м/с, продольная подача 0,1 мм/об, глубина резания 1,0 мм.

Выводы

Сформирована новая концепция высокопроизводительной токарной обработки полимерных материалов, базирующаяся на аддитивном эффекте, возникающем при комбинировании обычной токарной обработки с электрофизическим воздействием на заготовку в виде облучения ее наносекундными электромагнитными импульсами.

Дальнейшие исследования будут посвящены установлению взаимосвязей между параметрами воздействия и качественными изменениями в структуре различных полимерных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Еренков, О. Ю. Инновационные технологии механической обработки полимерных материалов резанием / О. Ю. Еренков. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2014. – 202 с.
- 2 Еренков, О. Ю. Технология получения и обработка резанием полимерных композиционных материалов / О. Ю. Еренков. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2014. – 143 с.
- 3 Белкин, В. С. Наносекундные электромагнитные импульсы и их применение / В. С. Белкин, В. А. Бухарин, В. К. Дубровин [и др.]; под ред. В. В. Крымского. – Челябинск: 2001. – 110 с.
- 4 Карташов, Э. М. Структурно-статистическая кинетика разрушения полимеров / Э. М. Карташов, Б. Цой, В. В. Шевелев. – М.: Химия, 2002. – 736 с.
- 5 Пат. № 2494864 Российская Федерация, (51) МПК В 29 С 37/00. Способ обработки заготовок из пластмасс / О. Ю. Еренков, С. О. Еренков, А. П. Богачев. – № 2012107300; заявл. 28.02.2012; опубл. 10.10.2013. Бюл. № 28. – 3 с.
- 6 Пат. № 2503538 Российская Федерация, (51) МПК В 29 С 37/00. Способ обработки заготовок из капролона / О. Ю. Еренков, С. О. Еренков, Хосен Ри, В. Э. Ри, А. П. Богачев. – № 2012151758; заявл. 03.12.2012; опубл. 10.01.2014. Бюл. № 1. – 3 с.
- 7 Пат. № 2518595 Российская Федерация, (51) МПК В 29 С 37/00. Устройство для обработки заготовок из пластмасс / О. Ю. Еренков, С. О. Еренков, Хосен Ри, В. Э. Ри, А. П. Богачев. – № 2012107300; № 2012151756; заявл. 03.12.2012; опубл. 10.06.2014. Бюл. № 16. – 3 с.
- 8 Erenkov O. Yu., Erenkov, S. O., Radchenko M. V. Experimental study of the effect of engineering system condition during turning polymer materials on machined surface roughness // Chemical and Petroleum Engineering, Vol. 49, Nos. 7–8, November, 2013 Page 491-494.
- 9 Еренков, О. Ю. Математическая модель нелинейных колебаний и определение условий неустойчивости технологической системы при точении / О. Ю. Еренков, А. Г. Ивахненко // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2010. – № I-1(1). – С. 45-51.

Мокрицкий Б. Я., Панова Е. А., Козлова М. А., Саблин П. А.
B. Y. Mokritsky, E. A. Panova, M. A. Kozlova, P. A. Sablin

**К ВОПРОСУ ОБ УПРАВЛЕНИИ РАБОТОСПОСОБНОСТЬЮ
МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА: УЧЕТ ВЛИЯНИЯ
НЕСТАЦИОНАРНОСТИ СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ И ДИНАМИЧЕСКОГО
КАЧЕСТВА СТАНКА НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ИНСТРУМЕНТА**

**ON THE ISSUE OF MANAGING METAL-CUTTING TOOLS' WORKING CAPACITY:
TAKIN INTO CONSIDERATION THE EFFECTS WHICH UNSTEADY CHIP
FORMATION AND THE DYNAMIC QUALITY OF A MACHINE HAVE UPON
THE PERFORMANCE OF TOOLS**



Мокрицкий Борис Яковлевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: boris@knastu.ru.

Mr. Boris Ya. Mokritsky – Dr.habil. of Engineering, Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: boris@knastu.ru.



Панова Екатерина Андреевна – магистр направления «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: tm@knastu.ru.

Ms. Ekaterina. A. Panova – Master of Design&Engineering Support for Machinery Production, Department of Mechanical Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: tm@knastu.ru.



Козлова Мария Андреевна – магистр направления «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: tm@knastu.ru.

Ms. Maria. A. Kozlova – Master of Design&Engineering Support for Machinery Production, Department of Mechanical Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: tm@knastu.ru.



Саблин Павел Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ikpmt@knastu.ru.

Mr. Pavel A. Sablin – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ikpmt@knastu.ru.

Аннотация. Проблема обеспечения работоспособности металлорежущего инструмента не решена исследователями до сих пор. Для условий современного автоматизированного механообрабатывающего производства, для обеспечения высокой точности обработки проблема дополняется



требованием стабильной работоспособности инструмента. Исследователями решение проблемы ведется по различным направлениям. В статье предпринята попытка решения проблемы обеспечения работоспособности металлорежущего инструмента за счет улучшения свойств инструментального материала.

Summary. The problem of ensuring the performance of metal cutting tools has not been solved by science. In the context of the modern automated mechanical processing industry, to ensure high precision machining means to additionally solve the problem of guaranteeing the durability, normal operation and performance of metal cutting tools. Researchers are tackling this task in different ways. Our paper attempts to address it by improving the properties of tool materials.

Ключевые слова: работоспособность инструмента, инструментальный материал.

Key words: tool durability, tool performance, tool material.

УДК 621.9

Учет влияния нестационарности стружкообразования на работоспособность инструмента

Условия естественного износа инструмента при взаимодействии стружки с передней поверхностью инструмента общеизвестны. Применительно к ним стойкость инструмента рассчитывается по известной эмпирической формуле со степенной зависимостью от параметров режима резания. Однако известно, что стружкообразование при резании неидеально пластичных материалов носит многоактный характер. Каждый элементный акт стружкообразования реализуется сдвигом элементарного объема срезаемого металла в плоскости сдвига. Акт сдвига изменяет равнодействующую силу упругости и является моментом изменения состояния технологической системы резания, в частности вызывает мгновенное изменение силы резания и состояния упругой системы станка [3]. Разброс частот совершения актов сдвига (частота стружкообразования) может быть использован как характеристика нестационарности стружкообразования. Приняв частоту стружкообразования за частоту высокочастотного циклического нагружения инструмента (при непрерывном или прерывистом резании), представляется возможным учитывать влияние нестационарности стружкообразования на работоспособность инструмента путем введения коэффициента K_{fT} в известную зависимость стойкости:

$$T = K_{fT} m \sqrt{\frac{C_v}{v t^X v_S^Y v^Z}} \quad (1)$$

где коэффициент K_{fT} является функцией частоты f стружкообразования:

$$f = \frac{v \sigma_B \cos \omega \sin \psi}{\Delta E \sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha - \psi\right)},$$

где v – скорость резания, м/мин; σ_B – предел прочности для обрабатываемого материала, МПа; ω – угол действия силы резания, град; ψ – угол наклона плоскости сдвига; Δ – величина отклонения вершины резца в процессе акта сдвига, мм; E – модуль упругости; α – передний угол, град.

В первом приближении для ниспадающей ветви зависимости (1) коэффициент K_{fT} может быть определен как отношение частоты стружкообразования к частоте собственных колебаний в системе (например колебаний инструмента).

Уменьшить влияние нестационарности стружкообразования на работоспособность инструмента можно, например, за счет подвода тепла в зону резания (общеизвестный прием)

или оптимизации геометрии инструмента, т. е. за счет изменения σ_B и α в зависимости (2). Но имеются и другие пути, например обеспечение таких условий, при которых сдвиг металла в плоскости сдвига (в зоне первичной деформации) происходит при минимальной (потребной) мощности (минимум работы сдвига), либо, например применение демпфирующих прослоек в поверхностных слоях инструмента, способных гасить импульс энергии, мгновенно подводимой в инструмент в процессе акта, сдвига.

Говоря об условиях реализации сдвига с минимумом потребной мощности, следует понимать, что речь идет об обеспечении условий стабилизации стружкообразования (т. е. о сведении к минимуму разброса частот f стружкообразования). Эти условия вытекают из анализа баланса энергии стружкообразования в зоне первичной деформации и реализуются при саморегуляции системы резания посредством самостоятельного изменения самой системой резания угла наклона плоскости сдвига или положения плоскости сдвига. Причем эти изменения от акта к акту должны происходить так (угол увеличивается или уменьшается; образуются одна или несколько плоскостей сдвига от режущего лезвия со смещением плоскости сдвига в металл заготовки либо на переднюю плоскость инструмента), чтобы сдвиг происходил при минимуме потребной (для деформации и сдвига) мощности с сохранением баланса энергии стружкообразования:

$$\sigma \left[\frac{\cos \gamma}{\cos(\psi - \gamma)} \frac{t_1 t_c}{\sin \psi} \right] \cong \sigma_{TC} \left[\frac{\cos \gamma}{\cos(\psi_i - \gamma)} \frac{t_1 t_{ci}}{\sin \psi_i} \right].$$

Здесь левая часть уравнения – энергия производства сдвига в области упрочненного материала, правая – в области неупрочненного; знак = указывает на возможность равенства этих энергий; знак \cong указывает на стремление системы к занятию более выгодных условий совершения работы сдвига; $\sigma = \sigma_T/3$ – предел прочности при сдвиге; t_1 – глубина резания; t_{ci} – толщина стружки, соответствующая текущему значению; ψ_i – угол сдвига.

Говоря о применении демпфирующих прослоек в поверхностных слоях инструмента, имеем в виду создание таких конструкций инструмента, которые бы не позволяли нестационарности стружкообразования (в виде импульсного нагружения инструмента вследствие каждого акта сдвига) снижать работоспособность инструмента (вследствие разброса от акта к акту сил резания, подводимой энергии и т. д.). Иначе говоря, если элементарные акты стружкообразования неизбежно приводят к переменным условиям нагружения (и разрушения) инструмента, то можно попытаться локализовать это непостоянство нагрузок на «искусственных» поверхностях инструмента с тем, чтобы основные рабочие слои инструмента работали в постоянных (стабильных, т. е. без влияния актов стружкообразования) условиях нагружения, что стабилизирует (и повышает) работоспособность инструмента. В качестве таких демпфирующих «искусственных» поверхностей могут быть использованы многослойные покрытия, а точнее «мягкие» слои между рабочими «твердыми» слоями износостойких покрытий инструмента.

Влияние динамического качества станка на работоспособность инструмента

Известно, что чем выше динамическое качество станка, тем выше точность заданных движений и меньше деформируемость конструкции при силовых воздействиях в стационарных и переходных процессах [2]. Для линеаризованной и детерминированной динамической системы станка показателями динамического качества являются [1] устойчивость движений, величина отклонений динамической системы и время переходных процессов. Они достаточно полно характеризуют высокоточные и прецизионные станки, где внешние силовые воздействия минимальны и во времени постоянны по величине. В этих условиях инструмент подвергается относительно постоянному нагружению и заметного влияния динамического качества станка на его работоспособность нет.

Положим, что осуществляется прерывистое резание. Следовательно, упругая система станка испытывает более сложные нагружения внешними силовыми воздействиями.



Наличие обратных связей в динамической системе станка усложняет условия нагружения упругой системы. Эта совокупность явлений отражается на непостоянстве деформаций конструкции, на устойчивости и точности движений, что порождает неравномерность нагружения инструмента в текущие значения времени и оказывает влияние на работоспособность инструмента [1]. Подобные явления имеют место также при нестационарных условиях резания, например при переменной глубине резания, изменении твердости локальных участков заготовки, циклическом (строгание) и дискретном (торцовое фрезерование) характере резания, где периодическое (низкочастотное) изменение скорости резания влияет [4] на устойчивость упругой системы (виброустойчивость) и (как сказано выше) на работоспособность инструмента. Такое же влияние наблюдается при высокочастотном воздействии на упругую систему, например, в результате последовательных элементарных актов стружкообразования.

Наиболее наглядно влияние динамического качества станка на работоспособность инструмента можно показать на примере операции зубофрезерования, где дискретность процесса нагружения инструмента дополнительно усложняется специфичным изменением размеров и геометрии слоев, срезаемых отдельным зубом фрезы в период ее врезания, установившегося резания и выхода. При этом колебательный контур упругой системы также реагирует на работу других зубьев, время входа в резание которых отличается от времени входа указанного зуба (разница времени зависит от скорости резания), также отличаются форма и размеры срезаемых ими слоев. Влияние переменных условий нагружения упругой системы станка на работоспособность инструмента оценим для случая нарезания одного широкого колеса (где доля переходных процессов мала) и нескольких узких колес (где доля переходных процессов велика), суммарная ширина обода которых равна ширине широкого колеса. Износ зуба (наиболее нагруженного) за время нарезания широкого колеса примем за единицу. Тогда износ за время нарезания узких колес при той же суммарной ширине обода оказывается больше единицы, хотя в процессе их нарезания преимущественно срезались более короткие (так как число резов в установившийся период резания с длинной стружкой мало) слои. Очевидно, причина этого факта связана с неустойчивым (вибрационным) состоянием упругой системы станка во время переходных периодов зубофрезерования колеса, что отражается на условиях нагружения инструмента и приводит к различным величинам износа. Это различие в величине износа (для нарезания однозаходной червячной фрезой колес модулем 3 мм, диаметром 132 мм, углом наклона зуба $12^{\circ}30'$, одно колесо шириной 72 мм либо четыре колеса по 18 мм, т. е. суммарная ширина $4 \times 18 = 72$ мм та же) при подаче 2 мм/об. колеса при разноименной встречной схеме резания составляет: для обычного способа зубофрезерования – 30 %, для диагонального – 10 %. При подаче 5 мм/об. колеса различие составляет соответственно 45 и 20 %, т. е. величина внешнего воздействия (из-за увеличения подачи) влияет на величину износа инструмента через устойчивость упругой системы. Отметим, что смена схемы резания на одноименную встречную (а именно она типична для производства) ведет к еще большему увеличению износа (до 2 раз и более).

Для примера зубофрезерования составлена динамическая модель резания с учетом тангенциальной составляющей силы, на основе анализа которой получены: уравнение динамической глубины резания:

$$b(t) = b_0(t) - [Y(t) - \Delta b(t)],$$

где $b_0(t)$ – заданная глубина резания; $Y(t)$ – смещение инструмента или изделия при внешнем силовом воздействии на упругую систему; $\Delta b(t)$ – изменение глубины резания как результат реакции упругой системы на силовое воздействие при предшествующем резе. Уравнение динамической силы резания:

$$F(t) = K_1 b(t) + K_2 X(t) + K_3 Y(t) + K_4 \dot{X}(t),$$



где $X(t)$ – смещение, например, шпинделя изделия (по касательной); $\dot{X}(t)$ – скорость смещения в направлении $X(t)$; $Y(t)$ – скорость смещения в направлении $Y(t)$; K_1, K_2, K_3, K_4 – коэффициенты пропорциональности, отражающие жесткость системы, демпфирование составляющих силы резания, передаточную способность и чувствительность к вибрациям. В частности, физический смысл коэффициента K_4 состоит в способности динамических сил резания выводить упругую систему из состояния динамического равновесия минимальной вибрационной устойчивости при выбранных параметрах, например, длине и жесткости шпинделя изделия.

В таких условиях резания снижение влияния на работоспособность (и ее стабильность) инструмента можно обеспечить повышением динамического качества станка, например, за счет снижения динамической (вибрационной) неустойчивости упругой системы. В ряде предложенных авторами решений это осуществлено посредством размыкания колебательных контуров по кинематической цепи подач зубофрезерного станка или взаимной компенсации колебательных контуров. Одним из примеров решения такой задачи является [5] зубофрезерный станок нетрадиционной компоновки с поступательным перемещением шпинделей изделия. Анализ его расчетной схемы и моделирующие опыты показывают возможность снижения динамической неустойчивости упругой системы станка, и, следовательно, повышения динамического качества и снижения влияния дискретных условий резания и переходных процессов на работоспособность инструмента.

Следует отметить, что аналогичное влияние на работоспособность инструмента может (очевидно, в меньшей, чем при зубофрезеровании, мере) наблюдаться и при других видах обработки с циклическим характером нагружения инструмента.

Резюмируя работу, необходимо подчеркнуть, что предложенный системный подход к проблеме повышения и стабилизации работоспособности металлорежущего инструмента позволяет рассматривать ее в рамках всей технологической системы резания с учетом всех процессов, происходящих в ней. Это создает более широкие возможности управления работоспособностью инструмента как за счет целенаправленной оптимизации свойств инструментального материала, так и за счет других путей, в частности за счет стабилизации динамических процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудинов, В. А. Динамика станков / В. А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967 – 352 с.
2. Кудинов, В. А. Динамические расчеты станков / В. А. Кудинов // СТИН. – 1995. – №8. – С. 3-13.
3. Мокрицкий, Б. Я. Особенности стружкообразования и устойчивости системы при нестационарном резании / Б. Я. Мокрицкий // Изв. вузов. Машиностроение. – 1996. – № 4-6. – С. 82-88.
4. Эльясберг, М. Е. Повышение устойчивости автоколебательной системы станка при воздействии периодического низкочастотного изменения скорости резания / М. Е. Эльясберг, М. Г. Биндер // Станки и инструмент. – 1989. – № 10. – С. 19-21.
5. Зубофрезерный станок: А. с. 1255316 СССР: МКИ В 23 F 5/20.

Свиридов А. В., Куриный В. В., Усова О. В.
A. V. Sviridov, V. V. Kuriny, O. V. Usova

ХУДОЖЕСТВЕННОЕ ЛИТЬЕ РУКАМИ СТУДЕНТОВ И ШКОЛЬНИКОВ

ARTISTIC CASTING PRACTICED BY UNIVERSITY STUDENTS AND SHOOOL PUPILS



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

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



Куриный Владислав Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение и металлургия» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kmtlp@knastu.ru.

Mr. Vladislav V. Kuriny – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering and Metallurgy, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kmtlp@knastu.ru.

Усова Ольга Валерьевна – студентка кафедры «Машиностроение и металлургия» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kmtlp@knastu.ru.

Ms. Olga V. Usova – master's student, Department of Mechanical Engineering and Metallurgy, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kmtlp@knastu.ru.

Аннотация. В статье изложены обзорные данные о деятельности лаборатории «Художественное и точное литье» кафедры «Машиностроение и металлургия» в плане развития творческих и исследовательских навыков у студентов, популяризации среди молодежи инженерных профессий и привлечения в вуз учащихся, заинтересованных в получении специальностей технического профиля.

Summary. The paper offers a overview of the work of the Laboratory of Artistic and Precise Casting under the Department of Mechanical Engineering and Metallurgy. This activity is viewed by the authors as having the purpose of developing creative and heuristic/research skills in students and of popularizing engineering occupations among youth. Also this is a tool to involve secondary school leavers in and attract them to university studies in various fields of engineering.

Ключевые слова: художественное литье, литейное производство, профориентационная работа.

Key words: artistic casting, foundry industry, vocational guidance.

УДК 621.74.045

Первыми металлами, с которыми имел дело человек, были медь и золото. Этому способствовало то, что они находились в виде россыпей и легко добывались, имели сравнительно невысокую температуру плавления и легко принимали необходимую форму с использованием метода холодной деформации и литья. Первыми отливками были художественные изделия из золота в виде различных украшений и предметов религиозного культа. Таким образом, можно считать, что литейное производство началось с художественного литья.

Помимо производства литых украшений для знати и среднего сословия (ювелирного производства), литейщики удовлетворяли многочисленные бытовые нужды населения, особенно в период образования Киевской Руси. В это время отливали посуду, палицы, кресты, бронзовые зеркала, колокола, многие из которых сохранились до настоящего времени.

Мощь государства часто оценивали по уровню развития литейных технологий из-за того, что кроме предметов религиозного культа, украшений и домашней утвари можно было и пушки отливать. Мастера-литейщики высоко ценились. Так, согласно сборнику правовых норм Киевской Руси «Русская Правда» за убийство ремесленника-литейщика устанавливалось наказание – побор в казну, вдвое превышающий побор за убийство «простого» человека [1; 2].

Со времени появления и развития промышленного производства литейное производство и металлургия являются основной заготовительной базой машиностроительного комплекса, а объемы производства литых заготовок находятся в пропорциональной зависимости от объемов производства машиностроения. И не случайно, что в числе первых созданных кафедр университета была кафедра «Машины и технология литейного производства», выпускники которой были просто необходимы для развивающегося города с огромным промышленным потенциалом.

С целью популяризации среди молодежи инженерных профессий и привлечения в вуз учащихся, заинтересованных в получении специальностей технического профиля, на кафедре «Машины и технология литейного производства» (в настоящее время кафедра «Машиностроение и металлургия») была создана лаборатория «Художественное и точное литье». Лаборатория располагает всем необходимым оборудованием, инструментами и материалами для плавки металла, формовки модельных блоков, изготовления и обработки отливок, а самое главное – есть люди, желающие заниматься в этом направлении в свободное от учебы и другой работы время.



Рис. 1. Декоративные изделия из металлов

В рамках учебного процесса кафедры оборудование лаборатории используется для проведения занятий по различным дисциплинам и научных исследований с целью подготовки магистерских диссертаций. По результатам работы публикуются научные и обзорные



материалы в сборниках статей разного уровня, подаются заявки на изобретения. Кроме этого, ведется работа в области изготовления декоративных изделий из металлов, направленная на развитие творческих и исследовательских навыков будущих специалистов, а также профориентационная работа со школьниками города (см. рис. 1).

С появлением в Технопарке университета лаборатории быстрого прототипирования представилась возможность изготовления отливок по моделям, произведенным на трехмерных принтерах без подготовки дорогостоящей и трудоемкой оснастки. Это может быть полезно для изготовления как промышленных, так и художественных отливок, когда требуется их штучное или мелкосерийное производство.

Основная задача таких видов деятельности на базе лаборатории «Художественное и точное литье» – дать правильное представление об инженерно-техническом труде как о творческом и увлекательном процессе. Ведь современное производство, способное конкурировать, требует именно творческого подхода к решению различных проблем и умения мыслить глубоко и нестандартно. Полученные в данной области навыки и теоретические знания покрывают широкий спектр будущей деятельности взрослых молодых людей и открывают много возможностей. Приобретенные знания в данной сфере позволят использовать их в будущем в различных направлениях, например, таких как ювелирное производство, дизайн декоративных изделий из металлов, трехмерное моделирование с использованием технологий быстрого прототипирования, металлургия цветных металлов и многих других [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Ухин, С. В. Художественное литье / С. В. Ухин. – М.: Изд-во АСТ; Донецк: Сталкер, 2004. – 59 с.
2. Зотов, Б. Н. Художественное литье: учеб. пособие для учащихся средних профессионально-технических училищ / Б. Н. Зотов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. – 288 с.
3. Куриный, В. В. Возможность применения методов быстрого прототипирования в литейном производстве / В. В. Куриный, А. В. Свиридов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № IV-1(8). – С. 86-89.



Королев А. П., Минаев А. М., Мордасов Д. М., Тялина Л. Н.
A. P. Korolev, A. M. Minaev, D. M. Mordasov, L. N. Tyalina

**МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АЛЮМИНИЯ А5N
ПОСЛЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ**

**METALLOGRAPHIC ANALYSIS OF A5N ALUMINIUM
AFTER MACHINING OPERATIONS**

Королев А. П. – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материалы и технология» Тамбовского государственного технического университета (Россия, Тамбов). E-mail: korolevanpal@yandex.ru.

Mr. Andrey P. Korolev – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Materials and Technology, Tambov State Technical University (Russia, Tambov). E-mail: korolevanpal@yandex.ru.

Минаев А. М. – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материалы и технология» Тамбовского государственного технического университета (Россия, Тамбов). E-mail: mit@mail.nnn.tstu.ru.

Mr. Alexander M. Minaev – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Materials and Technology, Tambov State Technical University (Russia, Tambov). E-mail: mit@mail.nnn.tstu.ru.

Мордасов Д. М. – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материалы и технология» Тамбовского государственного технического университета (Россия, Тамбов). E-mail: dmmordasov@rambler.ru, mit@mail.nnn.tstu.ru.

Mr. Denis M. Mordasov – Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Materials and Technology, Tambov State Technical University (Russia, Tambov). E-mail: dmmordasov@rambler.ru, mit@mail.nnn.tstu.ru.

Тялина Л. Н. – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Материалы и технология» Тамбовского государственного технического университета (Россия, Тамбов). E-mail: mit@mail.nnn.tstu.ru.

Ms. Lyudmila N. Tyalina – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Department of Materials and Technology, Tambov State Technical University (Russia, Tambov). E-mail: mit@mail.nnn.tstu.ru.

Аннотация. В работе рассмотрены основные стадии технологического процесса изготовления катодов лазерных гироскопов. Приведены результаты исследований микроструктуры и микротвердости алюминия А5N после различных технологических операций.

Summary. The paper investigates the key stages of manufacturing laser gyroscope cathodes. We offer the results of an analysis of the microstructure and microhardness of A5N aluminum after various processing operations.

Ключевые слова: холодный катод, алюминий, микроструктура, микротвердость, деформация, отжиг, зеренная структура.

