

**ОПЫТ РАЗВИТИЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО  
И ОРГАНИЗАЦИОННОГО СОТРУДНИЧЕСТВА УНИВЕРСИТЕТА  
И ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

**Ю.А. Соколов, ООО НТК «Электромеханика»**

**М.Л. Мишарин, Научно-методический центр по инновационной  
деятельности высшей школы Тверского государственного университета**

**Н.Ю. Соколова, Научно-методический центр по инновационной  
деятельности высшей школы Тверского государственного университета**

В статье рассматриваются возможности сотрудничества университета и промышленного предприятия через центры коллективного пользования (ЦКП). Для решения исследовательских задач в области материаловедения приведена измерительная аппаратура центра коллективного пользования ТвГУ. Описан системный подход к проектированию надёжной операции электронно-лучевой обработки.

*Ключевые слова: инновационное развитие, интеграция предприятий, создание инновационной инфраструктуры, центры коллективного пользования, прогнозирование, исследование образцов, титановые сплавы, технология электронно-лучевого синтеза.*

Стратегия инновационного развития экономики России акцентирует внимание на разработку и ускоренное внедрение научно-технических достижений в производство, диверсификацию и структурную перестройку промышленности. Эти направления формирования новой экономики в регионах содействуют появлению новых инновационных предприятий различного типа, обеспечивают рост производства в масштабах отдельных территорий и одновременно решают проблему занятости населения и сглаживания региональных диспропорций.

Одним из ключевых факторов успешной реализации промышленными предприятиями своих стратегий развития является налаживание творческих партнерских связей с отечественными и зарубежными университетами и научными учреждениями.

Наиболее распространенной формой сотрудничества промышленности и университетов является совместное выполнение научно-технических проектов, реализация совместных образовательных программ. Перспективным направлением сотрудничества промышленных предприятий с университетами в настоящее время является развитие существующей в университете и промышленном предприятии инновационной инфраструктуры. В Тверской области значительный шаг в этом направлении был сделан в 2011-2013 годах при выполнении федерального проекта «Университетский технопарк в

инновационной среде региона», в рамках которого особое внимание уделяется развитию научно-технических отношений между промышленными предприятиями и вузами региона. Одним из эффективных направлений сотрудничества является расширение областей использования развернутой уникальной аппаратуры через центры коллективного пользования (ЦКП).

Значительная работа в этом направлении была проведена вузами, НИИ, промышленными предприятиями региона при создании Тверского регионального межведомственного