Key words: cold cathode, aluminum, microstructure, microhardness, deformation, annealing, grain structure.

УДК 620.18

Высокоочищенный алюминий А5N широко используется в радиоэлектронных приборах, таких как лазерный гироскоп, при изготовлении холодного катода, который является источником эмитированных электронов.

При анализе свойств холодного катода большое значение имеют структурные состояния алюминия после различных технологических операций, связанных с изготовлением катода.

Нами проведены металлографические исследования высокоочищенного алюминия для холодного катода после проведения технологических операций.



Алюминий А5N поставляется после зонной плавки в литом состоянии. В торцевых зонах слитка наблюдается значительная пористость и литейная рыхлость. С удалением от торцевой поверхности количество и размеры таких дефектов уменьшается и на расстоянии 15...20 мм снижается до допустимых пределов. В исходном состоянии твердость по Бринеллю А5N составляла $(15,7 \pm 0,6)$ кг/мм². При измерении твердости использовался стальной шарик диаметром 10 мм, к которому прикладывалась нагрузка 250 кгс в течение 60 с (условия измерения – 10/250/60).

Механические и физико-химические свойства металлов и сплавов в значительной степени определяются структурой материала, важным элементом которой являются границы зерен и раздела фаз [2]. Для выявления зеренной структуры шлифы алюминия А5N подвергали травлению в водном растворе соляной и азотной кислот [3].

Чтобы иметь более полное представление о технологических операциях полезно перечислить основные переходы при изготовлении катода.

Сначала из алюминия точением изготавливают цилиндрические заготовки, которые после очистки и химической полировки подвергаются штамповке в два перехода. Следует отметить, что алюминий в процессе высадки подвергается высокой степени пластической деформации (~ 90 % в направлении приложения нагрузки) с последующим технологическим нагревом.

Как отмечалось ранее, твердость по Бринеллю (10/250/60) после отжига в муфельной печи при 500 °С в течение 1 ч понизилась с $(15,7 \pm 0,6)$ кг/мм² до $(10,9 \pm 0,3)$ кг/мм². Образцы толщиной 15 мм подвергали осадке на прессе П-50. Осадка с усилием в 15 т дала относительную деформацию $\delta = 90$ %. После штамповки катоды подвергались механической обработке с последующей очисткой и химической полировкой.

Часть образцов выдерживали при комнатной температуре, остальные нагревали в муфельной печи в окислительной атмосфере при температуре 100, 150, 200, 500 °С в течение 10, 30 и 120 мин.

Для контроля механических свойств измеряли микротвердость образцов на верхней поверхности, полученной при осадке. Результаты измерений показали слабое увеличение микротвердости, что, по-видимому, связано с взаимодействием алюминия с газами атмосферы. Для металлографического анализа структуру на поперечном сечении образцов выявляли травлением в 5%-ном водном растворе фтористоводородной кислоты. Результаты измерения размера зерна после 10 мин отжига при разных температурах приведены в табл. 1.

Таблица 1

Размер зерна в алюминии А5N после деформации и отжига

Состояние металла	Деформирован	Отжиг в течение 10 мин при температуре			
		100 °С	150 °С	200 °С	300 °С
В направлении осадки					
Среднее значение, мм	0,2	0,2	0,2	0,4	1,2
Стандартное отклонение, мм	0,13	0,18	0,18	0,18	0,59
Поперек направления осадки					
Среднее значение, мм	0,6	0,4	0,9	0,8	1,2
Стандартное отклонение, мм	0,48	0,36	0,33	0,3	0,67

В деформированном образце (травление через 5,5 ч после деформации) наблюдается вытянутость зерна (отклонение размера вдоль и поперек направления течения металла равно трем).

Уже при 100 °С коэффициент формы зерна снижается до двух, что свидетельствует о старте первичной рекристаллизации. При 150 °С и 200 °С (время отжига 10 мин) средний размер зерен в направлении пластического течения металла при осадке увеличивается, что может быть связано с ускоренным ростом благоприятно ориентированных зерен (наследственность текстуры деформации) на начальных стадиях вторичной рекристаллизации. При выдержке 30 мин такая форма зерен наблюдается лишь при 150 °С, а в случае 120 мин – уже при 100 °С. Увеличение температуры до 300 °С дает крупное зерно даже при малой выдержке.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что процессы технологических нагревов и выдержек деталей «холодный катод» будут обязательно сопровождаться значительным ростом зерна в высокочистом алюминии.

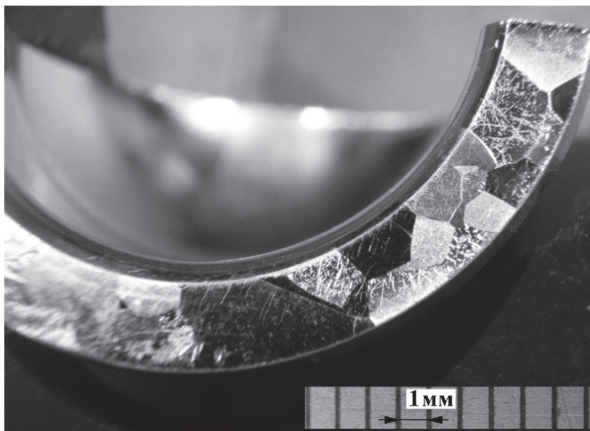


Рис. 1. Зеренная структура фланца алюминиевого катода

(при токе 100 мА) границ зерен не видно, так как в поле зрения при таком увеличении попадает только часть зерна. На реплике заметны замкнутые кольцевидные неоднородности зерна – это проявились субзерна, ориентированные под другими углами к плоскости травления основного зерна. Из-за присутствия субзерен механические свойства зерна алюминия неравномерны (подтверждается измерением микротвердости по диагонали зерна).

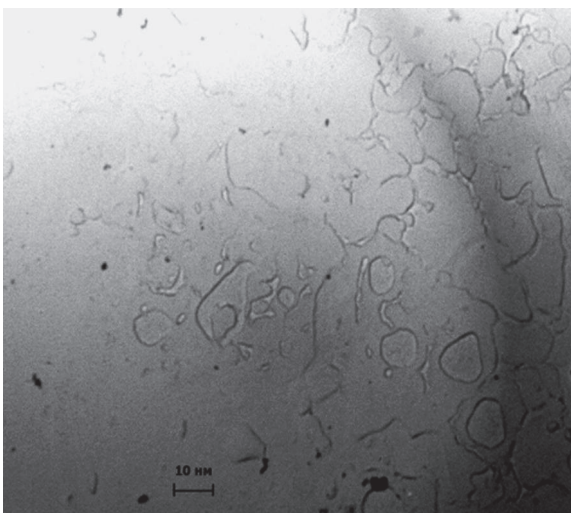


Рис. 2. Субструктура зерна алюминия А5N

На рис. 1 представлена фотография зеренной структуры фланца алюминиевого катода. Важно подчеркнуть, что кристаллиты выходят на поверхность разными кристаллографическими плоскостями. Это видно по травимости (активности) разных зерен: одни темнее, другие светлее (см. рис. 1). Такая структура при технологической операции окисления будет приводить к образованию оксидной пленки разной толщины и степени ее совершенства по катионному и анионному составу (нестехиометричности).

С помощью электронного просвечивающего микроскопа ЭМВ-100А методом реплик исследовались структуры внутри зерна алюминия (см. рис. 2) [1]. При увеличении 30 000х

Посредством измерения микротвердости исследовалась субструктура внутри зерна. Распределение микротвердости характеризует распределение механических напряжений в зерне, которые влияют на качество эмиссионного слоя катода.

Измерения проводились с нагрузкой $P = 20 \cdot 10^{-3}$ кг и шагом 500 мкм. Расчет значений микротвердости (H_{μ}) проводился по формуле

$$H_{\mu} = \frac{1850 \cdot P}{d^2},$$

где P – нагрузка, 10^{-3} кг; d – диагональ отпечатка, мкм.

В результате измерений выяснилось, что микротвердость внутри зерна колеблется в пределах значений от 20,4 до 32,8 кг/мм², что составляет 60,8 %. Это значительная неоднородность суб-



структуры зерна алюминиевого катода, которая может заметно повлиять на эмиссионные свойства катода. Таким образом, субмикроскопический анализ зерен алюминиевого катода выявил еще одну потенциальную причину снижения эксплуатационных характеристик холодного катода. Для увеличения однородности зерен необходимо исследовать деформационные процессы в алюминии с целью совершенствования технологии изготовления алюминиевого катода.

Таким образом, грубая крупнозернистая структура с внутрикристаллическими дефектами (нестехиометричностью) может ухудшить условия формирования, а затем и эксплуатации оксидного покрытия за счет резкого различия физико-химических свойств поверхности разных зерен, входящих внутрь объема катода. Наиболее оптимальной является мелкозернистая структура материала, которая усредняет свойства оксидной эмиссионной поверхности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 12-08-00046-а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брандон, Д. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля / Д. Брандон, У. Каплан. – М.: Техносфера, 2004. – 384 с.
2. Лиманкин, В. В. Количественная оценка зеренной структуры конструкционных сталей при пластической деформации и рекристаллизационном отжиге / В. В. Лиманкин, В. А. Ким, Б. Н. Марьин, В. А. Сухоплюев, С. Б. Марьин, А. М. Шпилев, Э. А. Дмитриев // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2012. – № II-1(10). – С. 81-88.
3. Штанько, В. М. Электрохимическое полирование металлов / В. М. Штанько, П. П. Карязин. – М.: Металлургия, 1979. – 160 с.

Верхотуров А. Д., Козырь А. В., Коневцов Л. А.
A. D. Verkhoturov, A. V. Kozyr, L. A. Konevtsov

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ПРИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОМ ЛЕГИРОВАНИИ С УЧЁТОМ КРИТЕРИЯ ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

A STUDY ON THE FORMING OF ELECTROSPARK ALLOYED SURFACES ON TITANIUM ALLOYS WITH REGARD TO THE HEAT IMPACT CRITERION



Верхотуров Анатолий Демьянович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института водных и экологических проблем ДВО РАН (Россия, Хабаровск). E-mail: Verhoturov36@mail.ru.

Mr. Anatoly D. Verkhoturov – Dr.habil. of Engineering, Professor, Senior Research Fellow, the Institute of Water and Environmental Problems, the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk). E-mail: Verhoturov36@mail.ru.



Козырь Аркадий Валентинович – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории обработки материалов концентрированными потоками энергии Амурского государственного университета (Россия, Благовещенск); 89246710782. E-mail: a-v-kozyr@yandex.ru

Mr. Arkady V. Kozyr – PhD in Engineering, Associate Professor, Senior Research Fellow, the Laboratory of Materials Processing by Concentrated Energy Fluxes (Russia, Blagoveshensk); + 7 (924) 6710782. E-mail: a-v-kozyr@yandex.ru



Коневцов Леонид Алексеевич – научный сотрудник Института материаловедения Хабаровского научного центра ДВО РАН (Россия, Хабаровск). E-mail: konevts@narod.ru.

Mr. Leonid A. Konevtsov – Research Fellow, the Institute of Materials Technology, Khabarovsk Research Centre of the Far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk). E-mail: konevts@narod.ra.

Аннотация. В статье рассмотрен процесс формирования упрочненного слоя титанового сплава BT18 при электроискровом легировании материалами, образующими с титаном жаростойкие интерметаллиды. Подробно исследована микроструктура упрочненной поверхности сплава BT18 и электрода-инструмента. Представлены закономерности формирования легированного слоя в зависимости от критерия теплового воздействия.

Summary. This research focuses on the process of formation of a hardened case on the surface of BT18 titanium alloy samples by electrospark deposition. The formation of the coating layer was performed with anode materials which form intermetallic compounds with titanium. The microstructure of the hardened surface of the BT18 alloy samples and the microstructure of the electrode tool are investigated in detail. We also ascertain a dependence between the thermal impact and the formation of the deposited layer.

Ключевые слова: титан, титановые сплавы, поверхностное упрочнение, электроискровое легирование, массоперенос, закономерности формирования, легированный слой, интерметаллиды, критерий теплового воздействия, микроструктура, продукты эрозии, жаростойкость.

Key words: Titanium, Titanium alloys, surface hardening, electrospark deposition, mass transfer, alloying behavior, alloy layer, intermetallic compounds, thermal impact criterion, microstructure, products of erosion, heat resistance.

УДК 621.9.048.4



Введение

Известно, что сплавы на основе титана обладают сравнительно высокой удельной прочностью, жесткостью, а также коррозионной стойкостью [1]. Это предопределяет использование таких сплавов в авиакосмической технике, судостроении, других отраслях современного машиностроения [3; 7]. Однако их высокая химическая активность при температурах 450 – 600 °С, сравнительно низкая износостойкость и жаростойкость побуждают использовать поверхностное упрочнение для более широкого и эффективного применения материала, особенно при создании ответственных деталей.

Особый интерес представляет в этом отношении сплав ВТ18, применяемый для изготовления ответственных деталей, устойчиво работающих при температурах до 600 °С, например, компрессоров авиадвигателей [6].

Поверхностное упрочнение значительно повышает эксплуатационные характеристики, жаростойкость, износостойкость и коррозионную стойкость титановых сплавов [4]. Одним из эффективных методов поверхностного упрочнения этих сплавов является метод электроискрового легирования (ЭИЛ). Физико-химические и эксплуатационные свойства титановых сплавов напрямую зависят от процесса формирования легированного слоя (ЛС), его состава и структуры. Однако систематизированных сведений о формировании поверхностного слоя сплава ВТ18 в литературе нет. В связи с этим в настоящей работе проведено исследование процесса формирования упрочненного слоя при ЭИЛ титанового сплава ВТ18 материалами, образующими с титаном жаростойкие интерметаллиды – Al, а также интерметаллидами TiAl, Ni₃Al – с целью выявить основные закономерности и определить оптимальные условия ЭИЛ при выбранных парах электродных материалов.

Методика, материалы и оборудование

Выбор Al, TiAl, Ni₃Al в качестве легирующего электрода (анода) связан со способностью этих материалов в процессе ЭИЛ повышать термическую стабильность α-сплавов титана и образовывать с материалом подложки (катодом) жаростойкие интерметаллиды, способствующие интенсивному массопереносу при легировании, повышению жаростойкости обрабатываемого материала [4; 5].

В качестве материала катода выбран технический сплав ВТ18, в состав которого входят ~ 10 – 12 % Zr; 7,2 – 8,2 % Al; 0,2 – 1,0 % Mo; 0,18 % Si, остальное – Ti и незначительное количество технологических примесей (Nb, Fe, O, H, N, C и др.). Рабочие поверхности электродов подвергались обработке алмазным кругом до шероховатости Ra = 1,6 мкм.

ЭИЛ осуществляли на установке «ЭФИ-46А» на воздухе. Высокая сплошность и низкая шероховатость достигались на режимах ЭИЛ малого теплового воздействия по предложенному ранее критерию формирования ЛС [2] $R = 33 - 86 \text{ А/Дж}$, «критерию теплового воздействия» (при энергии в импульсе $E = 0,03 - 0,12 \text{ Дж}$, $I_{к.з} = 2,6 - 3,8 \text{ А}$; $U = 15 - 25 \text{ В}$). Для сравнения был выбран режим повышенных тепловых воздействий: $R = 0,8 - 14 \text{ А/Дж}$ ($E = 0,2 - 6,0 \text{ Дж}$; $I_{к.з} = 4,0 - 4,9 \text{ А}$; $U = 43 - 193 \text{ В}$) с целью обеспечить такими параметрами интенсивный массоперенос и создать большую толщину покрытия на подложке.

Кроме того, для учета влияния тепловой нагрузки на электроды критерий теплового воздействия R (А/Дж) варьировался в зависимости от тока короткого замыкания $I_{к.з}$, напряжения U , энергии в импульсе E . Чем больше значение R , тем меньше влияние тепловых нагрузок на электроды [2].

Для выявления закономерностей формирования ЛС изучали кинетику массопереноса в зависимости от длительности времени ($t = 1 - 18 \text{ мин}$) ЭИЛ образцов единичной площади 1 см^2 и предложенного критерия теплового воздействия R .

Структура и качественный состав ЛС исследовались с помощью металлографического микроскопа «МИМ-10», электронных микроскопов типа «УЭМВ-100К» и «Стереоскан S4-10». Фазовый анализ проводился на дифрактометре «ДРОН-3М». Шероховатость поверхности измеряли на профилометре модели «283».

Результаты экспериментов и их обсуждение

Представленные результаты кинетики процесса упрочнения сплава ВТ18 алюминием: Al/VT18 (см. рис. 1), а также TiAl/VT18 (см. рис. 2, а) и Ni₃Al/VT18 (см. рис. 2, б) показывают, что эрозия объема материала анода (Al, TiAl, Ni₃Al) изменяется в зависимости от времени ЭИЛ и критерия теплового воздействия R в общем случае в соответствии с “правилом Лазаренко”. При этом со снижением значений критерия теплового воздействия и повышением значений режимов обработки эрозия объема анода усиливается. Чем меньше R, тем больше влияние импульсных тепловых и механических нагрузок на электроды; чем больше R, тем меньше значения эрозии объемов электродов в зависимости от времени ЭИЛ.

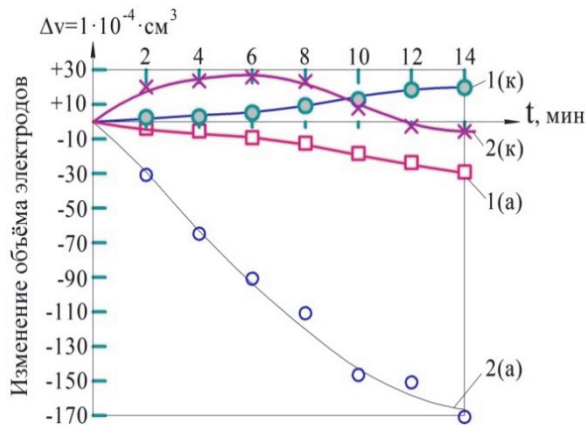


Рис. 1. Изменение объема электродов ($\Delta v = 1 \cdot 10^{-4} \text{ см}^3$) в зависимости от времени ЭИЛ Al/VT18 и критерия теплового воздействия R: R = 33 А/Дж (E = 0,12 Дж), кривые 1; R = 1,5 А/Дж (E = 3 Дж), кривые 2, анода (а) и катода (к) соответственно.

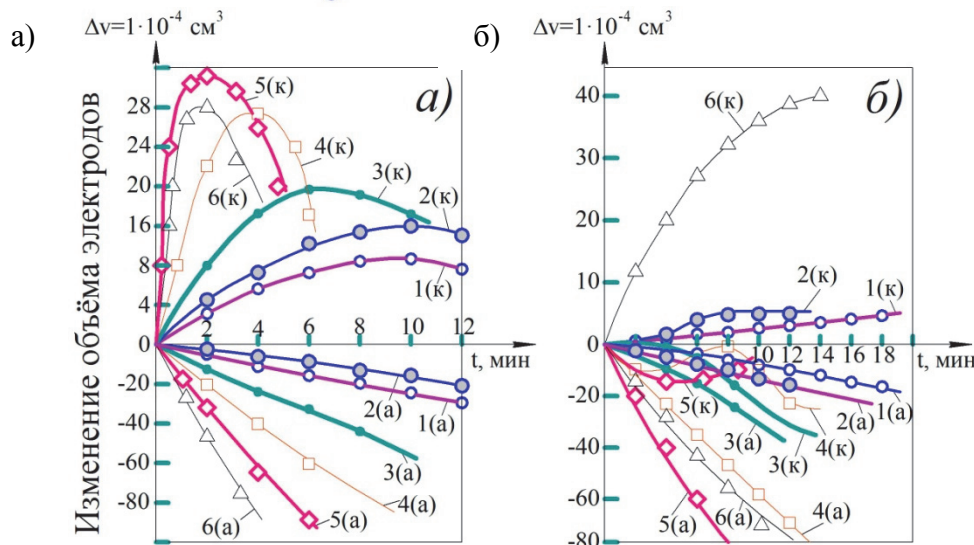


Рис. 2. Изменение объема электродов ($\Delta v = 1 \cdot 10^{-4} \text{ см}^3$) при ЭИЛ: а – TiAl/VT18; б – Ni₃Al в зависимости от времени t, мин, и критерия теплового воздействия R, А/Дж: 86 – кривые 1 анода (а) и катода (к) соответственно; далее: 33 – кривые 2; 14 – 3; 4,5 – 4; 1,5 – 5; 0,8 – 6

Для изменения массы катода в процессе ЭИЛ/VT18 закономерности, сформулированные «правилом Лазаренко», не всегда соблюдаются. Можно отметить ряд характерных зависимостей изменения массы катода при ЭИЛ от критерия теплового воздействия R и времени обработки единичной площади t:

1. Линейное повышение массы катода на режимах с критерием R малых тепловых воздействий (R = 33 А/Дж), кривые 1(к) при ЭИЛ Al/VT18 (см. рис. 1) и Ni₃Al/VT18 (см. рис. 2, б).



2. Линейное повышение, а затем стабилизация значений массы катода, наиболее близкие по характеру к «кривым Лазаренко»: при ЭИЛ TiAl/VT18 – кривые $1_{(к)}$ – $3_{(к)}$ (см. рис. 2, а); при ЭИЛ Ni₃Al/VT18 – кривые $2_{(к)}$ и $6_{(к)}$ (см. рис. 2, б).

3. При ЭИЛ TiAl/VT18 на режимах с критерием повышенного теплового воздействия режимов обработки $R = 0,8 – 14$ А/Дж и соответственно повышением значений $E = 0,2 – 6$ Дж наблюдаются кривые $4_{(к)}$, $5_{(к)}$, $6_{(к)}$ с наибольшим привесом катода (см. рис. 2, а).

4. При ЭИЛ Ni₃Al/VT18 для удельного привеса (Δ_v) с режимами $R = 1,5 – 33$ А/Дж наблюдаются отрицательные значения, начиная с первых минут – кривые $3_{(к)}$, $4_{(к)}$, $5_{(к)}$ (см. рис. 2, б). В случае с наибольшим значением энергии импульса $E = 6$ Дж и значением критерия $R = 0,8$ А/Дж отмечается наибольший привес катода – кривая $6_{(к)}$ (см. рис. 2, б).

Следовательно, выбор оптимального времени обработки $t_{опт}$ при ЭИЛ титанового сплава VT18 представляет сложную задачу, при этом $t_{опт}$ должно быть меньше времени наступления отрицательных значений Δ_v . Для обоснования $t_{опт}$ необходимо прежде всего исследовать состав, структуру ЛС, так как в зависимости от режимов обработки, состава электродов они должны определять $t_{опт}$.

При ЭИЛ Al/VT18 с критерием малых тепловых воздействий $R > 33 – 40$ А/Дж ($E < 0,12 – 0,2$ Дж) с увеличением времени ЭИЛ эрозия анода непрерывно возрастает, а вес катода соответственно повышается (рис. 1, кривая 1), т. е. осуществляются благоприятные условия формирования ЛС. При ЭИЛ с критерием повышенных тепловых воздействий $R < 14 – 18$ А/Дж ($E > 0,2$ Дж; $J_{к.з} > 4$ А; $U_{х.х} > 43$ В) привес массы катода при ЭИЛ до 6 мин возрастает, а затем уменьшается и после 12 мин становится даже меньше первоначальной величины, что свидетельствует о разрушении ЛС вследствие воздействия мощного импульсно-механического ударного контакта анода.

Различный характер зависимостей привеса катода и эрозии анода от длительности процесса ЭИЛ с критерием “малых” и “повышенных” тепловых воздействий свидетельствует о значительном влиянии режимов обработки на формирование ЛС (см. рис. 1, 2).

При ЭИЛ с критерием малых тепловых воздействий (низкие значения $E = 0,03 – 0,12$ Дж и повышенные значения $R = 33 – 86$ А/Дж) в поверхностных слоях возникают сравнительно небольшие напряжения, и перенос вещества осуществляется преимущественно в жидкой фазе. По этой причине суммарный привес объема катода непрерывно повышается с ростом времени обработки единицы обрабатываемой площади. При ЭИЛ с критерием повышенных тепловых воздействий и легировании с большими энергиями в импульсе ($R = 0,8 – 4,5$ А/Дж; $E = 0,28 – 6,0$ Дж) в ЛС увеличиваются напряжения I рода, что приводит (с увеличением длительности ЭИЛ TiAl/VT18 и Ni₃Al/VT18) к разрушению ЛС, а суммарное увеличение $\Sigma\Delta_k$ с увеличением длительности времени t мин сменяется уменьшением привеса объема Δ_v (см. рис. 1, 2). Использование режимов с повышенными тепловыми воздействиями и повышенными энергиями в импульсе ($R = 1,5 – 14$ А/Дж; $J_{к.з} = 4,0 – 4,6$ А; $U_{х.х} = 43 – 130$ В; $E = 0,2 – 3,0$ Дж) значительно снижает порог хрупкого разрушения, так что на начальном этапе обработки с увеличением длительности времени ЭИЛ привес объема катода становится отрицательным. В случае со значениями критерия $R = 0,8$ А/Дж повышенных тепловых воздействий ($E = 6$ Дж, $J_{к.з} = 4,9$ А; $U_{х.х} = 193$ В) наблюдается наибольший привес объема катода (кривая б) при ЭИЛ Ni₃Al/VT18.

На рис. 3 представлена структура поверхности сплава VT18 после ЭИЛ алюминием с критерием R малых тепловых воздействий. Видно, что после первого прохода электрода инструмента исходная поверхность материала подложки изменяется незначительно, локально появляются участки характерного взаимодействия материалов электродов повышенной шероховатости (см. рис. 3, а). В некоторых случаях можно наблюдать равномерное распределение частиц материала анода в материале катода (см. рис. 3, б), причем размерность осаждающихся на катод частиц эрозии анода примерно одинакова. После второго прохода электрода инструмента, по уже измененному поверхностному слою подложки, доля необработанной поверхности уменьшается, на поверхности катода появляются капли закристаллизо-

вавшейся жидкой фазы, перенесенной с анода в процессе его эрозии (см. рис. 3, в), частицы новых фаз, представляющих собой интерметаллиды или оксиды (см. рис. 3, з). В результате третьего прохода электрода-инструмента на поверхности катода в дополнение к предыдущей картине рельефно выделяются границы зерен, происходит интенсивная их эрозия (см. рис. 3, д), появляются участки эрозионного износа поверхности катода и хрупкого разрушения некоторых участков структуры со следами скольжения (см. рис. 3, е).

Электронно-микроскопические снимки поверхности сплава ВТ18 после ЭИЛ алюминием на режиме с критерием R повышенных тепловых воздействий представлены на рис. 4.

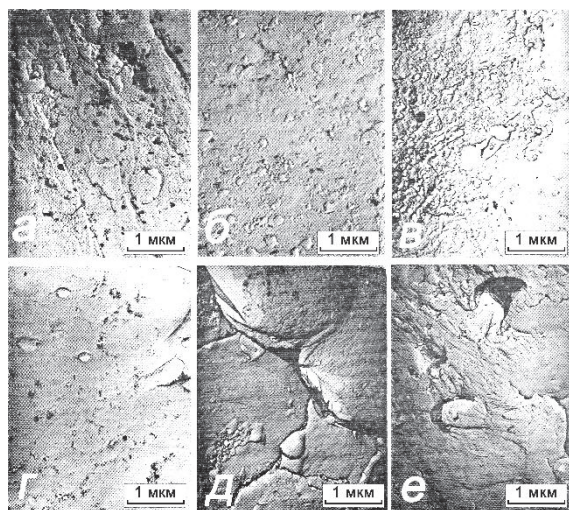


Рис. 3. Микроструктура поверхности сплава ВТ18, упрочненного алюминием на режиме с критерием R малых тепловых воздействий: а, б – после одного прохода электрода-инструмента; в, г – после двух; д, е – после трех проходов

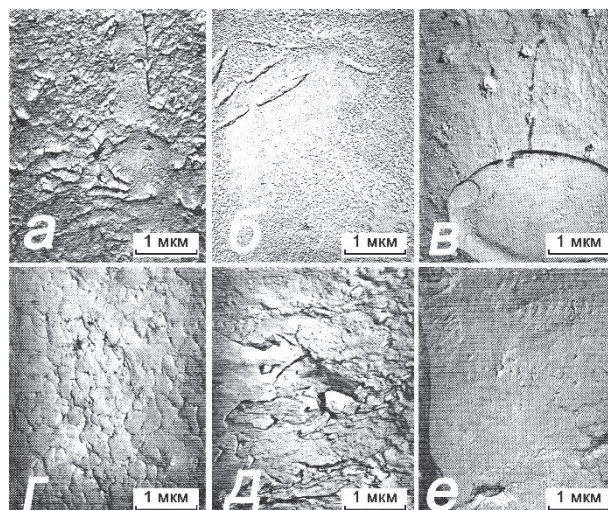


Рис. 4. Микроструктура поверхности упрочненного сплава Al/ВТ18 на режиме с критерием R повышенных тепловых воздействий: а-г – после двух проходов электрода-инструмента; д-е – после четырех проходов

В начале обработки подложки с числом проходов 1-2 структура поверхности обрабатываемого материала несколько отличается от структуры, сформированной при легировании на режиме с критерием малых тепловых воздействий. Можно наблюдать участки взаимодействия материалов электродов, в формировании которых участвуют и более глубоко лежащие слои материала вторичной структуры, что приводит к образованию развитого рельефа поверхности (см. рис. 4, а). Сравнительно высокие импульсные термомеханические напряжения режима с критерием R повышенных тепловых воздействий вызывают появление участков с ультрадисперсным распределением закристаллизовавшейся жидкой фазы (см. рис. 4, б). На поверхности отмечается наличие частиц новых фаз (см. рис. 4, в), а в некоторых случаях очагов измельченной структуры (см. рис. 4, з). Увеличение числа проходов до трех приводит к появлению в структуре, кроме перечисленных выше особенностей, участков сдвигового и даже усталостного разрушения (см. рис. 4, д, е).

С увеличением длительности легирования с 1 до 4 мин подложки единичной площади (1 см²) на режимах с критерием R малых тепловых воздействий возрастает количество участков со следами скольжения материала (см. рис. 5, а). Жидкая фаза в некоторых местах покрывает предварительно разрушенные участки поверхности (см. рис. 5, б); увеличивается доля очагов закристаллизовавшейся жидкой фазы (см. рис. 5, в), участков измельченной структуры (см. рис. 5, з), участков хрупкого разрушения материала (см. рис. 5, д), появляются следы усталостного разрушения (см. рис. 5, е).

На грубых режимах с критерием R повышенных тепловых воздействий при ЭИЛ длительностью $t = 2$ мин, в месте контактного взаимодействия электродов формируется глубокая лунка, создавая местные напряжения, что, в свою очередь, приводит к появлению микротрещин. Структура измельчается, по границам зерен формируется каркас из частиц вновь образующихся фаз (см. рис. 6, а), участки первоначально образованной жидкой фазы оказываются разрушенными или наклепанными.

Увеличение длительности ЭИЛ единицы поверхности до 5 мин приводит к формированию развитого микрорельефа, образованию микротрещин в местах контактного взаимодействия. В микрообъемах отмечается появление опорных пятен искры (участков повышенной электропроводности) на вновь сформированной упрочненной поверхности (см. рис. 6, б), выделение участков новых фаз на поверхности зерен (см. рис. 6, в), участков общего измельчения структуры (см. рис. 6, г).

С увеличением длительности процесса ЭИЛ до $t = 8$ мин, наряду с отмеченными особенностями, наблюдается образование микротрещин в местах контактного взаимодействия двух фаз (см. рис. 6, е).

Дальнейшее нарастание длительности процесса ЭИЛ единичной площади до $t = 10$ мин увеличивает число и глубину микротрещин в структуре. Наряду с участками интенсивной эрозии появляются следы усталостного разрушения, большее число мест контактного взаимодействия; некоторые участки структуры разрушаются, отмечаются направленное перемещение масс материала, разбрызгивание и испарение продуктов эрозии.

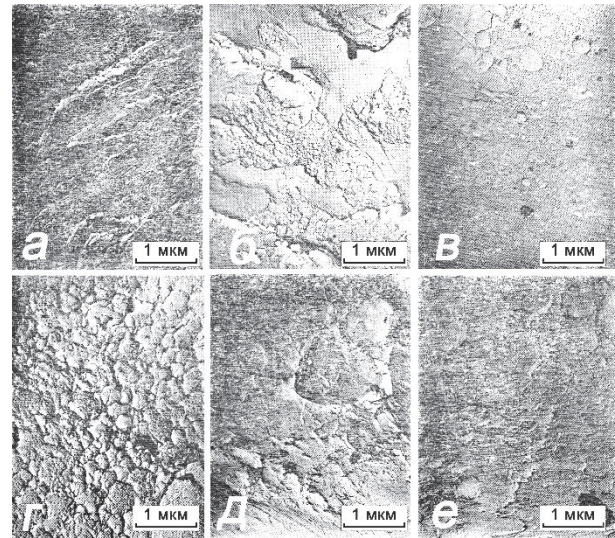


Рис. 5. Микроструктура поверхности сплава ВТ18, упрочненного алюминием на режиме с критерием R малых тепловых воздействий при длительности ЭИЛ: а, б – 1 мин; в, г – 2 мин; д – 3 мин; е – 4 мин

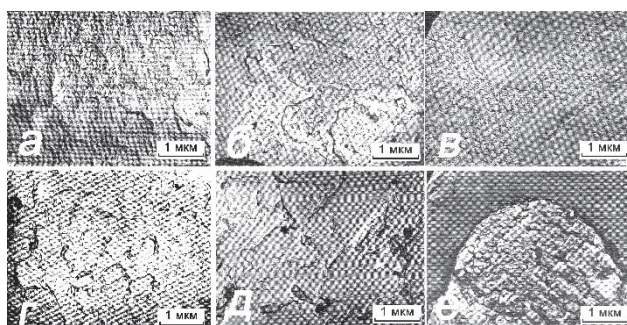


Рис. 6. Микроструктура поверхности упрочненного сплава Al/VT18 на режиме с критерием R повышенных тепловых воздействий и длительностью ЭИЛ: а, б – 2 мин; в, г, д – 5 мин; е – 8 мин

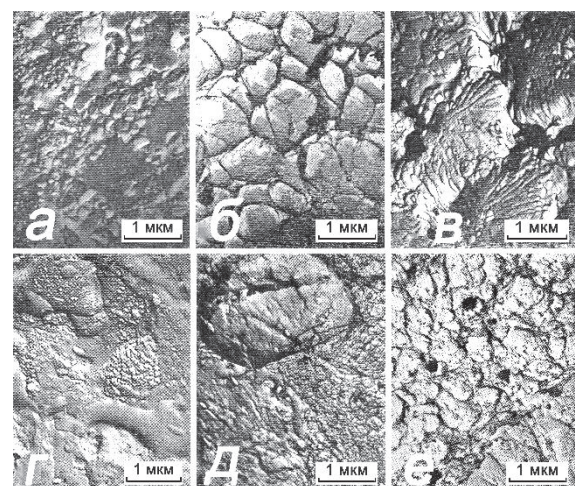


Рис. 7. Микроструктура поверхности упрочненного сплава Al/VT18 с критерием R повышенных тепловых воздействий и длительностью ЭИЛ: а, б, в – 12 мин; г, д, е – 14 мин

При длительности ЭИЛ $t = 12 - 14$ мин формируется глубокий рельеф (см. рис. 7, а), происходит отслаивание и вырыв частиц с поверхности упрочненного слоя (см. рис. 7, б), эффект усиливается вследствие воздействия термоудара и интенсивной эрозии границ зерен (см. рис. 7, в).

С увеличением длительности ЭИЛ до $t = 14$ мин заметно нарастают число и размеры частиц новых фаз (см. рис. 7, з); в некоторых участках формируется крупнозернистая структура (см. рис. 7, д); наблюдаются общее углубление и дифференциация поверхностного рельефа вследствие интенсивного испарения и перекристаллизации материала ЛС (см. рис. 7, е).

Анализируя модифицированные микроstructures легированных образцов, можно выделить ряд характерных участков поверхностей:

- места контактного взаимодействия электрода-инструмента (лунки, каверны);
- зоны местного термического воздействия (перегрев, измельчение структуры);
- зоны разрушения (термического, механического, усталостного и др.);
- зоны разбрызгивания жидкой фазы (капли);
- участки образования и выделения новых фаз;
- зоны попадания капель жидкой фазы на вновь сформированную поверхность;
- участки интенсивной эрозии границ зерен и поверхности материала;
- участки интенсивного испарения материала.

Следует отметить, что характер участков взаимодействия анода и катода, их структура и количество в процессе ЭИЛ периодически меняются как за счет разрушения отдельных участков под воздействием различного вида напряжений, механического и термического воздействия, так и при «залечивании» их новыми порциями жидкого материала.

На основании полученных результатов можно заключить, что изменение массы катода ВТ18 при ЭИЛ алюминием зависит в большей степени от критерия R и выбранной энергии искрового разряда, чем от времени обработки. Так, уже после двух-трех проходов электрода-инструмента на режиме с критерием R малых тепловых воздействий появляются микроучастки разрушения ЛС, количество которых с увеличением времени обработки изменяется в связи с вновь поступающей жидкой фазой с анода, а при времени обработки 2 – 3 мин – хрупкое разрушение, отслаивание или выкрашивание структуры ЛС, хотя общий привес образцов катода при этом возрастает. Напротив, при режимах с критерием R повышенных тепловых воздействий обработки количество участков разрушения превышает число участков «залечивания» и происходит стремительное разрушение ЛС, в результате которого вес катода становится ниже первоначального. Размеры контактных пятен электродов в исследованных поверхностях подложек после ЭИЛ на режиме с критерием R повышенных тепловых воздействий меньше по величине, чем при обработке на «мягком» режиме с критерием R малых тепловых воздействий, но их глубина значительно больше и степень образования микротрещин соответственно выше.

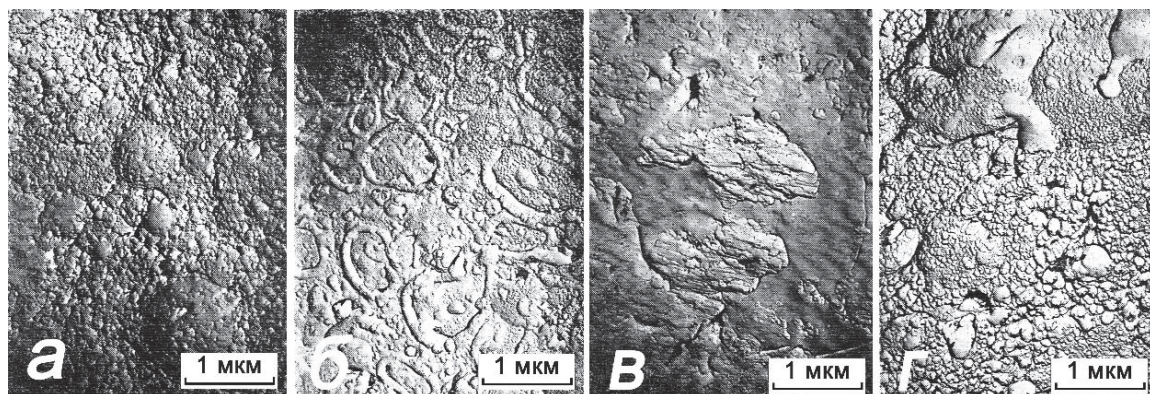


Рис. 8. Микроstructure поверхности электрода-инструмента (Al-анода) после трех проходов ЭИЛ Al/VT18 различных характерных участков а – г



В изменении микроструктуры поверхности электрода-инструмента из Al после ЭИЛ сплава Al/VT18 можно выделить следующие характерные этапы, скорость наступления которых находится в прямой зависимости от критерия R тепловых воздействий. В начале обработки отмечается появление контактных пятен, являющихся результатом искрового разряда и схватывания материалов анода и катода (см. рис. 8, а), участков разбрызгивания жидкой фазы (см. рис. 8, б), участков разрушения, в результате воздействия импульсных механических и термических нагрузок (см. рис. 8, в); значительное измельчение структуры и появление участков вторичного разрушения нанесенных слоев (см. рис. 8, г).

Выводы

1. Выявлены четыре характерные зависимости изменения массы катода при ЭИЛ от критерия теплового воздействия R и времени обработки единичной площади.
2. Электронно-микроскопическое исследование формирования ЛС при ЭИЛ Al/VT18 на режимах с критерием R малых и повышенных тепловых воздействий позволило установить 8 характерных участков микроструктуры, среди которых выделяются места контактного взаимодействия электродов в виде лунок, капель закристаллизовавшейся жидкости, участки хрупкого и усталостного разрушения.
3. Поверхность анода при ЭИЛ Al/VT18 характеризуется в основном четырьмя участками, зависящими от критерия R: оплавления, интенсивного испарения материала, с отсутствием блокировки рабочей поверхности электрода вторичными структурами и активной эрозией последних со следами контактного взаимодействия с материалом катода.
4. Длительность ЭИЛ Al/VT18 единичной площади (1 см^2) на режимах с критерием тепловых воздействий $R = 1,5 \text{ А/Дж}$ при энергии в импульсе $E = 3 \text{ Дж}$ должна быть не более 6 – 7 мин; соответственно при TiAl/VT18 – не более 2 – 3 мин.
5. При длительности 14 мин процесса ЭИЛ Al/VT18, TiAl/VT18, Ni₃Al/VT18 порог хрупкого разрушения (T_x) не достигнут на режимах с критерием $R > 33 \text{ А/Дж}$, а также с критерием $R = 1,5 \text{ А/Дж}$ при Ni₃Al/VT18, что означает непрерывный привес катода и соответствующее увеличение эрозии анода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Материаловедение: учеб. для высших технических заведений / Б. Н. Арзамасов, И. И. Сидорин, Г. Ф. Косолапов [и др.]; под ред. Б. Н. Арзамасова. – М.: Машиностроение, 1986. – 384 с.
2. Верхотуров, А. Д. Научные основы формирования легированного слоя и создания электродных материалов при электроискровом легировании: дис. ... д-ра техн. наук. – Киев: ИПМ НАНУ, 1984. – 542 с.
3. Горынин, И. В. Титан в машиностроении / И. В. Горынин, Б. Б. Чечулин. – М.: Машиностроение, 1990. – 400 с.
4. Электроискровое легирование металлических поверхностей / А. Е. Гитлевич, В. В. Михайлов, Н. Я. Парканский, В. М. Ревуцкий. – Кишинев: Штиинца, 1985. – 196 с.
5. Распределение элементов в поверхностных слоях при электроискровом легировании / Б. Р. Лазаренко, В. В. Михайлов, А. Е. Гитлевич [и др.] // Электронная обработка материалов. – 1977. – № 3. – С. 28-33.
6. Обеспечение надежности конструкций из титановых сплавов / В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, Б. И. Долотов [и др.]; под ред. В. И. Муравьева. – М.: Эком, 2009. – 752 с.
7. Солнцев, Ю. П. Материаловедение: учеб. для вузов / Ю. П. Солнцев, Е. И. Пряхин. – Изд. 3-е. – СПб.: Химиздат, 2004. – 736 с.



Козлита А. Н.
A. N. Kozlita

ВЫБОР ТЕХНОЛОГИИ НА ОСНОВЕ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРОЦЕССА

CHOICE OF TECHNOLOGY ON THE BASIS OF THE EXERGY ANALYSIS OF PROCESSES

Козлита Александр Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и аппараты химических производств» Комсомольского на Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); пр. Ленина, 27. 8(4217)24-11-34, E-mail: kanik2003@mail.ru
Mr. Alexandr. N. Kozlita – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering and Equipment for Chemical Industry; Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); + 7 (4217) 241134. E-mail: kanik2003@mail.ru

Аннотация. Проведен количественный эксергетический анализ процессов выделения нефтяных фракций из нефтяных отходов и шламов. Показана возможность получения методом деструктивной переработки высокоочищенных нефтяных фракций при сопоставимых энергетических затратах. Определена экологическая целесообразность применения метода коксования для рециклинга нефтепродуктов.

Summary. The paper presents the results of a quantitative exergy analysis of the process of extracting oil fractions from waste oil and sludge. I demonstrate that it is possible to obtain highly purified petroleum fractions by the method of destructive processing, with comparable energy costs. The environmental expediency of coking for the recycling of oil waste is established.

Ключевые слова: коксование нефтяных остатков, рециклинг, эксергетический анализ, нефтешламы, энергоэффективность.

Key words: coking of petroleum residua, recycling, exergy analysis, oil sludge, energy efficiency.

УДК 678.4:658.567

Эффективность производства продукта в значительной мере определяется его энергоемкостью. Существует несколько показателей, характеризующих этот параметр. Так, для энергоносителей таким показателем является индекс EROEI (Energy return of energy invested), определяющий соотношение энергии, затраченной на добычу, транспортировку и т. д., к полученной энергии продукта. Для несырьевых продуктов характеризующим энергоемкость показателем может служить так называемое топливное технологическое число (ТТЧ) [1]. Энергетическая эффективность технологического процесса достаточно хорошо может быть оценена по показателям эксергетического баланса. Под эксергией понимаем ту часть энергии, которая полностью может быть преобразована в другие ее виды, например в механическую работу. Соответственно «теряемая», вернее рассеиваемая в окружающую среду часть энергии, получила название анергии. Эксергетический подход имеет еще и то преимущество, что для анализа может быть выделена граничной поверхностью как вся система, так и ее часть, что позволяет выявлять те элементы, в которых происходят потери, именно эти элементы и требуют доработки. И еще одна особенность – эксергетические балансы в абсолютных величинах характеризуют конкретный аппарат или установку, баланс в относительных величинах характеризует технологический процесс. Рассмотрим технологическую установку (см. рис. 1) для переработки нефтесодержащих смесей, образующихся при ликвидации разливов нефти, очистке нефтяных резервуаров и т. п. Установка состоит из аппарата коксования (камеры) 1, холодильника 2, сепаратора 3 для разделения жидкой и газовой фаз, резерв-

ного факела 4 и накопительной емкости 5 для газообразных продуктов коксования. Аппарат коксования соответствует Патенту РФ на полезную модель № 114459. Именно он является и энергопроизводящим и энергопотребляющим звеном, для него соответственно и составляем эксергетический баланс в абсолютных величинах. Ограничиваем контрольной поверхностью по границе аппарата, за пределами которой – окружающая среда с температурой 20 °С.

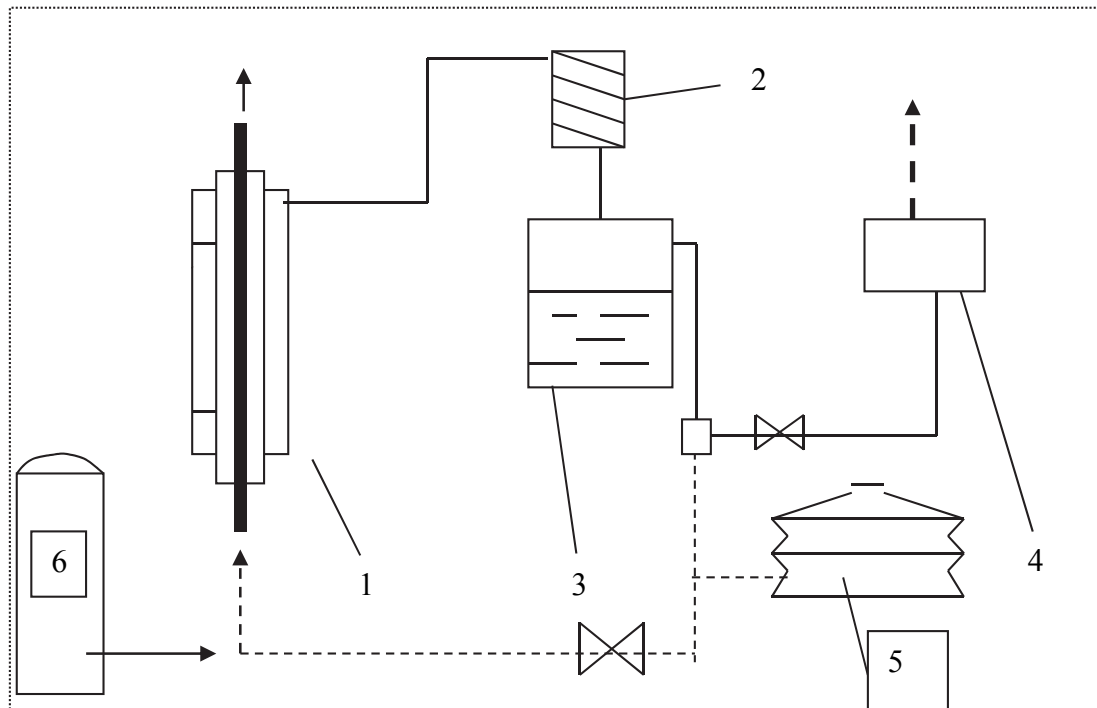


Рис. 1. Технологическая схема установки рециклинга нефтепродуктов

На входе через контрольную поверхность имеем сырьевую смесь, содержащую нефть с теплотой сгорания порядка 41 – 43 мДж/кг. Кроме нефти, при ликвидации разливов смесь может содержать минеральные грунты, умеренные включения полимеров, тканей, резины, бумаги, что не является препятствием для протекания процесса. При переработке продуктов очистки резервуаров балластом является минеральная составляющая с температурой окружающей среды. Процесс включает загрузку аппарата, нагрев до температуры 500 °С, получение жидкой и газовой фаз продуктов перегонки и коксования, разделяемых в сепараторе 3 (см. рис. 1), и выгрузку минерально-коксовой твердой фазы. Тогда на выходе из контрольной поверхности имеем:

- а) жидкие продукты перегонки и коксования (светлые фракции порядка 80 – 82 % от массы нефти);
- б) газообразные продукты в виде смеси углеводородов (порядка 14 – 15 % от массы нефти и до 95 % полимеров) и паров воды;
- в) минерально-коксовую смесь с температурой 500 °С;
- г) потери тепла с корпуса аппарата, при наличии современной тепловой изоляции они могут составлять около 5 % от выделившегося в аппарате тепла.

Схематически энергетические потоки представлены на рис. 2. Здесь 1 – химическая энергия (эксергия) сырья; 2 – тепло, необходимое для начала процессов перегонки и коксования, оно расходуется на нагрев не только сырья («полезная работа», эксергия), но и аппарата – эта часть энергии в последующем безвозвратно теряется, следовательно, этот поток – анергия, ее номер на схеме – 3.

Тогда уравнение эксергетического баланса будет иметь вид:

$$E_c + E = (E + A)_{ж} + (E + A)_{т} + (E + A)_{г} + A_k,$$

где E – эксергия; A – анергия; индексы: c – сырье, $ж$ – жидкая фаза, $т$ – твердая, $г$ – газообразная, $к$ – корпус аппарата. Уравнение характеризует конкретную установку с ее размерами, емкостью и производительностью.

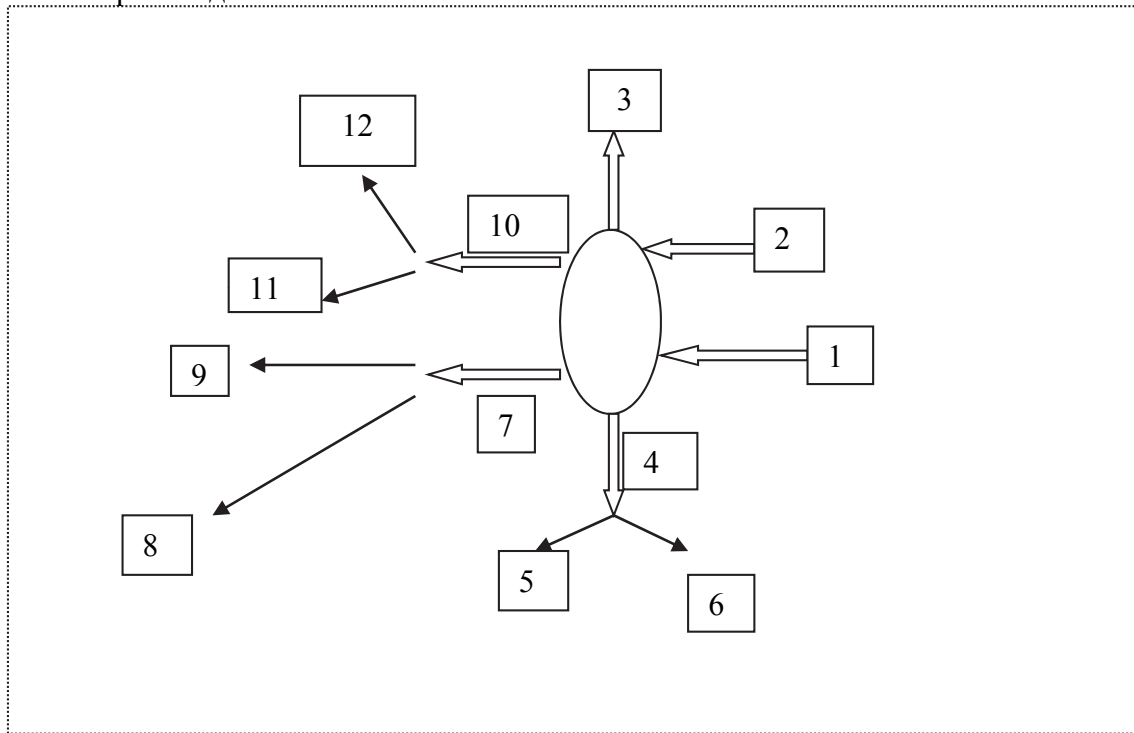


Рис. 2. Схема энергетических потоков

Переходя к удельным величинам, получаем эксергетический баланс технологического процесса:

$$e_c + a = (e + a)_{ж} + (e + a)_{т} + (e + a)_{г} + a_k.$$

Составляющие этого баланса рассмотрим поэлементно.

e_c – химическая эксергия сырья с коэффициентом 1,03, ее принято принимать как теплоту сгорания вещества. Для нефти низшая теплота сгорания составляет 41 – 43 кДж/кг, для каучука – 44,7, для полиэтилена – 47,14, бумага – 13,4.

a – энергия, необходимая для процессов перегонки и коксования. Она складывается из процессов нагрева сырья, частичного испарения, нагрева до точки коксования. Кроме сырья происходит нагрев аппарата. Эту составляющую при периодическом процессе так же необходимо учитывать. Теплоемкость стали известна – 0,5 кДж/(кг·К). Соотношение веса аппарата и загружаемого в него сырья можно определить по родственному технологическому процессу – замедленному коксованию. Аппарат УЗК (камера коксования) при собственной массе 250 т имеет загрузку сырья 800 т. Следовательно, на 1 кг сырья имеем 0,3125 кг массы аппарата. Тогда затраты на его нагрев до 500 °С от исходной температуры, в удельных величинах составят 75 кДж/кг по сырью. Затраты тепла на перегонку до температур порядка 360 – 380 °С могут быть определены по данным [1], это 0,136 кг условного топлива, т.е. 4 мДж/кг. Нагрев гудрона от 380 до 500 °С требует еще 300 кДж/кг. Таким образом, в сумме на входе в аппарат «а» должна быть 4,375 мДж на 1 кг сырья.

Распределение твердой, жидкой и газовой фаз на выходе из аппарата было определено по экспериментальным данным [2], полученным для процесса термоллиза в непрерывном



процессе. Газовые фракции составляют около 20 %, коксовый остаток – 10 %, остальное – жидкие дистилляты. Состав газовой фазы близок к сжиженным и попутным газам, их теплота сгорания составляет 35 – 40 мДж/кг. Следовательно, на килограмм сырья их химическая эксергия (поток 5 по рис. 2) составляет 7 – 8 мДж. Даже при самых скромных показателях КПД сжигающего устройства этого вполне достаточно для автотермичности процесса. Сложность только в том, что есть временное несовпадение потребности в подводе тепла и выделении газового топлива. Конструктивно это противоречие разрешается при помощи стартового запаса газа (позиция 6 по рис. 1), накопительной емкости 5 и батарейного принципа работы нескольких аппаратов, когда газы из ранее запущенного в работу аппарата идут на разогрев последующего. Физическое тепло газовой фазы (поток 6) должно и может быть хотя бы частично рекуперировано, но это требует дополнительных конструктивных решений. В принятой схеме этот поток – анергия, тепло уходит в окружающую среду.

Энергия жидкой фазы (поток 7) разделяется на химическую эксергию светлых углеводородных дистиллятов (поток 8) и их физическое тепло (поток 9), которое «теряется» при охлаждении и конденсации, следовательно, это анергия, но при наличии устройств рекуперации, по крайней мере, часть ее может быть использована и переведена в эксергию. Охлаждение потока паров требуется для их конденсации и разделения с газами, процесс неизбежно необходимый, совмещение его с циркуляцией теплоносителя – резерв повышения энергетической эффективности процесса в целом. Отдельно следует остановиться на воде, которая может присутствовать в исходном сырье. Допустимое, с точки зрения автотермичности процесса содержание может быть определено из разницы между потоками 2 и 5, которая в нашем случае составляет около 2,5 мДж. Приняв теплоемкость воды 4,187 кДж/(кг·К), теплоту парообразования 2256 кДж/кг, с учетом КПД процесса теплопередачи, запас по перегреву пара, получаем, что допустимая обводненность исходного сырья – 25 – 30 %. Допустимая означает, что только за счет сжигания «собственных» газов процесс будет автотермичным. Больше содержание воды не является препятствием для протекания процесса, но требует больших затрат энергии, источником которой могут быть жидкие нефтяные фракции процесса либо внешний энергоноситель.

Твердая фаза (поток 10) состоит из химической эксергии коксового остатка, с теплотой сгорания около 30 мДж/кг (поток 11) и физического тепла 12, очевидно безвозвратно рассеиваемого при выгрузке из аппарата. При пересчете на исходное сырье эти потери составят около 40 кДж/кг.

Рассмотрим второй процесс переработки нефтешламов – дренирование. Процесс достаточно хорошо известен и широко используется. Технология заключается в одно- или многоступенчатом (в зависимости от числа аппаратов) отстаивании водно-нефтяной эмульсии, образующейся в процессе циркуляции горячей воды и шлама, после дезинтеграции последнего. Процесс периодический.

Воспользуемся тем же методом эксергетических потоков. На входе имеем материальные потоки воды и шлама с температурой окружающей среды, и, как следствие – практически нулевой тепловой эксергией, т.к. за точку отсчета берется температура окружающей среды. Второй входящий поток – энергетический, источником которого является паровой подогреватель. Если перейти сразу к удельным величинам, то количество тепла, необходимое для переработки 1 кг шлама, будет складываться из необходимости нагрева как самого шлама, так и воды до температуры 80 – 90 °С. Расчет показывает, что теплоемкость шлама составляет около 1,76 кДж/(кг·К) при содержании минеральной составляющей 10 %. Тогда при однократной и одноступенчатой обработке, при соотношении вода-шлам 1:1, подводимый тепловой поток составит 475,8 кДж на 1 кг шлама. Обводненность шлама 50 % близка к нормально исходной. При многократном дренировании (а это практически делается для снижения содержания нефтепродукта в остаточном продукте) и при многоступенчатой обработке соотношение вода – шлам может достигать 5 - 8 и более. При соотношении 1:5 количество необходимо подводимого тепла составляет 2,4 мДж/кг. Следует учесть потери тепла с корпуса



аппарата и трубопроводов, КПД паропроизводящего устройства, расходующего топливо, теплоту испарения низкокипящих компонентов нефти, затраты электроэнергии на работу дезинтегратора. В итоге получаем значение подводимого эксергетического потока практически близкое с подводимым эксергетическим потоком при коксовании. Принципиально важным является то, что на выходе из установки дренирования, помимо воды, требующей доочистки, имеем минерально-углеводородную смесь, которую необходимо дополнительно перерабатывать биологическими или иными методами, т.е. хоть и не в явном виде, требуются дополнительные потоки энергии. Ну и основной эксергетический поток на выходе – нефтяные фракции. От первоначального состава нефти получаемый продукт отличается минимальным содержанием фракций до 90 °С и плохо образующих эмульсию с водой более тяжелых фракций. В российских нефтях содержание фракций 90 °С может достигать 12,5 %, остатка – до 40. В результате процент «извлечения» при дренировании лежит в интервале 70 – 80 %. Получаемый продукт, как правило, подлежит разбавлению свежей нефтью для возможности его переработки.

Подводя итог, можно констатировать, что процессы дренирования и коксования нефтесодержащих смесей близки по энергетическим затратам и полученной в результате энергии углеводородов. Однако при коксовании получаемые углеводороды имеют высокую степень очистки, что позволяет их использовать без дополнительной переработки.

Сравнительный анализ процессов коксования и сжигания нефтеотходов был проведен в работе [3], было показано, что даже по первоначальным затратам энергии эти процессы, как ни удивительно, тоже близки. А вот по конечному выходу различие кардинальное – в первом случае до 90 % возврата нефтяных фракций, во втором – полная, безвозвратная потеря имевшейся в сырье энергии.

Еще одной альтернативой при переработке нефтешламов является биологическое их разложение. Способ имеет ряд преимуществ, но есть и ограничения:

- 1) длительность процесса, большое время технологического цикла, настолько большое, что возникает вопрос фактического хранения нефтеотходов;
- 2) ограничение по температурному режиму окружающей среды, в которой бактерии могут «работать»;
- 3) с энергетической точки зрения биологическое разложение сродни сжиганию – вся возможно извлекаемая энергия теряется безвозвратно, рассеивается и энергия, затрачиваемая на производство биологического реагента, т.е. можно сказать, что процесс полностью анергичен.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лисиенко, В. Г. Топливо, рациональное сжигание, управление и технологическое использование / В. Г. Лисиенко. – М.: Теплотехника, 2003. Кн. 1. – С. 266.
2. Пауков, А. Н. Разработка технологии переработки нефтяных шламов, промышленных и бытовых отходов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Пауков Алексей Николаевич. – Уфа, 2010. – С. 9.
3. Козлита, А. Н. Утилизация углеводородных материалов методом коксования / А. Н. Козлита, В. А. Устинов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2010. – № 1-1(1). – С. 126-128.

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

АЛГОРИТМЫ И МОДЕЛИ ПРИ ЧИСЛЕННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ КОМПОЗИТНЫХ СРЕД НА ЗАДАННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЛЯ МОРСКИХ СООРУЖЕНИЙ

ALGORITHMS AND MODELS USED IN COMPUTER-AIDED ENGINEERING OF COMPOSITE MEDIA WITH SPECIFIED CHARACTERISTICS FOR MARINE STRUCTURES



Тарануха Николай Алексеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой кораблестроения Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; 7 (4217) 54-30-74. E-mail: taranukha@knastu.ru.

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



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

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

Аннотация. В работе говорится о многообразии композитных материалов, трудностях при проектировании композитных сред на заданные характеристики. В качестве примера композитного материала для морских сооружений взят железобетон. Приведен фрагмент кода программы и блок-схема, содержащая в себе основные процедуры при проектировании производственного состава бетона. Описаны правила закладки арматуры в бетон для совместной работы бетонной и армирующей сред.

Summary. This paper considers the variety of composite materials and the difficulties faced during the engineering of composite media with specified characteristics. Reinforced concrete is taken as an example of a composite material for off-shore facilities. We provide a piece of computer code and a flow-chart containing all the basic procedures of engineering the composition of concrete to be used for its manufacture. We describe the rules of placing reinforcement into the concrete in order to ensure the best interaction between the concrete and the reinforcement elements of the end product.

Ключевые слова: композит, алгоритм, блок-схема, проектирование, физико-механические характеристики, прочность, автоматизация, армирующая среда.

Key words: composite, algorithm, flow-chart, engineering, physical and mechanical properties, strength, automation, reinforcing elements.

УДК 519.711.3

Введение

Технология изготовления композитов и изделий из них является одним из наиболее перспективных направлений развития современной науки. Изделия из этих материалов широко применяются в строительстве, современных отраслях автомобилестроения и авиаци-



онной промышленности, при постройке морских сооружений. Композиционный материал – конструкционный (металлический или неметаллический) материал, в котором имеются усиливающие его элементы в виде нитей, волокон или хлопьев более прочного материала. Примеры композиционных материалов: пластик, армированный борными, углеродными, стеклянными волокнами, жгутами или тканями на их основе; алюминий, армированный нитями стали, бериллия. Комбинируя объемное содержание компонентов, можно получать композиционные материалы с требуемыми значениями прочности, жаропрочности, модуля упругости, абразивной стойкости, а также создавать композиции с необходимыми магнитными, диэлектрическими, радиопоглощающими и другими специальными свойствами [3]. Также существуют композиты из нестандартизированного материала [6 – 10].

В данной статье пойдет речь о процедурах и моделях при проектировании заданных характеристик железобетона – композитного материала, сочетающего в себе совместную работу бетона и стальной арматуры. Бетон является истинным композитом и состоит из гравия и песка, которые связаны между собой при помощи цементного теста, полученного из цемента и воды. При этом для усиления прочности бетона обычно добавляется металлическая арматура. Бетон великолепно ведет себя при нагрузках на сжатие, но при растяжении становится хрупким и непрочным. Предел прочности бетона при растяжении меньше предела прочности при сжатии в 10-20 раз. Растягивающие напряжения, как и усадка бетона во время отверждения, приводят к появлению трещин, в которые попадает вода. Это в свою очередь приводит к коррозии металлической арматуры, ее разрушению и существенной потере целостности бетона. Многообразие конструкций и технологий, различных классов бетона и характеристик бетонной смеси и исходных материалов диктует необходимость постоянных разработок в отношении его состава, чтобы сделать бетон более стойким к различным внешним воздействиям и нагрузкам, что позволит обеспечить его длительное функционирование.

Для решения этой задачи и получения бетона с заданными характеристиками необходимо проектировать состав бетона, то есть подбирать составные компоненты бетонной смеси и их количество. Данные исследования содержатся в трудах Л. И. Дворкина, Ю. М. Баженова, В. П. Сизова и других авторов [1; 4; 5]. Однако предварительный подбор состава сопряжен с определенными трудностями, связанными с разнообразием видов цемента, мелкого и крупного заполнителей, а также добавок для бетона.

Численный подход к проектированию двухсредного материала с заданными характеристиками

Как уже было сказано, в качестве примера для проектирования заданных характеристик композитной среды был взят железобетон. Наиболее разработанными и реализуемыми на практике являются двухпараметрические задачи, когда нормируемым свойством бетона является его прочность при сжатии $R_{сж}$, а бетонной смеси – показатель удобоукладываемости (подвижность или жесткость) [4]. Прочность на сжатие определяет класс бетона. Классы бетона по прочности на растяжения и изгиб определяются из прочности на сжатие. По мнению Ю. М. Баженова, прочность бетона в определенный срок при твердении в нормальных условиях зависит от водоцементного отношения [1]. При решении двухпараметрических задач для тяжелых бетонов последовательно определяют значения цементно-водного отношения, расход воды с учетом требуемой подвижности или жесткости бетонной смеси, расход цемента и заполнителей. При этом используется допущение о том, что бетонная смесь складывается из абсолютных объемов всех ее составляющих.

На рис. 1 показана зависимость прочности бетона в возрасте 28 сут от отношения Ц/В и марки цемента. Графикам под цифрами 1, 2, 3 и 4 соответствуют марки цемента 300, 400, 500, 600.

Ниже приведены некоторые фрагменты процедур и функций кода программы [2], реализованной на платформе Borland Delphi 7 языка программирования Object Pascal, содержащие алгоритмы для проектирования состава тяжелого бетона.

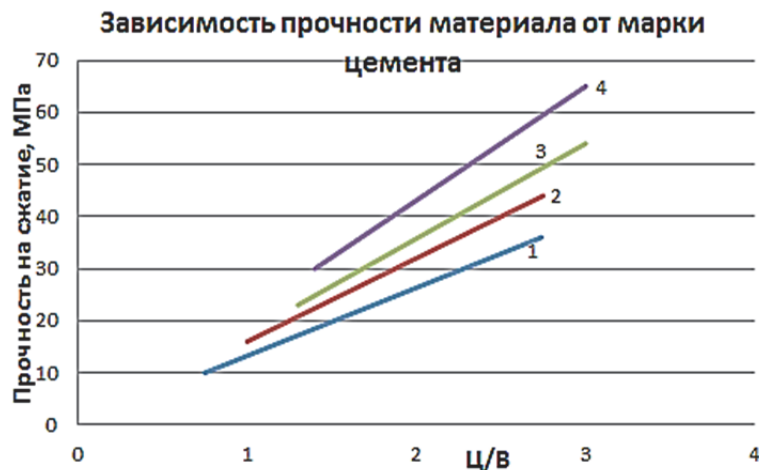


Рис. 1. Зависимость прочности бетона в возрасте 28 сут от отношения Ц/В и марки цемента

Определяется отношение В/Ц в зависимости от требуемой прочности, срока и условия твердения бетона. Для обычного бетона $V/C > 0,4$

$$\frac{B}{C} = \frac{A * R_{ц}}{R_{б} + A * 0,5R_{ц}}$$

где $R_{б}$ – требуемая прочность при сжатии; $R_{ц}$ – активность цемента; A – коэффициент качества заполнителей.

```
function TForm1.VC(A, Rc, Rb: real): real;
begin
.....
VC:=Round(100*(A*Rc)/(Rb+0.5*A*Rc))/100;
```

Уточняется количество воды для бетонной смеси из таблиц [1].

```
function TForm1.V(NGCT, Mkr, V1: real): real;
begin
....
Mkr:=strToFloat(Edit13.Text);
V:=(NGCT-27)*4-(Mkr-2)*8+V1;
```

Находят расход цемента:

$$C = B / \frac{B}{C}$$

где B – количество воды на кубический метр смеси.

```
function TForm1.Cem(Voda, k: real): real;
begin
Cem:=Round(Voda/k);
end;
```

Определяют расход заполнителя:

$$\Pi = \frac{1000}{\alpha \frac{v_{\text{пус.щ}}}{\gamma_{\text{щ}}^{\text{H}}} + \frac{1}{\rho_{\text{щ}}}},$$

где Π – расход крупного заполнителя $\text{кг}/\text{м}^3$; $\rho_{\text{щ}}$ – плотность крупного заполнителя; $v_{\text{пус.щ}}$ – межзерновая пустотность крупного заполнителя в относительных единицах; α – коэффициент раздвижки зерен крупного заполнителя раствором; $\gamma_{\text{щ}}^{\text{H}}$ – средняя насыпная плотность крупного заполнителя.

```
function TForm1.S(alfa, Psh, Ys: real): real;
```

```
begin
```

```
.....
```

```
S:=round((1000/(alfa*(1-Ys/Psh)/Ys+1/Psh))*10)/10;
```

```
end;
```

Определяем расход песка по формуле

$$\Pi = \left(1000 - \left(\frac{\Pi}{\rho_{\text{ц}}} + B + \frac{\Pi}{\rho_{\text{щ}}} \right) \right) \rho_{\text{п}}$$

где $\rho_{\text{ц}}$, $\rho_{\text{щ}}$, $\rho_{\text{п}}$ – соответственно плотность цемента, щебня и песка; Π – расход цемента; B – расход воды; Π – расход крупного заполнителя.

```
function TForm1.Pesok(a, C, Voda, Psh, Pc, Pp: real): real;
```

```
begin
```

```
.....
```

```
Pesok:=Round(((1000-(C/Pc+Voda+a/Psh))*Pp)*10)/10;
```

```
end;
```

На рис. 2 приведена часть блок-схемы, реализующая полный алгоритм проектирования состава тяжелого бетона с заданными характеристиками.

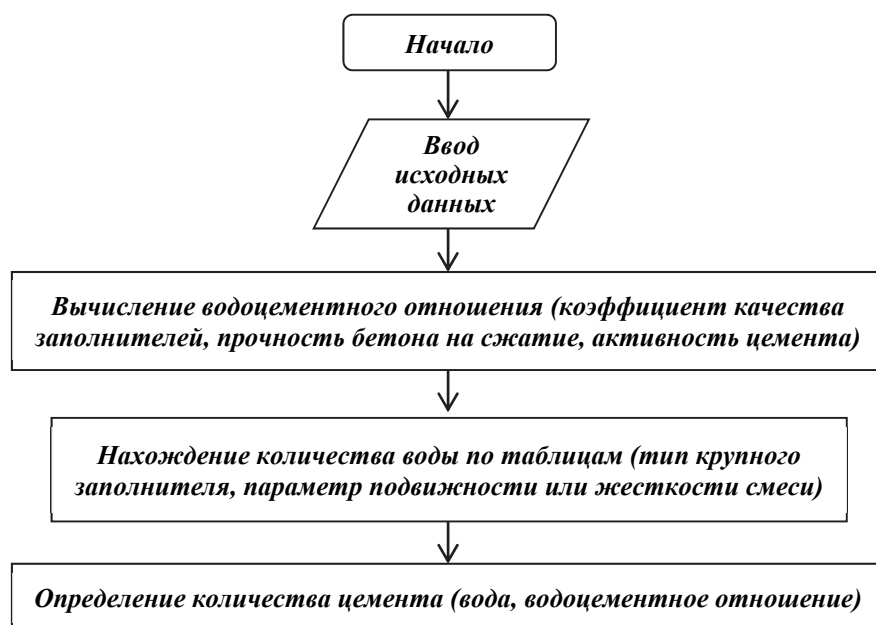


Рис. 2. Определение количества цемента и воды

На рис. 3 показан дальнейший ход вычислений, в результате которого находят также количество песка и щебня на кубический метр бетонной смеси.

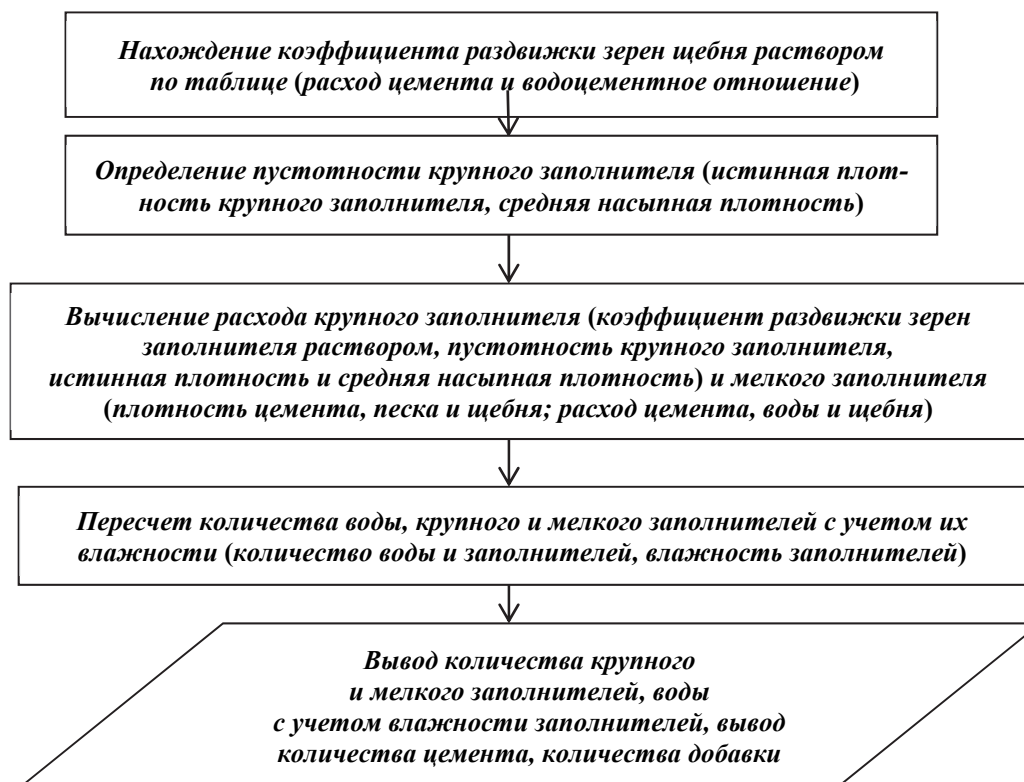


Рис. 3. Вычисление производственного состава бетона

Данный алгоритм позволяет получить тяжелый бетон заданной прочности на основе составных компонентов и свойств бетонной смеси и материалов.

Обеспечение взаимодействия двух сред композитного материала в строительных конструкциях

После проектирования материала с заданными прочностными и другими характеристиками выполняется подбор армирующей среды. Арматура подразделяется на рабочую, распределительную и монтажную. Изготавливают арматуру из стали различных марок и видов. Применение того или иного вида арматурной стали в железобетонных конструкциях устанавливается проектом.

При закладке арматуры в бетон необходимо выдерживать вокруг стержней проектные размеры защитного слоя бетона, который предохраняет их от коррозии. Толщину защитного слоя бетона назначают в зависимости от вида конструкции и диаметра арматуры, а также условий, в которых будет находиться железобетон. Например, в плитах и стенках толщиной более 100 мм величина защитного слоя бетона должна быть не менее 15 мм; в балках и колоннах – 20-30 мм, а в фундаментах, бетонируемых при отсутствии подготовки, нижняя арматура должна иметь защитный слой бетона толщиной 70 мм.

Арматуру балок можно собирать из сварных каркасов, частей каркаса или отдельных стержней. При большой массе каркаса его подают в опалубку краном. Каркасы балок из отдельных стержней связывают на козелках над опалубкой.

Установка арматуры плит и сеток заключается в большинстве случаев в укладке готовых сварных сеток. При армировании конструкции отдельными стержнями на опалубке размечают мелом места расположения стержней рабочей и распределительной арматуры, после чего укладывают стержни арматуры и перевязывают их пересечения. По ней раскладывают



стержни верхней арматуры. Их связывают в сетку, поднимают на легкие стальные подставки, устанавливаемые через каждые 75-100 см, и крепят к ним. Подставки делают такой высоты, чтобы обеспечить проектное расстояние между нижней и верхней сетками арматуры плиты. Для создания защитного слоя под узлы сетки, укладываемой на опалубку, подкладывают бетонные плитки. Установленные арматурные конструкции перед бетонированием должны быть проверены и приняты по акту.

Заключение

Проектирование композитных сред на заданные механические характеристики – сложный и трудоемкий процесс, требующий дальнейшего изучения и автоматизации. В этом можно убедиться на примере проектирования железобетонных конструкций, где трудности заключаются как в правильном подборе состава бетона на основе вида и условий работы конструкции, так и в подборе армирующей среды, дополнительно увеличивающей прочность конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баженов, Ю. М. Способы определения состава бетона различных видов / Ю. М. Баженов. – М.: Стройиздат, 1975. – 268 с.
2. Васильев, А. С. Программное обеспечение для расчета состава тяжелого бетона (ПО «Программа проектирования состава тяжелого бетона с противоморозными добавками») / А. С. Васильев, Е. В. Гулимова, О. Е. Сысоев // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. № 2014615126. 2014.
3. Васильев, В. В. Механика конструкций из композиционных материалов / В. В. Васильев. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.
4. Дворкин, Л. И. Оптимальное проектирование составов бетона / Л. И. Дворкин. – Львов: Вища школа, 1981. – 202 с.
5. Сизов, В. П. Проектирование составов тяжелого бетона / В. П. Сизов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1979. – 144 с.
6. Математическая модель шарнирной стержневой системы с большими перемещениями / Н. А. Тарануха, К. В. Жеребко, А. Н. Петрова, М. Р. Петров // Известия вузов: Строительство. – 2003. – № 3 (531). – С. 12-18.
7. Тарануха, Н. А. Программно-информационное обеспечение задачи о колебаниях стержня с большими деформациями / Н. А. Тарануха, А. Н. Петрова, Н. Н. Любушкина // Информатика и системы управления. – 2007. – № 2 (14). – С. 30-39.
8. Тарануха, Н. А. Колебания динамических систем с большими деформациями из нестандартизованного материала / Н. А. Тарануха, А. Н. Петрова, Н. Н. Любушкина // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2010. – № III-1(3). – С. 4-11.
9. Тарануха, Н. А. Определение жесткостной характеристики нестандартизованного материала упругой связи динамической системы / Н. А. Тарануха, А. Н. Петрова, Н. Н. Любушкина // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2010. – № IV-1(4). – С. 4-11.
10. Тарануха, Н. А. Математическая модель деформирования упругой связи из нестандартизованного материала для динамической системы с большими деформациями / Н. А. Тарануха, А. Н. Петрова, Н. Н. Любушкина // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № I-1(5). – С. 4-9.

Панкратьев П. С., Шакиров В. А.
P. S. Pankratyev, V. A. Shakirov

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ДВУХУРОВНЕВЫЙ ПОДХОД К ПРОБЛЕМЕ ВЫБОРА ПУНКТА СТРОИТЕЛЬСТВА ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

THE MULTIPLE ATTRIBUTE TWO-LEVEL APPROACH TO THE PROBLEM OF CHOOSING A SITE FOR THE CONSTRUCTION OF A HYDROELECTRIC POWER STATION



Панкратьев Павел Сергеевич – аспирант кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Братского государственного университета (Россия, Братск); 665710, Иркутская обл., г. Братск, пер. Новый, д. 4, кв. 60. E-mail: scud33@inbox.ru.

Mr. Pavel S. Pankratyev – PhD Candidate, Department of Power Engineering and Electric Engineering, Bratsk State University (Russia, Bratsk); 4-60, Novy Pereulok Str., Bratsk, Irkutsk Region, 665710. E-mail: scud33@inbox.ru.



Шакиров Владислав Альбертович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика и электротехника» Братского государственного университета (Россия, Братск); 665727, Иркутская обл., г. Братск, ул. Крупской, д. 25, кв. 65. E-mail: mynovember@mail.ru.

Mr. Vladislav A. Shakirov – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Power Engineering and Electric Engineering, Bratsk State University (Russia, Bratsk); 25-65, Krupskoy Str., Bratsk, Irkutsk Region, 665710. E-mail: mynovember@mail.ru.

Аннотация. Формализуется проблема выбора места строительства гидроэлектростанции с двумя уровнями альтернатив – пунктами строительства и вариантами станций. Формулируются требования к методам анализа альтернатив на двух уровнях. Предлагается методика решения задачи в такой постановке. Проводится выбор пункта строительства гидроэлектростанции на реке Индигирке.

Summary. The paper tries to formalize the problem of choosing a construction site for a hydroelectric power station, with two levels of alternatives – 1) place of construction 2) type of power station. We lay down requirements for the methods of what-if analysis at both levels. We propose a technique of solving the problem whose statement is formulated in this way. We make a choice of a place for the construction site of a power station on the Indigirka River.

Ключевые слова: многокритериальный анализ, теория полезности, метод анализа иерархий, размещение гидроэлектростанции.

Key words: multiple attribute analysis, utility theory, hierarchy analysis procedure, siting of hydroelectric station.

УДК 303.732.4;519.81

Введение

При размещении гидроэлектростанции (ГЭС) для каждого альтернативного пункта строительства должно быть намечено несколько уровней водохранилища, в ходе детальных многофакторных технико-экономических расчетов определен лучший вариант ГЭС.

Можно отметить два направления совершенствования процесса принятия решений по размещению ГЭС. Во-первых, целесообразно снизить сложность процесса, на предваритель-

ной стадии исключив из рассмотрения неперспективные пункты. Важно при этом использовать показатели, расчет которых не столь трудоемок, а также косвенные показатели. Во-вторых, существующее методическое обеспечение процесса размещения ГЭС во главу угла ставит экономическую эффективность при учете технических, экологических, социальных и других факторов в виде ограничений. Однако практика проектирования и строительства ГЭС показала, что экологические и социальные факторы могут иметь решающее значение. Поэтому предлагается построить процесс принятия решений на основе методов многокритериального анализа. Выбор этими методами осуществляется с позиций всех критериев, относительную важность которых устанавливают в ходе специальных диалоговых процедур с лицом, принимающим решение (ЛПР).

Постановка задачи

Предлагается рассмотреть процесс выбора пункта размещения в двух аспектах. С одной стороны, пункты сравниваются по условиям строительства, социальным, экологическим и экономическим последствиям в зоне строительства, перспективам развития. С другой стороны, каждый пункт позволяет реализовать различные проекты ГЭС. Так, одним из определяющих параметров ГЭС можно считать нормальный подпорный уровень (НПУ) водохранилища, который определяет площадь затопления, мощность станции, капитальные вложения и другие параметры. Предлагается проводить выбор пункта в разрезе описанных двух аспектов. Будем рассматривать две группы альтернатив: альтернативы первого уровня (АПУ) – пункты строительства и альтернативы второго уровня (АВУ) – варианты ГЭС (см. рис. 1).

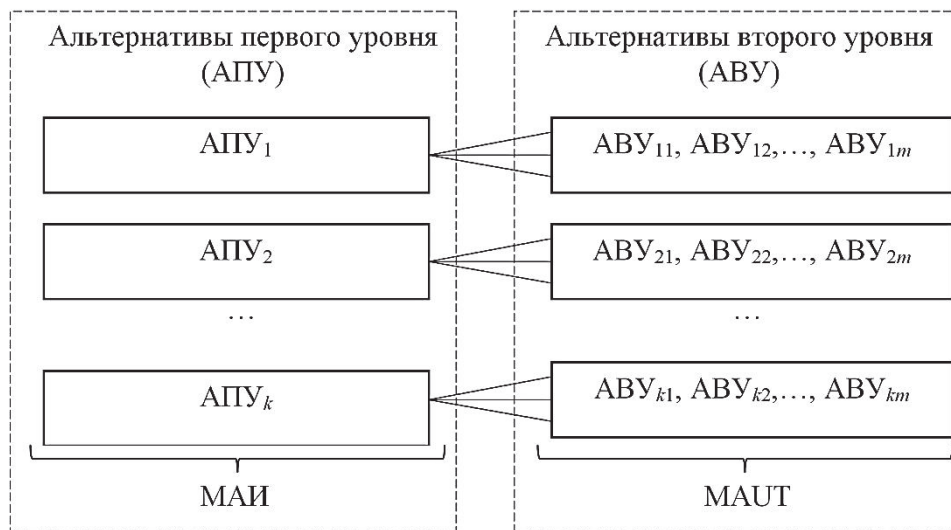


Рис. 1. Структура проблемы выбора пункта для строительства ГЭС

Задачу можно сформулировать следующим образом. Пусть $A = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}$ – множество альтернатив первого уровня, которые оцениваются по множеству критериев $F = F_1 \cup G$. Подмножество критериев $F_1 = \{f_1, f_2, \dots, f_s\}$ служит для оценки альтернатив только первого уровня, подмножество критериев $G = \{g_1, g_2, \dots, g_p\}$ – для оценки альтернатив и первого, и второго уровней. Каждому элементу a_i множества A ставится в соответствие множество возможных альтернатив второго уровня $B_i = \{b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{im}\}$. Необходимо упорядочить по предпочтению альтернативы множества A с учетом многокритериальных оценок альтернатив множеств B_i .

Особенностью задачи является то, что выбор лучших АВУ, лучшей АПУ не может быть эффективно осуществлен использованием одного метода многокритериального анализа. Связано это со следующими обстоятельствами.

АВУ характеризуются критериями, по которым может быть дана количественная оценка – мощность ГЭС, стоимость ГЭС, площадь затопления и т.д. Количество альтернатив

потенциально не ограничено. Соответственно, необходим метод, позволяющий проводить многокритериальную оценку в условиях большого количества альтернатив по критериям с количественным описанием. Этим требованиям отвечает метод многокритериальной теории полезности (Multi-attribute utility theory (MAUT)). Данный метод широко применялся на практике [2].

АПУ также характеризуются количественными критериями (например, сейсмичность в районе строительства), но в большей степени для описания альтернатив привлекаются критерии, по которым может быть дано только качественное описание, например, перспективы развития в районе, условия строительства, воздействие на ихтиофауну в результате строительства ГЭС. Количество возможных пунктов для сравнения, как правило, не превышает десяти, так как в любом районе ограничено число мест возможного строительства. Метод, позволяющий эффективно проводить оценку и сравнение в таких условиях – метод анализа иерархий (МАИ). МАИ также применялся при решении важных практических задач [5].

Таким образом, предлагается следующий подход к проблеме выбора пункта строительства ГЭС. На первом этапе с помощью картографических материалов намечаются пункты (АПУ), в каждом из которых проводятся водно-энергетические расчеты и определяются диапазоны возможных НПУ (АВУ). На втором этапе формируется иерархия целей и критериев с разделением их на две группы – F_1 и G . На третьем этапе для каждого пункта по критериям множества G методом MAUT выбирается лучшая АВУ. На четвертом этапе пункты сравниваются методом анализа иерархий в предположении, что именно лучшая АВУ будет реализована в каждом пункте. При сравнении пунктов используются критерии F_1 и G .

Многокритериальный двухуровневый выбор пункта строительства ГЭС на реке Индигирке в республике Саха (Якутия)

Рассмотрим предлагаемый подход к многокритериальному выбору наиболее перспективного пункта ГЭС на примере реки Индигирки, протекающей на севере республики Саха (Якутия). Ситуационный план района представлен на рис. 2.

В исследовании будет рассмотрен участок реки, расположенный в перспективных для развития Момском и Оймяконском улусах. Достаточно благоприятные гидрологические условия района, сосредоточение месторождений золота, сурьмы, вольфрама, каменного угля позволяют провести анализ нескольких вариантов строительства ГЭС. Для Индигирки уже проводились исследования возможности строительства ГЭС, были намечены возможные пункты [3]. В исследовании для сравнения выбраны пункты Тосканской ГЭС (П2) и Большегорской ГЭС (П5) [3], а также три дополнительных пункта (П1, П3, П4) в связи со следующими перспективами.

Пункт П1 намечен вблизи поселка Хонуу, расположенного в устье реки Момы. Перспективу поселка определяет стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г., утвержденная распоряжением правительства РФ от 17 июня 2008 г. № 877-р, в соответствии с которой запланировано строительство стратегической железнодорожной линии Якутск – Мома – Магадан. Кроме того, от поселка Хонуу Индигирка судоходна. В перспективе поселок может стать крупным транспортным узлом.



Рис. 2. Ситуационный план



Пункт П4 намечен вблизи поселка городского типа Усть-Нера, расположенного вблизи богатейших месторождений золота, сурьмы, вольфрама. Через поселок проходит федеральная автомобильная дорога М56 «Колыма», связывающая Якутск и Магадан.

Пункт П3 намечен вблизи поселка городского типа Предпорожный, упраздненного в 2007 г. Вблизи сосредоточены месторождения золота, угля. Расположение между поселками Хонуу и Усть-Нера позволяет влиять на развитие двух районов.

Для каждого пункта были проведены водно-энергетические расчеты, целью которых было определение возможных площадей затопления, гарантированной выработки электроэнергии и среднесуточной мощности ГЭС. Последовательность расчетов приведена на рис. 3.



Рис. 3. Последовательность водно-энергетических расчетов

Содержание расчетов и промежуточные результаты представлены в [4]. Итоговые результаты, необходимые для дальнейшего анализа, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты водно-энергетических расчетов

Пункт	НПУ, м	Среднесуточная гарантированная мощность, МВт	Площадь затопления, км ²	$v(y_1, y_2, y_3)$
П1	30	3,601	21,320	0,608
	40	11,771	30,920	0,644
	50	24,843	44,390	0,677
	60	40,265	61,730	0,689
П2	30	1,594	6,760	0,597
	40	10,912	41,650	0,636
	50	28,803	73,000	0,679
П3	30	8,887	50,000	0,630
	40	24,089	79,400	0,670
П4	20	4,594	51,120	0,610
	30	17,644	82,760	0,656
	40	38,136	115,110	0,678
	50	74,860	201,210	0,619
	60	129,735	269,860	0,403
П5	20	4,712	50,800	0,610
	30	16,241	109,450	0,646
	40	41,935	193,550	0,651

На втором этапе проводится построение иерархии целей и критериев проблемы выбора лучшего пункта ГЭС (см. рис. 4). Критерии К1-К3 служат для выбора лучшей АБУ, а затем и для выбора лучшей АПУ. Критерии К4-К7 служат только для оценки АПУ.

На третьем этапе исследования проводится выбор лучших АБУ (вариантов ГЭС) для возможных 5 пунктов (П1-П5). Для этого используется метод МАУТ, который имеет аксиоматическое обоснование. При выполнении условий-аксиом дается математическое доказательство существования скалярной функции полезности $u(y)$, которая ставит в соответствие каждой альтернативе число, отражающее ее полезность [1]. Если рассматривается выбор в условиях определенности, функцию полезности $u(y)$ называют функцией ценности $v(y)$ [1; 7]. Так как отсутствует объективная или субъективная информация о распределениях вероятности изменения оценок по критериям, будем рассматривать решение задачи в условиях определенности и использовать функцию ценности $v(y)$.



Рис. 4. Иерархия целей и критериев проблемы выбора пункта строительства ГЭС

Выполнение условия взаимной независимости критериев по предпочтению [1; 7] позволяет получить многокритериальную функцию ценности в аддитивном виде:

$$v(y) = v(y_1, y_2, \dots, y_n) = \sum_{i=1}^n k_i v_i(y_i),$$

где k_i – шкалирующий коэффициент критерия i , $\sum_{i=1}^n k_i = 1$; $v_i(y_i)$ – однокритериальная функция ценности; y_i – оценка АБУ по критерию i .

Для построения однокритериальных функций ценности проводится опрос ЛПР, в ходе которого определяется ценность $v(y_i)$ для всего возможного диапазона критериальных оценок y_i . На рис. 5 представлен пример однокритериальной функции ценности критерия К3 – площади затопляемых земель.

Далее в ходе диалоговых процедур [1; 2] устанавливаются отношения важности между критериями и решается система уравнений. В результате определяются шкалирующие коэффициенты k и многокритериальная функция ценности:

$$v(y_1, y_2, y_3) = k_1 v_1(y_1) + k_2 v_2(y_2) + k_3 v_3(y_3).$$

В исследовании получена многокритериальная функция ценности:

$$v(y_1, y_2, y_3) = 0,403 \cdot v_1(y_1) + 0,481 \cdot v_2(y_2) + 0,116 \cdot v_3(y_3).$$

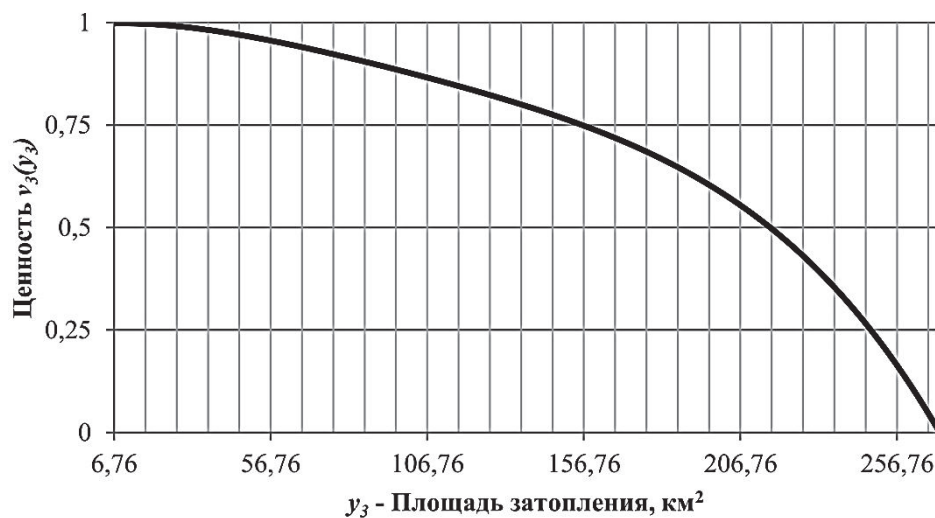


Рис. 5. Однокритериальная функция ценности критерия u_3 – площадь затопляемых земель

С ее помощью могут быть ранжированы все варианты ГЭС для каждого пункта. Результаты расчета представлены в табл. 1.

Для этапа сравнения АПУ (пунктов) выбраны следующие лучшие АБУ: для пункта П1 – вариант ГЭС с НПУ 60 м, для П2 – 50 м; П3, П4, П5 – 40 м.

На заключительном этапе для сравнения пунктов применяется метод анализа иерархий. Метод использует относительную шкалу сравнения (табл. 2) [5].

Таблица 2

Шкала относительной важности

Уровень важности	Количественное значение
Равная важность	1
Умеренное превосходство	3
Значительное превосходство	5
Явное превосходство	7
Абсолютное превосходство	9

В соответствии с методом ЛПР проводит попарные сравнения всех альтернатив отдельно по каждому критерию К1-К7 с помощью шкалы относительной важности, выражая степень превосходства одной альтернативы по отношению к другой, формирует матрицы парных сравнений альтернатив. Затем аналогично проводит парное сравнение критериев К1-К7, формирует матрицу парных сравнений критериев [5]. Вычислив собственные вектора матриц парных сравнений, проведя нормирование элементов собственных векторов, ЛПР получает веса критериев и альтернатив. Определение собственного вектора матрицы $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ проводилось по известному выражению [5]:

$$\lambda_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n c_{ij}},$$

где λ_i – элемент собственного вектора матрицы, соответствующий альтернативе или критерию i ; c_{ij} – оценка шкалы относительной важности пар альтернатив или критериев i и j ; n – количество альтернатив или критериев.



Вес критерия w_i или альтернативы v_{ij} определяется путем нормирования элементов собственного вектора. Например, вес критерия определяется

$$w_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (1)$$

Оценки альтернатив с учетом всех критериев получают по выражению

$$V_j = \sum_{i=1}^n w_i v_{ij}, \quad (2)$$

где V_j – показатель качества j -й альтернативы; w_i – вес i -го критерия; v_{ij} – вес j -й альтернативы по i -му критерию.

В табл. 3 приведен пример сравнения АПУ по критерию «Среднесуточная мощность ГЭС». В сравнении участвуют выбранные ранее лучшие АБУ.

Таблица 3

Матрица парных сравнений АПУ по критерию «среднесуточная мощность ГЭС»

Пункт	П1	П2	П3	П4	П5	Вес
П1	1	7	8	3	0,500	0,310
П2	0,143	1	2	0,200	0,125	0,048
П3	0,125	0,500	1	0,167	0,111	0,033
П4	0,333	5	6	1	0,250	0,154
П5	2	8	9	4	1	0,456

Матрица парных сравнений критериев, а также полученные по выражению (1) веса представлены в табл. 4. Многокритериальные оценки альтернатив, полученные по выражению (2), представлены в табл. 5.

Таблица 4

Матрица парных сравнений критериев

Критерий	К1	К2	К3	К4	К5	К6	К7	Вес
К1	1	2	3	0,500	5	0,500	5	0,179
К2	0,500	1	2	0,333	4	0,333	4	0,116
К3	0,333	0,500	1	0,250	3	0,250	3	0,076
К4	2	3	4	1	6	1	6	0,280
К5	0,200	0,250	0,333	0,167	1	0,167	1	0,036
К6	2	3	4	1	6	1	6	0,280
К7	0,200	0,25	0,333	0,167	1	0,167	1	0,036

Таблица 5

Многокритериальные оценки пунктов

Альтернатива	Оценка
АПУ1 (П1)	0,293
АПУ2 (П2)	0,104
АПУ3 (П3)	0,145
АПУ4 (П4)	0,209
АПУ5 (П5)	0,250



Анализ полученных результатов

Итак, с позиций разработанной иерархии целей и критериев, назначенных оценок при парных сравнениях лучшим является пункт П1.

Строительство ГЭС в пункте П1 позволит обеспечить развитие транспортного узла Хонуу, решить вопросы электроснабжения объектов железной дороги при выполнении стратегии развития железнодорожного транспорта до 2030 г. Пункт обеспечивает наименьшую площадь затопления, в то же время сравнительно высокую по сравнению с конкурентными вариантами мощность (вторую по величине), расположен в зоне с низкой относительно других пунктов сейсмичностью. Но по такому критерию как «Воздействие на ихтиофауну» пункт имеет худшую оценку. Низкая оценка альтернативы и по критерию «Стоимость строительства». Тем не менее с учетом выраженных предпочтений пункт П1 имеет самую высокую многокритериальную оценку.

Также высокую оценку получил пункт П5, имеющий высокие перспективы для развития вследствие большого сосредоточения месторождений цветных и благородных металлов. Пункт имеет наименьшее воздействие на ихтиофауну, лучший вариант ГЭС по мощности. Однако этот район имеет сравнительно низкую оценку по критериям «Условия строительства», «Стоимость строительства ГЭС», самую низкую оценку по критерию «Площадь затопляемых земель» среди рассматриваемых на втором уровне альтернатив.

Заключение

Новизна предлагаемого подхода заключается в многокритериальном рассмотрении проблемы на двух уровнях с соответствующим формированием двух уровней альтернатив. Каждая альтернатива первого уровня может иметь возможные реализации в виде альтернатив второго уровня. Альтернативы первого и второго уровня имеют различную степень детализации описаний последствий по критериям, что требует применения различных методов к многокритериальной оценке. Предложен подход для решения задачи в такой постановке. Его реализация может проводиться на ранних этапах инженерных изысканий, в предпроектном анализе, когда известны лишь ориентировочные данные в отношении сооружаемой ГЭС, с целью определения наиболее предпочтительных мест для дальнейших, более детальных исследований. Особенностью подхода является возможность избежать точной оценки альтернатив по некоторым критериям, ограничиться лишь выражением превосходства альтернатив по отношению друг к другу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кини, Р. Л. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / Р. Л. Кини, Х. Райфа; пер. с англ.; под ред. И. Ф. Шахнова. – М.: Радио и связь, 1981. – 580 с.
2. Кини, Р. Л. Размещение энергетических объектов: выбор решений / Р. Л. Кини; пер. с англ. – М.: Энергоматиздат, 1983. – 320 с.
3. Ноговицын, Д. Д. Водные ресурсы Якутской АССР и их использование / Д. Д. Ноговицын. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1985. – 124 с.
4. Панкратьев, П. С. Многокритериальный выбор створа гидроэлектростанции на реке Индигирке в республике Саха (Якутия) // П. С. Панкратьев, В. А. Шакиров / Системы. Методы. Технологии. – 2012. – № 3 (15). – С. 71-80.
5. Саати, Т. Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Л. Саати; пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1993. – 316 с.
6. СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах / Минстрой России. – М.: ЦИТП Минстроя России, 2014. – 131 с.
7. Черноуцкий, И. Г. Методы принятия решений / И. Г. Черноуцкий. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.

Крадин Н. П., Мылова Ю. А.
N. P. Kradin, Yu. A. Mylova

ПЛАНИРОВОЧНАЯ СТРУКТУРА КОМСОМОЛЬСКА-НА-АМУРЕ КАК РЕЗУЛЬТАТ СОВЕТСКОЙ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПОЛИТИКИ

KOMSOMOLSK-ON-AMUR CITY'S LAYOUT AS A RESULT OF THE IMPLEMENTATION OF SOVIET URBAN PLANNING POLICIES



Крадин Николай Петрович – доктор архитектуры, профессор кафедры архитектуры и урбанистики Тихоокеанского государственного университета, член-корр. РААСН (Россия, Хабаровск); 680000, г. Хабаровск, ул. Ким-Ю-Чена, 9-а, кв. 101. E-mail: n_kradin@mail.ru

Mr. Nikolay P. Kradin – Dr.habil. of Architecture, Professor, Department of Architecture and Urban Planning, the Pacific State University (Russia, Khabarovsk); 9a - 101, Kim-Yucheng Str., Khabarovsk. E-mail: n_kradin@mail.ru



Мылова Юлия Анатольевна – аспирант Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск). E-mail: luchiam@mail.ru

Ms. Julia A. Mylova – PhD Student, the Pacific State University (Russia, Khabarovsk). E-mail: luchiam@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена изучению феномена возникновения «новых социалистических городов» в 30-60-е годы XX века. Проведен исторический анализ планировочной структуры г. Комсомольска-на-Амуре в контексте опыта советского градостроительства. Выявлены приемы организации городской среды и особенности планировочной структуры, характерные для новых социалистических городов. Раскрывается проблематика директивного метода строительства. На основе архивных материалов изучены этапы формирования г. Комсомольска. Представлены возможные аспекты реализации современного подхода к организации архитектурной среды города.

Summary. The paper focuses on the phenomenon of "new socialist cities" that emerged in 1930-1960ies. We offer a historical analysis of Komsomolsk-on-Amur's city layout in the context of the Soviet-style city development. We reveal the techniques of urban habitat planning and management and the features of city layout which are characteristic of the 'new socialist cities'. The problematics of the prescriptive urban development policy are revealed. On the basis of archival materials we trace the stages of Komsomolsk-on-Amur planning and development. Possible aspects of a modern approach to urban placemaking are represented.

Ключевые слова: город советского времени; новый социалистический город; теория расселения; градобразующее предприятие; планировочная структура; архитектурная среда города; генеральный план.

Key words: Soviet city, new socialist city, resettlement theory, city-forming enterprise, city layout, architectural space, general development plan.

УДК 711(571.6)

Феномен возникновения социалистических городов

В первой половине XX в. развитие промышленного комплекса в СССР шло стремительными темпами. Правительство ставило целью ускоренное развитие индустрии, а также укрепление обороноспособности дальневосточных границ. Географию индустриализации фактически дублировала география урбанизации первых пятилеток. Возникали крупные промышленные центры – города, ставшие воплощением идей социалистического градостроительства.



К началу 1930-х гг. советская градостроительная наука занимала передовые позиции в мире. Ученым удалось сформулировать концепции, отражающие изменения в социально-экономических процессах и системах производства, разработать, а позднее и реализовать в широких масштабах многие новые методы, приемы и положения территориальной организации городской среды [15, 115].

Создание нового образа социалистического города непосредственно связано со сложением эстетического идеала в советском градостроительстве первой половины XX в. [20, 12]. Утопия «идеального города» – организма, функционирующего по заранее заданной схеме – заняла решающее место в умах архитекторов. Установка создать городскую среду, обеспечивающую в первую очередь возможность рационального подхода к жизнедеятельности человека – вот отличительная черта русской градостроительной мысли первой половины XX в. Новый советский город становился, прежде всего, воплощением ведущих социальных идей в конкретном пространстве. Общее стремление того времени – создание «новой городской культуры», «города для людей», что вскоре обрело более конкретную формулировку: «Новый город требует нового человека» [20, 26].

Советское градостроительство с первых лет индустриализации страны развивалось по двум основным направлениям: расширялись и реконструировались старые города и одновременно строились новые [13, 99]. Строительство в Советском Союзе шло стремительными темпами. Согласно статистическим данным, 69 % городов страны созданы в советское время [3, 12-13]. За тридцать лет в СССР основано более 600 городов [11, 191]. Численность городского населения к 1939 г. возросла по сравнению с 1920 г. в 3 раза. Быстрый рост новых городов обуславливался огромными масштабами тяжелой индустрии и энергетики. Города создавались на базе различных отраслей добывающей и обрабатывающей промышленности.

Развитие производственной сферы в СССР привело к строительству новых городов на неосвоенных ранее территориях, что давало возможность формировать городскую среду кардинально нового типа, благоприятную для внедрения новых форм организации существования людей. Территория нового социалистического города являлась местом, свободным от стереотипов прежнего образа жизни. Партийное руководство концентрировало внимание населения на создании пространства, необходимого для «правильного» существования советского человека, закрепляя в его сознании новые принципы жизнедеятельности. Возникновение нового города пропагандировалось как основа новой «лучшей» жизни.

Характерные особенности планировочной структуры новых советских городов

Возникновение каждого города обуславливается различными политическими, экономическими и социально-демографическими причинами. Город представляет собой некий организм, формирование и развитие которого – процесс постепенный и зачастую медленный. В условиях форсированной индустриализации первой пятилетки в СССР характерной чертой урбанизации стала ее исключительно высокая скорость.

Выработалась определенная последовательность «рождения» города: в первую очередь производилось основание промышленного предприятия, существование которого являлось первопричиной образования города, и уже после этого происходило формирование городской среды как таковой. Вот почему в условиях плановой социалистической экономики и советского политического строя коренным образом изменилась роль промышленного предприятия как градоформирующего структурного элемента. При выборе пунктов нового строительства особое внимание уделялось интересам правильной организации производства. Промышленные единицы предполагалось увязывать между собой транспортными магистралями. Поточно-функциональная система становилась обязательной основой иной, более современной планировки [10, 21-22].

Каждый населенный пункт рассматривался как единое целое, в котором наиболее разумно, целесообразно располагались его основные части: промышленное и сельскохозяйственное производство, транспорт, энергетика, управление, культура, спорт и просвещение [10, 22]. Функциональная организация городских территорий заключалась в рациональном

разделении территории города на зоны, предназначенные для размещения производства и жилой застройки с соответствующими обслуживающими зданиями, местами отдыха и т.д. (см. рис. 1). Именно этот принцип организации территории становился основой планировки новых советских городов в противоположность исторически сложившемуся бессистемному размещению на одной и той же территории всех типов сооружений и комплексов [13, 117].

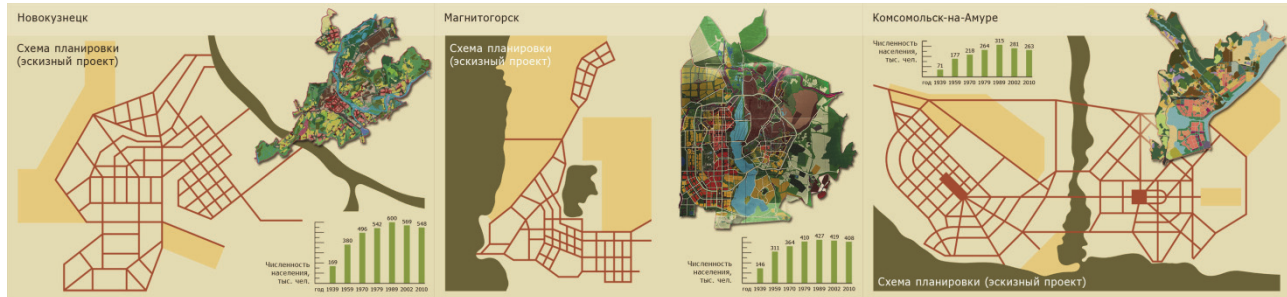


Рис. 1

Жилая зона планировалась и строилась как единое хозяйство социалистического типа, в котором ставилась задача создания всех необходимых условий для обобществления обслуживания коммунальных, бытовых и культурных нужд населения [10, 37]. При планировании городского пространства приоритет отдавался прямым проспектам, предназначенным для организации массовых, публичных действий. Главные площади трактовались как общественные форумы, где в дни народных праздников проводились демонстрации и парады [13, 127]. Улицы через динамику архитектурных ансамблей ориентировала зрителя относительно центра [6, 60], а перспектива улицы открывала вид на наиболее значительные общественные здания, расположенные на площади: Дома Советов, Дворцы культуры.

Архитектура позиционировалась могучим «средством организации психики масс», «социально-психическим фактором воспитания масс» [6, 123], позволявшим создать в новых городах материальную и художественную среду, соответствующую новому быту и духовным запросам советского человека [13, 108-109]. На практике новые города и поселки при крупных промышленных предприятиях росли быстро, рывками, не располагая финансами и временем для культурного вызревания, создания нормальной городской среды с присущим ей разнообразием занятий, досуга, градостроительных решений и т.д. Эта особенность являлась прямым результатом формирования урбанизации в качестве побочного продукта индустриализации, пренебрежения к потребностям человека в городе, к социальной сфере.

Возведение искусственных «новых социалистических городов» с их изначально правильной планировочной сеткой требовало для своей реализации условий неосвоенного пространства [18, 14], однако становление города на неосвоенной ранее территории, удаленной от ближайших населенных пунктов на сотни километров, создавало значительные сложности (и транспортные, и экономические, и другие).

Специфика планировочной структуры Комсомольска-на-Амуре на разных исторических этапах формирования города

К осознанию необходимости освоения Дальневосточного региона привела геополитическая ситуация, сложившаяся в стране к 30-м гг. XX в. Как результат реализации решения о необходимости создания на Дальнем Востоке крупной самостоятельной промышленной базы в 1932 г. возник г. Комсомольск-на-Амуре.

Определяющим фактором при выборе места для строительства нового города на месте с. Пермское явилось то, что, во-первых, село находилось на расстоянии 400 км от границы с Китаем (максимально возможная дальность полета японских самолетов) и, во-вторых, еще в 1910 г. инженер О. П. Вяземский предлагал проект, предусматривавший строительство стратегической железной дороги от станции Уруша до Императорской Гавани (г. Советская Гавань) через село Пермское-на-Амуре [12, 109].



Следует отметить, что становление Комсомольска-на-Амуре проходило в эпоху строительства промышленных гигантов в Запорожье и Донбассе, на Урале и в Сибири [12, 107]. Есть разные значения у слова «фронт». И если брать его как понятие переднего края напряженнейшей борьбы, требующей мобилизации всех сил – физических и духовных, то строительство Комсомольска было подлинным фронтом главного направления [19, 33]. Как отмечал П. Павленко: «Комсомольск родился потому, что чудовищно богатому краю... до крайности был нужен городской центр на новых путях с запада на восток и с юга на север, которые то тут, то там уже тянутся по тайге» [9, 3].

Кроме того, строительство города имело еще и довольно важную идеологическую подоплеку – стать воплощением идеи социально-политического обновления. Городу принадлежала решающая роль в утверждении идеалов социалистического образа жизни [8, 56]. В разлад с идеологическим контекстом Комсомольск долгое время не имел генерального плана, строительство велось спонтанно, о чем свидетельствуют архивные документы разных лет [17, 94]. Результатом такого подхода стали последствия, которые при дальнейшем развитии города не поддавались никакой корректировке. Показателями начального периода стройки считались объемы промышленного строительства и на него направлялись все силы и средства [12, 109]. При реализации концепции первоочередности решения производственных задач жизненные потребности граждан отодвигались на второй план.

Формирование Комсомольска-на-Амуре началось со строительства крупнейших на Дальнем Востоке авиационного и судостроительного заводов. Вблизи этих и других крупных промышленных предприятий стихийно возникали неблагоустроенные жилые кварталы и поселки с временными зданиями упрощенного типа, рассчитанными на размещение строителей. Еще одним нарушением важных принципов социалистических городов – рациональности и экономичности [8, 90] – стало расположение первых предприятий и поселений города на достаточно большом расстоянии друг от друга.

Создание целым рядом проектных и строительных организаций в течение нескольких лет отдельных, оторванных друг от друга жилых районов для различных производственных предприятий, при отсутствии генерального плана, не способствовало формированию единой планировочной структуры Комсомольска, и город в значительной мере застраивался бессистемно [2, 212]. Строительство осуществлялось тремя основными организациями: ДАЛЬПРОМСТРОЙ, ОС №125 и ОС № 126, каждая из которых вела работы по своим проектам, не согласованным и не увязанным в единое целое [1, 1].

Лишь спустя пять лет, в мае 1937 г. архитектор Б. В. Данчич завершил предварительный вариант схемы планировки территории г. Комсомольска. Схема объединяла всю существующую застройку в комплекс, показывала развитие города. Вслед за схемой распределения территорий в 1938/39 гг. появился ряд проектов застройки, выполненных главным образом Ленинградским отделением Горстройпроекта по заказам отдельных застройщиков города [2, 212]. Вместе с тем схема распределения территории не могла полностью заменить генерального плана города, к разработке которого оказалось возможным приступить только в 1939 г., когда предполагалось закончить работы по съемке и изысканиям.

Генеральный план г. Комсомольска-на-Амуре, созданный под руководством архитектора Б. В. Данчича в 1939 г., сыграл большое историко-градостроительное значение. Благодаря этому градостроительному документу сформировался архитектурно-планировочный каркас города [12, 112]. В соответствии с генпланом территория города разделялась рекой Силинка на два основных района – Правосилинский и Левосилинский. В Правосилинской части города планировалась трехлучевая система основных городских магистралей, восходящая к регулярной планировке г. Ленинграда, в Левосилинской – прямоугольная. Осями Правосилинской части города являлись Набережная, ул. Кирова и пр. Амурский (совр. Первостроителей). Основу архитектурной композиции поселка Дземги составила ул. Первомайская (совр. Калинина), примыкающая по меридиану на север к Комсомольскому шоссе, и перпендикулярные ей ул. Советская и Центральный проспект. Улица Авиационная (совр.

Уральская) замкнула все эти магистрали в огромный треугольник, примыкающий к территории авиационного завода [12, 113]. Каждый из двух районов города имел свой общественный центр, отличающийся симметричной планировкой. В центрах, ставших узловыми пунктами планировочной структуры города, концентрировались общегородские и районные общественные здания [13, 144; 13, 169]. Зона отдыха в пойме между жилыми массивами правого и левого берегов – крупный городской парк с водным пространством – объединял город в функциональном отношении.

В проекте генерального плана города 1939 г. можно наблюдать композиционную упорядоченность магистралей города, регулярную, «классическую» планировку широких проспектов, которая выражалась в идеальной симметрии и строго пропорциональной архитектуре [18, 17]. Строительство по генплану Б. В. Данчича предполагало:

- размещение жилищного строительства крупными массивами;
- застройку города 5-этажными домами и домами повышенной этажности с учетом архитектурно-планировочных требований и наиболее эффективного использования городских территорий;
- формирование общегородского центра в виде развитой архитектурно-пространственной композиции, включающей систему площадей;
- создание новых комплексов и ансамблей в районах массового жилищного строительства [14, 4].

Хотя застройка в последующем складывалась в некоторых случаях стихийно (пос. Парашютный, 3-й Силинский поселок), трассировка улиц осуществлялась в точном соответствии с проектом генерального плана (см. рис. 2) и сохранилась до настоящего времени, воздействуя на новые планировочные решения [12, 112]. Вместе с тем Комсомольский-на-Амуре горисполком допускал нарушения проекта планировки и застройки города [14, 4].



Рис. 2

К началу 1950-х гг. Комсомольск имел три административных района: Центральный и Сталинский в Правосилинской части и Ленинский в Левосилинской. Расположение трех крупнейших промышленных площадок и железнодорожных веток определяло всю планировочную структуру существующего города. В Правосилинском районе это площадки завода № 199 на берегу Амура и завода «Амурсталь» в северо-западной части города. В восточной части Левосилинской площадки – завод № 126 [17, 94]. Существующая местность представляла собой два района капитальной застройки городского типа и ряд поселков, разбросанных по территории города и зачастую лишенных элементарного благоустройства. Усадебная застройка занимала 71,4 % всех застроенных территорий, 2-х этажная – 20,7 %. 3-5-этажную

застройку представляли единичные здания в центральной части города, она составляла лишь 2,3 %. В городе почти не имелось зеленых насаждений [17, 94].

После утверждения в 1954 г. технико-экономических основ развития г. Комсомольска-на-Амуре Ленинградское отделение Горстройпроекта под руководством архитектора Баныкина разработало проект планировки города (см. рис. 3). Новый генплан ставил целью:

- улучшение планировочной структуры путем укрупнения кварталов и уплотнения существующей застройки (в зонах 2-3-этажного и усадебного строительства);
- ликвидацию малоценного, с большим процентом износа барачного жилого фонда;
- освоение как Правосилинской, так и Левосилинской частей города для расселения расчетного количества населения в 270 тыс. человек;
- соединение двух отдельных районов города тремя магистралями, что должно было обеспечить дублированную связь между ними, объединив тем самым городское пространство в единую целостную композицию.

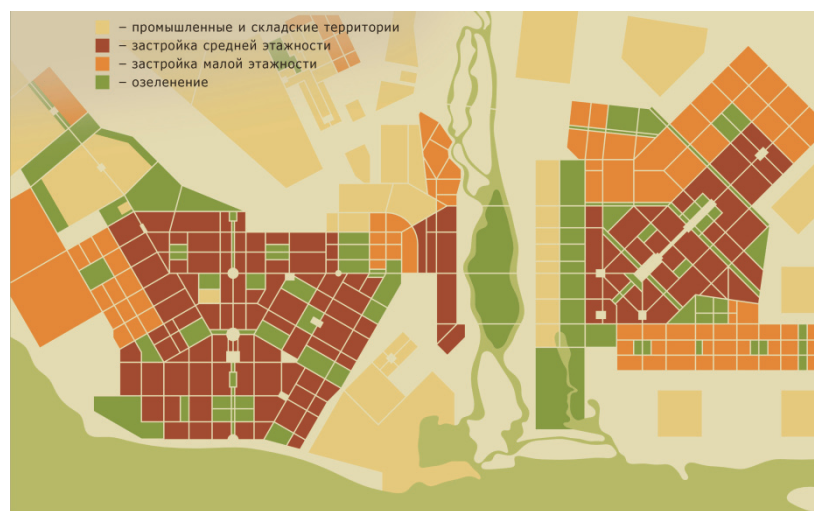


Рис. 3

Предусматривалась реорганизация существующих площадей и строительство новых (Ленина, Просвещения, Строителей), акцентированных высотными зданиями. Проспект Ленина предлагалось пробить по прямой линии через реку Силинку до улицы Первомайской (совр. Калинина) на Дземгах. С одной стороны проспекта, на площади Metallургов предполагалось возведение 12-этажного здания политехнического института, на другом конце проспекта, на Дземгах – комплекс 12-этажных административных зданий [12, 116]. Застройка центральных районов и магистралей, связывающих Правосилинскую и Левосилинскую части города, намечалась 4-5-этажными зданиями с частичным увеличением этажности до 6 - 7 этажей по набережной р. Амур и в районе центра города. Проектируемая система зеленых насаждений базировалась на освоении сохранившихся зеленых массивов и на устройстве новых.

На практике при строительстве Комсомольска-на-Амуре стало неизбежным возникновение ряда трудностей. По мере развития Комсомольск все больше удалялся от задуманного идеала рационалистического города, усложнялась его топография и социальная структура [8, 89]. Определяющей чертой строительства Комсомольска стало несоответствие планов и реальности; несогласованность решений, необеспеченность их воплощения [8, 82].

Тщательно разработанный ЛенНИИградостроительства и утвержденный Постановлением Совета Министров РСФСР № 874 от 23.11.1967 новый генеральный план определил четкую систему развития города до 1990 г.. Период строительства 1960-1990-х гг. ознаменовался массовым панельным и крупноблочным домостроением по типовым проектам. Происходило постепенное слияние кварталов, застраивались пустыри и осваивались новые терри-



тории. В градостроительстве стали преобладать «свободная» планировка и принцип микро-районирования городских пространств [12, 117].

Население г. Комсомольска-на-Амуре в течение долгого времени формировалось за счет миграций – строить новый город ехали тысячи молодых людей из центральных регионов СССР. Город рос стремительно, в связи с чем возникла необходимость разработки нового генерального плана города до 2005 г. с увеличением численности его населения до 500 тыс. человек. Функциональные зоны различного назначения предлагалось упорядочить: выделялись три основных промышленных района, предусматривалась организация санитарно-защитных зон от воздействия наиболее вредных в санитарном отношении предприятий. Селитебная территория формировалась 16 жилыми районами, в каждом из которых предполагалось устройство районного сада и общественного центра обслуживания [12, 118].

На сегодняшний день площадь территории города составляет 325 кв. км. Он протянулся вдоль реки Амур более чем на 20 км. Река Силинка является естественной границей города, разделяя его на Центральный и Ленинский административные округа. В старой, центральной части города преобладают 5-этажные дома. В зоне исторической застройки 30–40-х гг. еще остаются, хотя их и немного, двухэтажные деревянные дома. Новые кварталы застроены преимущественно 9-14 этажными зданиями. Широкие проспекты Комсомольска представляют возможность хорошего обзора исторической составляющей города с уже сложившимися акцентами и доминантами. Ансамбли зданий сталинского периода застройки сформировали и укоренили в сознании горожан образ города, которому присущи парадность и некая монументальность, даже столичность.

Феномен «города при заводе» заключается в тотальном влиянии на организацию городского пространства первоочередного строительства промышленного предприятия. Показателями начального периода стройки считались объемы промышленного строительства и на него направлялись все силы и средства [12, 109]. При реализации концепции первоочередности решения производственных задач жизненные потребности граждан отодвигались на второй план. Все это привело к невозможности достижения должного уровня социальной комфортности населения. И не случайно с исчезновением изначальной цели – формирование военно-экономического форпоста на восточных границах страны задача закрепления населения на Дальнем Востоке потеряла свою приоритетность, город стал малопривлекательным для населения. На этом этапе возникает необходимость в пересмотре подхода к формированию планировочной структуры города с целью создания психологически благоприятной городской среды.

Архитекторы и строители Комсомольска-на-Амуре единодушны во мнении, что в Комсомольске имеются условия, специалисты и достаточно неосвоенных территорий для того, чтобы возродить лучшие традиции строительной индустрии. Для руководства проектного института очевидна и инженерно-техническая тенденция будущего: избежать высотных вариантов жилой застройки и создать для будущих поколений комсомольчан уютные массивы с современной коммунально-бытовой инфраструктурой. Параллельно с этим необходимо решать и композиционные задачи – постепенное развитие трехмерных связей, гармонизация силуэта, создание возможности планомерного обзора и многопланового построения и восприятия крупных членений архитектурно-пространственной среды города.

Заключение

В истории отечественного градостроительства существует период, ставший своего рода экспериментом по созданию новой категории города, обладающего характерными признаками и принципиальными задачами. Первые крупные промышленные новостройки положили начало практическому осуществлению прогрессивных идей социалистического градостроительства [13, 99-110].

Процесс создания новых городов, тесно связанный с решением проблемы рационального размещения производительных сил на территории СССР, имел огромное значение для быстрого экономического и культурного развития страны [13, 99]. Советскому городу принадлежала решающая роль в утверждении идеалов социалистического образа жизни [8, 56].



В рамках проектов строительства новых градостроительных структур осуществлялась пропаганда революционных идеалов социального равенства, классовой однородности, государственной собственности. Город уже своим архитектурным и планировочным решением формировал новые социальные отношения, при этом промышленность оказывала, как правило, наибольшее влияние на характер и структуру большинства новых городов.

Изучение феномена «нового социалистического города» представляется актуальной задачей градостроительной науки, поскольку основные тенденции этого периода отображаются в современной специфике процесса урбанизации. Таким образом, Комсомольск-на-Амуре является ярким примером города советского времени, в нем воплощались идеи социально-политического обновления. Генеральные планы города, созданные под руководством архитектора Данчича – в 1939 г., и Баныкина в 1954 г., представляли собой образцовый проект «города социалистического будущего». Комсомольск-на-Амуре и сегодня остается крупным промышленным центром Дальнего Востока, готовым к обновлениям, модернизации и совершенствованию городской среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. В бюро ДВ краевого комитета ВКП(б) докладная записка о планировке г. Комсомольска-на-Амуре / Государственный архив Хабаровского края. Фонд П-2. Описание 1. Дело 57. – 288 с.
2. Генеральная схема планировки г. Комсомольска-на-Амуре. Т. 1 (текстовая часть) / Комсомольский-на-Амуре городской архив. Фонд 15. Описание 9. Дело 6. 1939. – 212 с.
3. Герчуков, Л. Б. Это наш город, город на заре... (Москва – Комсомольск: далекое и близкое) / Л. Б. Герчуков. – М.: Московский рабочий, 1982. – 223 с.
4. Город Комсомольск-на-Амуре. Генеральные планы с нанесением инженерных сетей и коммуникаций / Комсомольский-на-Амуре городской архив. Фонд 15. Описание 2. Дело 5. 1939. – 12 с.
5. Город комсомольской славы. – М.: Центральный комитет ВЛКСМ, 1982. – 21 с.
6. Из истории советской архитектуры 1926-1932 гг. Документы и материалы. Творческие объединения / К. Н. Афанасьев. – М.: Наука, 1970. – 212 с.
7. Комсомольск-на-Амуре. Север Хабаровского края. Восточный БАМ. Нижнеамурье: энциклопедия / Б. Д. Дрозд, А. С. Соменов. – Комсомольск-на-Амуре: Изд. фирма «Амурская Волна», 2004. – 431 с.
8. Костюрина, Н. Ю. Новый город как модель советской культуры / Н. Ю. Костюрина. – Владивосток: Изд-во Дальневосточного ун-та, 2005. – 189 с.
9. Кузьмина, М. А. И вырос город на Амуре / М. А. Кузьмина. – Комсомольск-на-Амуре: б.и., 1989. – 63 с.
10. Милютин, Н. Проблема строительства социалистических городов. Основные вопросы рациональной планировки и строительства населенных мест СССР / Н. Милютин – М.-Л.: Гос. изд., 1930. – 83 с.
11. Ногач, З. Где раньше была тайга / З. Ногач, С. Оборский. – М.: Советская Россия, 1962. – 358 с.
12. Объекты культурного наследия / сост. А. В. Дыминская, Л. Б. Шокурова. – Хабаровск: Рос. Медиа Альянс, 2006. – 208 с.
13. Основы советского градостроительства. Т. 1 / Н. Баранов. – М.: Стройиздат, 1966. – 416 с.
14. Постановление Совета Министерства РСФСР от 26 ноября 1967 г. № 874 «О генеральном плане города Комсомольска-на-Амуре» / Комсомольский-на-Амуре городской архив. Фонд 15. Описание 8. Дело 49. 1967. – 4 с.
15. Проблемы градостроительства России: сб. тр. членов Отделения градостроительства РААСН / отв. ред. Л. В. Вавакин. – М.: Отдел информационно-издательской деятельности РААСН, 1999. – 144 с.
16. Проект планировки и застройки г. Комсомольска-на-Амуре / Комсомольский-на-Амуре городской архив. Фонд 15. Описание 9. Дело 17. 1954. – 3 с.
17. Проект планировки и застройки г. Комсомольска-на-Амуре. Т. 1. Архитектурно-планировочное решение / Комсомольский-на-Амуре городской архив. Фонд 15. Описание 9. Дело 13. 1954. – 94 с.
18. Савенкова, В. Н. Дискурс власти в формировании городского пространства (на примере г. Комсомольска-на-Амуре 30 - 50-х гг. XX в.): автореф. дис. ... канд. культурологии / В. Н. Савенкова. – Владивосток: б. и., 2003. – 26 с.
19. Степанов, А. А. Хабаровский край – сталинская новостройка / А. А. Степанов. – Хабаровск: Дальневосточное государственное издательство, 1952. – 79 с.
20. Хазанова, В. Э. Советская архитектура первой пятилетки. Проблемы города будущего / В. Э. Хазанова – М.: Наука, 1980. – 374 с.

Базилевич М. Е., Крадин Н. П.
M. E. Bazilevich, N. P. Kradin

ТВОРЧЕСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ АРХИТЕКТОРА ВЛАДИМИРА КАРЛОВИЧА ГОЛЬДЕНШТЕДТА (ЛИВИНА) ВО ВЛАДИВОСТОКЕ

THE LIFE AND WORK OF ARCHITECT VLADIMIR K. GOLDENSTEDT (LIVIN) IN VLADIVOSTOK CITY



Базилевич Михаил Евгеньевич – магистр архитектуры, аспирант Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск); 680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136. E-mail: mikhailbazilevich@gmail.com.

Mr. Mikhail E. Bazilevich – MA in Architecture, PhD Student, the Pacific National University (Russia, Khabarovsk); 136, Tihookeanskaya Str., Khabarovsk, 680035. E-mail: mikhailbazilevich@gmail.com.



Крадин Николай Петрович – доктор архитектуры, член-корреспондент РААСН, профессор кафедры «Архитектура и урбанистика» Тихоокеанского государственного университета (Россия, Хабаровск). E-mail: n_kradin@mail.ru.

Mr. Nikolay P. Kradin – Dr.habil. of Architecture, Corresponding Member of the Russian Academy of Architecture and Civil Engineering, Professor, Department of Architecture and Urban Studies, the Pacific National University (Russia, Khabarovsk). E-mail: n_kradin@mail.ru.

Аннотация. В статье рассматривается творческая деятельность известного архитектора и коренного жителя Владивостока Владимира Карловича Гольденштедта, приводятся факты его биографии, даются описания наиболее значимых построек, возведенных по его проектам и под его личным руководством во Владивостоке.

Summary. The paper discusses the creative activity of a famous architect and a native of Vladivostok Vladimir K. Goldenstedt. Some facts of his biography are given. We describe and characterize some of the most significant buildings designed by him and erected under his personal supervision in Vladivostok.

Ключевые слова: архитектура Владивостока, строительное отделение, Институт гражданских инженеров, Гольденштедт, доходные дома.

Key words: Vladivostok architecture, department of civil engineering, Institute of Civil Engineers, Goldenstedt, tenement buildings.

УДК 93/99:72

На рубеже XIX – XX вв. г. Владивосток являлся крупным военно-политическим, торгово-экономическим и культурным центром Дальнего Востока России. Удобное геополитическое расположение города, наличие морских и железнодорожных связей с центральными районами Российской империи, странами Азии и США, а также действие системы порто-франко сделали Владивосток привлекательным для российских и иностранных предпринимателей. Быстрый экономический рост способствовал увеличению объемов строительства и повышению эстетических качеств застройки. Появляется большое количество двух- и трехэтажных каменных и кирпичных зданий. Проведением проектно-изыскательских и строительных работ занимались специалисты строительного отделения, созданного в 1888 г. при

Приамурском генерал-губернаторстве, а также частные российские и иностранные архитекторы. Общий обзор памятников архитектуры Владивостока эпохи порто-франко приведен в учебном пособии А.П. Ивановой [1].

Владимир Карлович Гольденштедт родился 23 апреля 1878 г. во Владивостоке (см. прим. 1). Его отец Карл Георгиевич Гольденштедт – германский подданный, ученый-агроном приехал на Дальний Восток в 1870 г., где в течение пяти лет проводил исследования флоры и фауны. Результаты его исследований затем использовались при составлении проектов и проведении мероприятий по землеустройству и садоводству. Н.Г. Мизь (см. прим. 2) отмечала, что с 1876 г. Карл Георгиевич являлся Владивостокским купцом 2-й гильдии и имел собственную молочную ферму, которая располагалась на ул. Миссионерской (ныне ул. Лазо). Рядом с фермой на той же улице находился его собственный дом, в котором К.Г. Гольденштедт проживал вместе с вдовой губернского секретаря Агафьей Васильевной Ливиной. Известно, что в гражданском браке у них родились сыновья Георгий, Владимир, Павел и дочь Евгения. Н.Г. Мизь отмечает (см. прим. 2), что в Российском государственном историческом архиве Дальнего Востока (РГИА ДВ) хранится прошение К.Г. Гольденштедта от 28 июля 1884 г., в котором он просит у Российского государя Александра Александровича разрешения на усыновление принятых ранее «на воспитание детей, незаконнорожденных от жены губернского секретаря Агафьи Васильевны Ливиной, ее сыновей: Георгия, Павла и Владимира, а также дочери Евгении». Согласно архивным данным, прошение было удовлетворено с условием сохранения детьми православного вероисповедания и российского гражданства. Все дети получили фамилию Гольденштедта и являлись его наследниками. Наибольшую известность среди детей Карла Георгиевича получил его средний сын Владимир.



Рис. 1. Фрагмент фасада здания
Золотосплавной лаборатории Русско-азиатского банка

Учился Владимир Карлович Гольденштедт в одной из лучших архитектурно-строительных школ Санкт-Петербурга – Институте гражданских инженеров императора Николая I. Осенью 1904 г., после успешной защиты диплома и окончания полного курса наук ИГИ с правом на чин X класса, Гольденштедт вернулся во Владивосток и 17 февраля 1905 г. вступил в должность младшего архитектора строительного отделения Приморского областного правления, а через полгода получил чин коллежского секретаря. Архитекторы строительного отделения занимались административной работой, проектированием зданий и сооружений различного назначения, а также осуществлением надзора за проведением строительных работ (см. прим. 3).

Одним из первых реализованных проектов В.К. Гольденштедта, по некоторым данным (см. прим. 4), является здание Золотосплавной лаборатории Русско-азиатского банка, построенное на пересечении Светланской и Посыетской улиц в начале XX в. (см. рис. 1). Г-образный двухэтажный объем здания вытянут

вдоль ул. Светланской. При разработке образного решения В.К. Гольденштедт использовал черты модерна и ренессанса. Первый этаж сооружения массивен, а второй этаж, отделенный от первого широким пояском, напротив, выглядит облегченным за счет полуциркульных окон, сгруппированных по два и по три и образующих аркатурный пояс. Окна второго этажа отмечены раскреповкой и украшены декоративными каннелированными пилястрами, завер-

шенными ионическими валютами. Углы здания подчеркнуты мощной рустовкой, напоминающей итальянские палаццо эпохи ренессанса. Главный вход, расположенный в угловой части здания, обозначен четырехугольным эркером, заменяющим козырек над парадным крыльцом и опирающимся на две чугунные опоры. Эркер увенчан восьмигранным бельведером-ротондой, завершенным куполом с высоким шпилем. Благодаря такому решению здание получило свое народное название «дом с бельведером». Золотосплавная лаборатория располагалась здесь до 1913 г., после чего здание перешло в ведение городского общественного банка, а в 1923 г. – коммунального банка. В настоящее время в нем расположено Управление Федеральной службы судебных приставов России по Приморскому краю.

Вторым реализованным проектом В.К. Гольденштедта стало здание отеля «Централь», построенное по заказу его отца Карла Георгиевича в 1906 – 1907 гг. на собственном участке этой семьи на ул. Светланской, 11. До революции его часто называли «Дом Гольденштедта». Сооружение, которое на протяжении многих лет являлось лучшей гостиницей Владивостока, построено в стиле рационального модерна (см. рис. 2). Здание представляет собой трехэтажный кирпичный объем с белыми оштукатуренными стенами, расчлененными декором красного цвета. Следуя приемам классической архитектуры, Гольденштедт сделал первый этаж более статичным, массивным и высоким, а второй и третий этажи – легкими, для чего использовал ритмические ряды окон, чередующихся с балконными дверьми. Завершение здания выполнено в виде рядов остроугольных башенок, увенчанных тонкими металлическими шпилями. В целом объемно-пространственное решение достаточно лаконично. В пластическом решении фасадов отсутствуют раскреповка и барельефы, а образная выразительность сооружения по большей части достигнута за счет контрастного цветового решения и строгой графичности форм. Входы в здание акцентированы выдвинутыми объемами-башенками. Ризалит, обозначающий главный вход, отличается массивностью и имеет трапециевидное завершение.



Рис. 2. Здание отеля «Централь»

В советский период в здании размещались «Военторг» и филиал гостиницы «Золотой Рог», а в настоящее время на первом этаже здания расположен банк «Приморье», а верхние этажи занимают офисы различных мелких компаний (см. прим. 5).

После трех лет службы Гольденштедта произвели в чин титулярного советника. В то время в Российской империи существовала система поощрения служащих различных военных и гражданских министерств и ведомств. Наградные знаки подразделялись на несколько степеней и присваивались военным и чиновникам за различные заслуги в строгой последова-

тельности, начиная с низшей степени. Так, 6 декабря 1908 г. Владимир Карлович получил орден Св. Станислава 3-й степени – низший по старшинству в иерархии государственных наград (см. прим. 6).

После Русско-японской войны во Владивостоке отмечался большой спрос на жилье, поэтому широкое распространение получили гостиницы и доходные дома. Так, в 1908 г. по заказу одного из крупнейших рыбопромышленников на Дальнем Востоке России Георгия Филипповича Демби началось строительство отеля «Немецкий» на Океанском проспекте, 9. Автором и руководителем строительства предприниматель выбрал уже широко известного в то время архитектора Гольденштедта. Здание выполнено в широко распространенном в то время на Дальнем Востоке стиле модерн и представляет собой два трехэтажных объема, соединенных между собой, со сдвижкой в пол-этажа (см. рис. 3). Сооружение имеет сложное пластическое решение фасадов. Первый этаж отличается строгостью и графичностью за счет рустовки ризалитов и отсутствия декора на стенах. Верхние этажи, напротив, выглядят легкими, устремленными вверх. Подобного эффекта архитектору удалось достичь путем объединения окон второго и третьего этажа в один декоративный элемент, завершенный кронштейнами, поддерживающими большой вынос крыши. Угол здания акцентирован восьмигранным куполом, выдвинутым вверх на полтора метра относительно уровня третьего этажа. Угловые стены украшены декоративными элементами, объединяющими второй и третий этажи.



Рис. 3. Здание отеля «Немецкий»

Во время Первой мировой войны название отеля поменяли на более патриотичное – «Националь», в годы гражданской войны в здании размещался Штаб Приамурского военного округа, а в 1920-е – штаб Народно-революционной армии. В данный момент здесь расположено управление культуры администрации города Владивостока (см. прим. 4).

В 1908 г. строительство отеля «Немецкий» еще продолжалось, а В.К. Гольденштедт получил новый заказ на строительство, на этот раз от Леонтия Соломоновича (Хаим-Лейба Шимановича) Скидельского, владельца деревообрабатывающих и цементных заводов, угольных месторождений, крупнейшего капиталиста начала XX в. не только на Дальнем Востоке России, но и в Китае. Перед архитектором встала задача спроектировать два корпуса доходного дома на сложном и неудобном для строительства земельном участке-косогоре на

Китайской улице, 26 (ныне Океанский проспект, 30). Сооружение представляет собой два трехэтажных одинаковых по размеру почти кубических объема, соединенных между собой третьим двухэтажным объемом-вставкой (см. рис. 4). В архитектурном решении фасадов четко прослеживаются черты модерна. Фасады корпусов доходного дома решены симметрично. Входы смещены относительно центральных осей и акцентированы ризалитами, увенчанными аттиками с фальш-окнами. Резной фриз поддерживается декоративными кирпичными кронштейнами, выступающими из плоскости стены на полкирпича. Особую выразительность сооружению придает использование различных по форме окон (прямых, полуциркульных и круглых). Облицовка фасадов выполнена из кирпича красного и желтоватого оттенков, участки стен над окнами второго этажа оштукатурены – все это подчеркивает богатую пластику фасада.



Рис. 4. Здание доходного дома Л.С. Скидельского

После революции нижние этажи здания использовались под магазины, а на верхних этажах сначала размещались жилые квартиры, а затем с 1986 г. – различные административные учреждения (см. прим. 4).

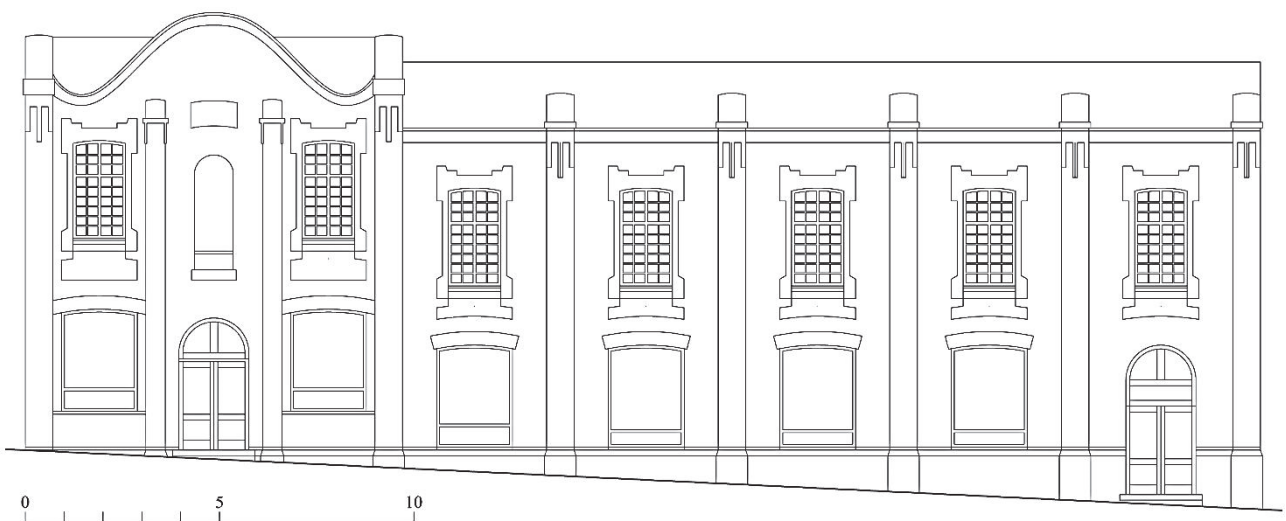


Рис. 5. Здание театра-кабаре «Лотос»

Еще одним проектом, выполненным архитектором в 1908 г., стал театр-кабаре на ул. Алеутской, 22, получивший название «Лотос» – увеселительное заведение, дореволюци-

онный аналог современных ночных клубов. Заказчиком выступил предприниматель Ю. Катчан. Сооружение имеет г-образный план. В архитектурном решении использованы мотивы восточной архитектуры и характерные черты стиля «ориентальный модерн» – волнообразный фронтон, акцентирующий главный вход, пилястры, прорезающие карниз и переходящие в пилоны, сандрики, по очертанию напоминающие крыши пагод (см. рис. 5). Известно, что фасады клуба украшали лепные фигуры и орнаменты, которые были утрачены в советский период. В 1924 г. здесь размещался дом революционной обороны, а с 1953 г. – клуб имени Ф. Э. Дзержинского (см. прим. 4).

Зарекомендовав себя надежным административным работником и успешным архитектором, В.К. Гольденштедт получил повышение по службе. В 1909 г. по приказу военного губернатора Приморской области В.Е. Флуга его назначили исполняющим должность Приморского областного архитектора. Последующие пять лет Владимир Карлович поочередно исполнял обязанности Приморского областного архитектора и областного инженера (см. прим. 6).

В 1909 – 1910 гг. Владимир Карлович занимался строительством одноэтажного здания городской школы, расположенной на Океанском проспекте, 18. Идея строительства возникла еще в марте 1905 г., когда дочь чиновника Л.П. Черепанова подарила городским властям участок земли на пресечении улиц Китайской (ныне Океанский проспект) и Фонтанной для строительства на нем городской школы. Единственное условие дарственной заключалось в том, что школа получит имя умершего бывшего судьи Владивостокского окружного суда Николая Петровича Черепанова, брата Ларисы Петровны (см. прим. 7). Архитектурное решение отличается лаконичностью и строгостью форм (см. рис. 6). Уличный фасад имеет трехчастную композицию. Главный вход, расположенный в левой части здания, акцентирован массивным крыльцом. Средняя часть здания выдвинута вперед мощным ризалитом и украшена картушем с растительной тематикой. Правая часть здания из-за перепада высот – двухэтажная, на первом этаже расположен дополнительный вход. Воедино композицию собирает высокий фриз, триглифы которого визуальнo поддерживают четыре фронтона, акцентирующие входы в здание и два окна центрального ризалита.



Рис. 6. Здание школы Н.П. Черепанова (реконструкция)

В 1930 г. у здания появилась конструктивистская двухэтажная надстройка, значительно исказившая его первоначальный облик. После этого здесь поочередно размещались корейский институт, педагогический техникум, совпартшкола, библиотека имени А.А. Фадеева. В 2007 г. в связи с ветхостью здание закрыли на реставрацию, завершившуюся в 2010 г., в результате которой памятник архитектуры полностью утратил свой исторический облик. В настоящее время в нем находится отделение Сбербанка России (см. прим. 7).

Занимая должность областного архитектора, В.К. Гольденштедт участвовал в работе различных комиссий и курировал строительство многих объектов в разных городах Приморской области. Так, в 1911 г. Владимир Карлович в составе комиссии занимался выяснением замеченной недостачи казенных вещей в губернаторском доме, значащихся по описи, составленной при отъезде губернатора генерал-лейтенанта Флуга, ездил в командировку в

село Отрадное Ольгинского уезда, где контролировал строительство становой квартиры пристава Заольгинского стана, принимал участие в приемке в казну здания Ольгинского уездного Полицейского управления в с. Владимиро-Александровском и т.д. Двадцатого сентября 1911 г. В.К. Гольденштедта высочайшим приказом по гражданскому ведомству произвели в чин коллежского асессора (см. прим. 6).

С 1912 г. Владимир Карлович занимался строительством комплекса Железнодорожного собрания (клуба служащих Уссурийского отделения КВЖД) на улице Алеутской, 16 (см. рис. 7). Объем представляет собой г-образный в плане двухэтажный кирпичный блок со скатной крышей. В образном решении фасадов архитектор использовал характерные черты стиля модерн, проявляющиеся в декоре и уплощенной полукруглой форме окон. Композиционное решение уличного фасада основано на использовании ритмических рядов окон и простенков. Центральная часть фланкирована двумя широкими рустованными ризалитами, обозначающими входы и лестничные клетки. Ризалиты увенчаны аттиками, усиленными мощными широкими пилонами.

По первоначальному назначению здание использовалось недолго, еще до революции в нем располагалась Владивостокская таможня, после Великой Отечественной войны – школа рабочей молодежи, а с 1979 г. оно перешло в ведение Приморского крайисполкома, а затем – во владение Администрации Приморского края. В настоящее время в нем размещается общественная приемная партии «Единая Россия» (см. прим. 4).



Рис. 7. Здание Железнодорожного собрания

Тридцатого апреля 1913 г. В.К. Гольденштедт получил право на ношение светло-бронзовой медали в память 300-летия царствования Императорского дома Романовых. С началом Первой мировой войны носить немецкую фамилию стало опасно и В.К. Гольденштедт обратился к императору Николаю II с просьбой «восстановить отчество и фамилию по рождению». Согласно архивным данным, «Государь Император в 29 день Мая 1916 года Всемиловнейше соизволил разрешить именоваться Приморскому Областному Архитектору Надворному Советнику Владимиру Карловичу Гольденштедту Владимиром Федоровичем Ливиным». Спустя три месяца приказом по гражданскому ведомству МВД, согласно личному прошению (по состоянию здоровья) В.К. Гольденштедт был уволен со службы «с мундиром». Последующие восемь лет архитектор проживал в своем доме во Владивостоке (см. прим. 8).

В 1922 г. В.К. Гольденштедт эмигрировал в Шанхай, где открыл собственную архитектурную контору и в течение 13 лет занимался проектированием и строительством. Известно также, что архитектор принимал участие в открытии в Шанхае Русского технического острова (см. прим. 8).



Владимир Карлович Гольденштедт внес существенный вклад в развитие архитектуры и строительства Владивостока и других дальневосточных городов. Проработав более десяти лет в строительном отделении при Приморском генерал-губернаторстве и в течение шести лет занимая должность областного архитектора, В.К. Гольденштедт принимал участие в работе различных комиссий и осуществлял надзор за строительством множества объектов. Построенные по проектам архитектора и при его непосредственном участии общественные здания в центральной части Владивостока по праву входят в «золотой фонд» архитектуры не только Владивостока, но и всего Дальнего Востока. Получив образование в ведущей инженерно-архитектурной школе России, Гольденштедт достойно представлял ее на востоке страны, а затем и в эмиграции. Опыт прошлого важен и в современной жизни. О нем, кстати, говорилось на Дальневосточном конгрессе инженеров «Наука-Инженер-Промышленность», проходившем в Комсомольске-на-Амуре в 2013 г. (см. прим. 9).

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванова, А. П. Стилистический анализ. Региональный аспект : учеб. пособие / А. П. Иванова. – Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2013. – 206 с.
2. Крадин, Н. П. Эхо Боссе: архитектура дальневосточного пространства / Н. П. Крадин, А. П. Иванова // Архитектура эпохи историзма: традиции и новаторство : сб. статей междунар. науч. конф., посвященной 200-летию со дня рождения архитектора Гаральда Боссе (1812 – 1894). – СПб.: Изд-во «ПАЛАЦО», 2012. – С. 208-217.
3. Крадин, Н. П. Харбин – русская Атлантида: очерки / Н. П. Крадин. – Хабаровск: КГУП «Хабаровская краевая типография», 2010. – 368 с.
4. Мялк, А. В. Владивосток. Памятники архитектуры / А. В. Мялк. – Владивосток: Изд-во «Дальпресс», 2005. – 180 с.

ПРИМЕЧАНИЯ

1. РГИА ДВ, ф. 1, оп. 1, д. 4290.
2. Мизь, Н. Г. Гольденштедт Карл Георгиевич – ученый, агроном и садовод, старожил г. Владивостока. ПГПБ им. А. М. Горького. Немецкий читальный зал [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://shamoga.info/> (дата обращения: 20.05.2014).
3. РГИА ДВ, ф.1, оп. 14, д. 234.
4. Город Владивосток в цифрах и фотографиях. Историко-архитектурные памятники. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vladcity.com/monuments/historical-and-architectural-monuments/> (дата обращения: 20.05.2014).
5. Путеводитель по Владивостоку. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://primamedia.travel/vladivostok/> (дата обращения: 21.05.2014).
6. РГИА ДВ, ф. 1, оп. 14, д. 493.
7. Здание Приморской краевой библиотеки им. А.А. Фадеева. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.vladivostokgid.ru/architecture/building/zdanie-primorskoj-kravoy-biblioteki-im-a-a-fadeeva.html> (дата обращения: 21.05.2014).
8. Крадин, Н. П. Архитекторы и инженеры восточных окраин (Дальний Восток, Забайкалье, Якутия, Китай) 765 персоналий. Рукопись.
9. Павленко, А. А. Конгресс инженеров / А. А. Павленко // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2013. – № III-1(15). – С.121-122.

Евстигнеев А. И.
A. I. Yevstigneev

О ДЕЯТЕЛЬНОСТИ УНИВЕРСИТЕТСКИХ ДИССЕРТАЦИОННЫХ СОВЕТОВ

ON THE WORK OF THE UNIVERSITY'S THESIS BOARDS



Евстигнеев Алексей Иванович – доктор технических наук, профессор, советник при ректорате, председатель диссертационного совета Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: diss@knastu.ru.

Mr. Alexey I. Yevstigneev – Dr.habil. of Engineering, Professor, Rector's Office Adviser, Chairman of the Thesis Board at Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: diss@knastu.ru.

Аннотация. Представлена информация по эффективности деятельности диссертационных советов университета за 2014 г.

Summary. A report on the work and efficiency of the University's thesis boards in 2014.

Ключевые слова: диссертационный совет, защиты диссертации.

Key words: thesis board, thesis defense.

УДК 12.79.25

Одними из многих показателей мониторинга деятельности университета в рамках научно-исследовательской работы являются количественные и качественные результаты работы диссертационных советов по защитам диссертаций.

В табл. 1 обобщены сведения по эффективности работы университетских диссертационных советов в 2014 г.

Из табл. 1 следует, что защиты диссертаций состоялись только в трех из шести диссертационных советах. Всего за 2014 г. были защищены одна докторская и восемь кандидатских диссертаций, из них сотрудниками КНАГТУ являются соискатели одной докторской (специальность 05.13.18) и двух кандидатских (специальности 05.16.09 и 05.09.03) диссертаций.

Из числа защитившихся один соискатель являлся докторантом и два – аспирантами.

Количество находящихся на рассмотрении в диссертационных советах диссертаций говорит о заделе на будущие потенциальные защиты в первой половине 2015 г.

Потенциально могут состояться защиты одной докторской (специальность 05.16.09) и восьми кандидатских диссертаций (специальности 01.02.04, 05.13.18, 24.00.01, 05.07.02), из них сотрудниками КНАГТУ являются только два аспиранта. Это в точности соответствует общему количеству защит в 2014 г.

Судя по количеству диссертаций, находящихся в разработке в диссертационных советах, есть основания предполагать, что вторая половина 2015 г. будет более плодотворной по количеству защит, чем первая.

Высказанный ранее прогноз на снижение количества защит диссертаций в 2014 г. из-за повышения организационно-правовых требований к процедурам приема работ в совет и их защитам, особенно в отношении сроков, полностью оправдался. Эти требования влекут за собой коренное изменение принципов работы руководства диссертационных советов по поиску, отбору и защитам диссертационных работ. Руководители диссертационных советов



должны нести персональную ответственность за количественные и качественные показатели эффективности работы диссертационных советов.

Таблица 1

Шифр диссертационного совета	Шифр научной специальности в диссертационных советах	Количество защит на соискание ученых степеней/из них утверждено		Находятся на рассмотрении в диссертационных советах (по состоянию на 01.01.2015)	
		Доктора наук	Кандидаты наук	Доктора наук	Кандидаты наук
1 Д 212.092.01	05.02.07 (техн. науки)	0/0	0/0	0	0
	05.16.09 (техн. науки)	0/0	3/0	1	0
2 Д 212.092.02	01.02.04 (техн. науки)	0/0	0/0	0	1
	05.16.04 (техн. науки)	0/0	0/0	0	0
3 Д 212.092.03	05.13.18 (физ.-мат. науки)	1/1	0/0	0	0
	05.13.18 (техн. науки)	0/0	0/0	0	2
4 Д 212.092.04	05.09.03 (техн. науки)	0/0	3/0	0	0
	05.13.06 (техн. науки)	0/0	2/0	0	0
5 ДМ 212.092.05	24.00.01 (культурология)	0/0	0/0	0	4
	24.00.01 (исторические науки)	0/0	0/0	0	0
	24.00.01 (философские науки)	0/0	0/0	0	0
6 Д 212.092.06	05.07.02 (техн. науки)	0/0	0/0	0	1
	05.02.09 (техн. науки)	0/0	0/0	0	0
ВСЕГО	–	1/1	8/0	1	8

Кроме того, анализ качества отчетов диссертационных советов за 2014 г. показал, что ряд председателей диссертационных советов не имеют соответствующих рейтинговых публикаций (Web of Science, Scopus, перечень ВАК), не говоря уже о рядовых членах советов. Это говорит о снижении ответственности руководителей диссертационных советов по отношению к своей работе и требовательности к членам совета.

Кибя Д. В.
D. V. Kiba

НАУКА МОЛОДЫХ – ОСНОВА БУДУЩЕГО РОССИИ. ОСЕННИЙ ЭТАП КОНКУРСА НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

YOUNG SCIENCE – THE BASIS FOR RUSSIA’S FUTURE. THE AUTUMN CONTEST OF GRADUATE STUDENTS’ AND YOUNG SCIENTISTS’ RESEARCH WORKS



Кибя Дарья Валерьевна – кандидат исторических наук, доцент кафедры истории и архивоведения Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681021, Россия, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Комсомольская, 50 – 336; 8(4217)591640. E-mail: kibadv@komsmama.ru.

Ms. Darya V. Kiba – PhD in History, Associate Professor, Department of History and Archival Science, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 50 - 336, Komsomolskaya Str., Komsomolsk-on-Amur, 681021; 8 (4217) 591640. E-mail: kibadv@komsmama.ru.

В 2014 г. на базе Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета состоялись весенний и осенний конкурсы научно-исследовательских работ аспирантов и молодых ученых. Основанием для проведения конкурсов стали приказ ректора КНАГТУ, доктора технических наук Э.А. Дмитриева и Положение о конкурсе научно-исследовательских работ аспирантов и молодых ученых Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета в 2014 г.

Осенний конкурс прошёл в период с 20 по 31 октября 2014 г., и уже 17 ноября на торжественном собрании в конференц-зале КНАГТУ были объявлены победители.

Организаторы (Отдел подготовки и аттестации научных и научно-педагогических кадров и его руководитель кандидат экономических наук, доцент Е.В. Чепухалина) преследовали цель предоставить возможность участия в конкурсах аспирантам и молодым ученым всех научных направлений университета, поэтому на конкурсе были представлены пять секций: «Технические науки», «Физико-математические науки», «Экономические науки», «Педагогические науки» и «Социально-гуманитарные науки».

Работы конкурсантов в секции «Технические науки» оценивала комиссия в следующем составе: С.И. Феоктистов, доктор технических наук, профессор, декан ССФ (председатель комиссии); В.А. Ким, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой МТНМ; В.А. Соловьев, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой ЭПАПУ; В.А. Тихомиров, кандидат технических наук, профессор, зав. кафедрой МОП ЭВМ.

Свои работы в этой секции представили Кириллов Алексей Витальевич, старший преподаватель кафедры ТПНГ; Моисеев Андрей Владимирович, старший преподаватель кафедры ТПНГ; аспиранты Лавренов Александр Сергеевич, Сухоруков Сергей Иванович, Погарцева Мария Михайловна, Соколовский Михаил Александрович, Евсеев Александр Васильевич, Магола Анна Андреевна, Проценко Александр Евгеньевич, Проценко Александра Николаевна, Никулин Михаил Юрьевич. Первое место в секции «Технические науки» было присуждено А.В. Моисееву, два вторых места – М.М. Погарцевой (тема исследовательской работы – «Разработка методики и технологии обтяжки для формообразования деталей сложной геометрии из листа на оборудовании, оснащённом ЧПУ») и С.И. Сухорукову («Разработка автоматизированной системы удаления гололеда с проводов ЛЭП электродинамическим способом»), три третьих места – М.Ю. Никулину (исследование на тему «Влияние электрических режимов микродугового оксидирования алюминиевых сплавов на характер образования и шероховатость оксидных покрытий»), А.А. Магола, А.Е. Проценко.

Конкурсные работы в секции «Физико-математические науки» оценивались комиссией, в состав которой вошли О.С. Амосов, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой



ПЭ, (председатель комиссии секции); Г.С. Лейзерович, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры МАКП; А.А. Хусаинов, доктор физико-математических наук, профессор кафедры МОП ЭВМ.

Первое место в секции присуждено Серегину Сергею Валерьевичу, аспиранту очной формы обучения, второе место – Приходько Нине Борисовне, программисту кафедры ТС.

Комиссия секции «Экономические науки»: В.В. Литовченко, доктор экономических наук, профессор декан ФЭМ (председатель); О.А. Булавенко, доктор педагогических наук, доцент, профессор кафедры ЭФ; Т.А. Яковлева, кандидат экономических наук, доцент, зав. кафедрой ЭТ.

Для участия в конкурсе в секции «Экономические науки» представили свои работы Готина Екатерина Борисовна, старший преподаватель кафедры ЭФ (первое место в секции); Олиферова Ольга Сергеевна, старший преподаватель кафедры ЭТ (третье место за работу «Концептуальные основы промышленной политики: региональный и муниципальный уровни»); аспиранты Одинец Анна Владимировна (третье место за работу по теме «Проблемы статистическо-математической обработки результатов педагогического эксперимента по формированию профессиональных компетенций будущих экономистов»), Магола Анна Андреевна (второе место), Шатилова Екатерина Леонидовна, Вахрушева Вероника Олеговна.

Научные работы в секции «Педагогические науки» для участия в конкурсе были поданы Граниной Натальей Михайловной, аспиранткой, начальником отдела менеджмента качества (первое место), а также аспиранткой Одинец Анной Владимировной (второе место за исследовательскую работу по теме «Показатели эффективности управления образовательных систем (на примере оценки деятельности вуза)»).

Работы этих участников конкурса оценивала комиссия в составе Т.Е. Наливайко, доктора педагогических наук, профессора, декана ФППО (председатель комиссии); М.В. Шинкорук, кандидата педагогических наук, доцента кафедры ПППО; О.А. Шабуровой, доцента кафедры ПППО.

Гуманитарный факультет на конкурсе был представлен в секции «Социально-гуманитарные науки» Люшилиным Евгением Леонидовичем, соискателем кафедры ИС (первое место), Шибико Ольгой Сергеевной, соискателем кафедры КЛ (второе место) и аспирантом Наследовым Вадимом Георгиевичем (второе место, тема исследования – «Динамика изменения численности населения и основные причины смерти в российских колониях на основе статистических данных Иоанна Вениаминова»).

Следует отметить высокую активность некоторых участников, например, аспирантки А.А. Магола и А.В. Одинец приняли участие сразу в двух секциях конкурса, чем продемонстрировали ширину диапазона своих научных интересов.

Конкурс, который проводится в КнАГТУ уже на постоянной основе, пользуется неизменным интересом у аспирантов и молодых учёных. Об этом свидетельствует тот факт, что многие из участников весеннего конкурса заявили о себе и в его осеннем этапе. Притяжение конкурса научно-исследовательских работ аспирантов и молодых ученых Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета обусловлено не только денежной наградой для призёров, хотя это тоже весьма важный фактор. Это мероприятие позволяет конкурсантам получить объективную оценку их наработок, выслушать критические замечания и советы от компетентных старших коллег. Участие в конкурсе, предоставление промежуточных результатов своей научно-исследовательской деятельности на анализ конкурсными комиссиями позволяет скорректировать направление дальнейшей работы, повысить её качество. А сравнение успехов соперников со своими достижениями приносит элемент соревновательности и служит дополнительным стимулом даже для тех, кто не участвовал в конкурсе, а выступал в качестве зрителя. Не последнее место в мотивации участников занимает и возможность опубликовать свои труды в сборнике материалов конкурса, поэтому уже сейчас многие аспиранты, соискатели и молодые учёные нашего университета начали подготовку к участию в конкурсах 2015 года.

Ахметова А. В.
A. V. Akhmetova

ИННОВАЦИОННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ВУЗА (К 60-ЛЕТИЮ КНАГТУ)

INNOVATION IN KOMSOMOLSK-ON-AMUR STATE TECHNICAL UNIVERSITY (TO ITS 60TH ANNIVERSARY)



Ахметова Анна Валинуровна – кандидат исторических наук, доцент, начальник научного центра социально-экономических и гуманитарных проектов Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681035, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Октябрьский, 36 – 55; 89622960095. E-mail: wyrds@rambler.ru.

Ms. Anna V. Akhmetova – PhD in History, Associate Professor, Head of the Research Centre on Social Economic and Humanitarian Projects, Komsomolsk-on-Amur State Technical (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 36 – 55, Oktyabrsky Ave., Komsomolsk-on-Amur, 681035; +7 (962) 2960095. E-mail: wyrds@rambler.ru.

Инновационная деятельность – это важнейшее направление деятельности в высшем учебном заведении, нацеленное на применение и коммерциализацию результатов научных исследований и разработок для расширения номенклатуры и улучшения качества выпускаемой продукции, совершенствования технологии ее изготовления с последующим внедрением и эффективной реализацией на рынке, предполагающее целый комплекс научно-технических, организационных и коммерческих мероприятий, которые в своей совокупности приводят к инновациям.

В Комсомольском-на-Амуре государственном техническом университете инновационной деятельности придается немаловажное значение, особенно в современный период.

За 60 лет функционирования вуза многое было сделано для развития научно-технологического комплекса региона и страны в целом. Главным структурообразующим компонентом данного направления стал Технопарк. Основными задачами Технопарка являются организация непрерывного цикла от генерации идей до разработки и производства наукоемкой инновационной продукции; представление научно-технических и технологических разработок университета в сетях трансфера технологий, а также на конкурсах, проводимых на инновационных форумах и выставках; разработка и реализация эффективных организационно-правовых механизмов сотрудничества с предприятиями «инновационного пояса»; организация посредством образовательного, организационного и технического содействия созданию и инкубированию молодежных инновационных проектов; формирование компетенций, позволяющих сочетать научно-исследовательскую, проектную и предпринимательскую деятельность; консультирование сотрудников Университета по вопросам трансфера технологий и коммерциализации научно-технических разработок.

В состав Технопарка входят следующие подразделения:

– центр цифрового производства (выполнение работ в области промышленного дизайна, быстрого прототипирования, разработки и оптимизации управляющих программ для станков с ЧПУ; прецизионная механообработка, проектирование и 3D-моделирование; привлечение и выполнение заказов с предприятиями региона в рамках базовых кафедр; профессиональная подготовка и переподготовка специалистов по направлениям в области цифровых технологий). К центру относятся лаборатория промышленного дизайна и быстрого прототипирования, лаборатория станков с ЧПУ (Центр технического оснащения НААС), лаборатория САПР;

– центр автоматизации (выполнение работ в области проектирования и внедрения систем автоматизации производственных процессов: проектирование и изготовление устройств под требования заказчика, разработка, единичное и мелкосерийное изготовление



печатных плат, привлечение и выполнение хоздоговоров с предприятиями региона в рамках базовых кафедр, профессиональная подготовка и переподготовка специалистов в области автоматизации производственных процессов и промышленных объектов). К центру относятся учебный центр технологий «National Instruments» и лаборатория быстрого прототипирования печатных плат;

- лаборатория лазерных технологий и техники (проведение ОКР в области лазерных технологий и техники, проектирование новых лазерных технологических установок под заказ предприятий);

- центр робототехники и автомоделирования (развитие у студентов навыков конструкторско-технологической и научно-исследовательской работы, воспитание творческого подхода к выполнению поставленной задачи, способности её самостоятельного решения, закрепление теоретических знаний в процессе практической работы, а также обретение студентами дополнительных знаний и расширение технического кругозора при более глубоком изучении разрабатываемой проблемы, опытно-конструкторская проработка проектов студентов и аспирантов для участия в конкурсах, выставках, фестивалях и грантах, организация студенческих поисковых и прикладных научных исследований, проектных и опытно-конструкторских работ, организация участия студенческих проектов в конкурсах и выставках регионального, краевого, всероссийского и международного уровня). В структуру центра входят научно-исследовательская лаборатория робототехники и лаборатория робототехники и автомоделирования для школьников;

- экспериментальный участок композиционных материалов и покрытий (обработка металлов и нанесение покрытий на металлы, разработка технологий и состава защитных покрытий, обработка металлических изделий с использованием основных технологических процессов машиностроения, разработка и изготовление электродуговых установок);

- студенческое конструкторское бюро, созданное для выявления одаренных студентов и привлечения их к деятельности СКБ в области выработки новых идей и их реализации (исследования, проектные работы и создание опытных образцов продукции), развития у студентов навыков конструкторско-технологической и научно-исследовательской работы, воспитания творческого подхода к выполнению поставленной задачи, способности её самостоятельного решения, закрепление теоретических знаний в процессе практической работы, а также обретения студентами дополнительных знаний и расширения технического кругозора при более глубоком изучении разрабатываемой проблемы, опытно-конструкторской проработки проектов студентов и аспирантов для участия в конкурсах, выставках и грантах, организации студенческих поисковых и прикладных научных исследований, проектных и опытно-конструкторских работ с привлечением их руководителей, организации участия студенческих проектов в конкурсах и выставках регионального, краевого, всероссийского и международного уровня.

Во внешнюю структуру инновационного направления входят малые инновационные предприятия (ООО «КОМПОЗИТ ДВ», ООО «ПОЗИТРОН ДВ», ООО НПП «УНИТЕХ», ООО «ЭСКО», ООО «Альтернатива», ООО «СМС-Трекер», ООО «Энергосервис», ООО «ИНКОМ-ГРУПП», ООО «УНИЦЭ», ООО НПП «ПОЛИЭЛЕКТРО»).

Также в инновационную структуру вуза входит Центр коллективного пользования (ЦКП) «Новые материалы и технологии», созданный в 2008 г. для обеспечения проведения исследований на имеющемся оборудовании, а также для оказания услуг исследователям и научным коллективам базовой организации и иным заинтересованным пользователям.

Основными задачами ЦКП являются повышение уровня загрузки научного оборудования в ЦКП; обеспечение единства и достоверности измерений при проведении научных исследований на оборудовании ЦКП; текущее содержание и развитие материально-технической базы ЦКП путем дооснащения имеющихся специализированных комплексов (лабораторий) приобретаемым современным научным оборудованием; подготовка специалистов и кадров высшей квалификации (студентов, аспирантов, докторантов) на базе совре-



менного научного оборудования; разработка и реализация мероприятий программы развития ЦКП.

Учебно-научный инновационный центр энергосбережения при ФГБОУ ВПО «КнАГТУ» имеет многолетний успешный опыт работы в электро- и теплоэнергетике и занимается следующими направлениями: разработка программ энергосбережения, организация и проведение энергетических обследований, разработка проектов по модернизации и реконструкции действующих систем теплоснабжения и уличного освещения, внедрение современных систем учета энергоресурсов, проведение расчета нормативов потерь тепловой энергии, проведение расчета нормативов потерь электрической энергии, проведение расчета удельных нормативных расходов топлива и их запасов, разработка энергосберегающих проектов с применением частотно-регулируемого электропривода (водонапорные насосные станции, насосные станции подкачки, другие подобные объекты), подбор и настройка оборудования, шеф-монтаж, краткосрочные курсы повышения квалификации по программе «Энергосбережение и энергоэффективность» с выдачей документа государственного образца, тепловизионное обследование зданий, строений, сооружений, тепло- и электрооборудования.

Испытательная лаборатория охраны труда, созданная при кафедре «Безопасность жизнедеятельности» ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», аккредитована на следующие виды технической компетентности:

- на техническую компетентность и независимость в системе сертификации работ по охране труда в организациях (система ССОТ);
- на техническую компетентность и независимость в Системе аккредитации аналитических лабораторий (центров) (система СААЛ);
- на техническую компетентность в части заявленных радиационных измерений в Системе аккредитации аналитических лабораторий радиационного контроля (система САРК).

Относительно новым направлением является защита интеллектуальной собственности. Отдел защиты интеллектуальной собственности является структурным подразделением в составе службы проректора по инновационной работе. К компетенции Отдела относится деятельность, связанная с созданием, правовой охраной и использованием следующих объектов интеллектуальной собственности: изобретений, полезных моделей, промышленных образцов; товарных знаков, знаков обслуживания, наименований мест происхождения товаров, фирменных наименований, программ для ЭВМ, баз данных, топологий интегральных микросхем, ноу-хау (секретов производства), селекционных достижений.

Все подразделения, составляющие внешнюю и внутреннюю структуру научно-технологического комплекса вуза, представляют взаимосвязанную систему, отвечающую современным требованиям науки и техники.

В рамках реализации инновационной деятельности в вузе проводится множество как внутренних, так и внешних мероприятий. Особенно большое количество их относится к 2014 г., когда инновационная служба университета начала проявлять высокую активность. К ним можно отнести участие в турнирах по робототехнике различных уровней, VI Всероссийском молодежном робототехническом фестивале «РобоФест-2014», Конкурсе «СТАРТ, Конкурсе «УМНИК на СТАРТ», Всероссийском молодежном образовательном форуме «Селигер 2014». Внутренними мероприятиями данного направления стали Выставка технического творчества Хабаровского края для учащихся школ и вузов, ярмарка СКБ и технического творчества, первый фестиваль технического творчества КнАГТУ «Технофест КнАГТУ 2014», Russian StartUp Tour.

Таким образом, научно-технологический комплекс КнАГТУ является передовым по инновационному развитию в регионе. Само функционирование инновационной структуры в университете говорит о том, что данному направлению уделяется большое внимание со стороны руководства. Вуз проводит множество мероприятий, направленных на развитие и популяризацию инновационной деятельности среди учащейся молодежи города и края.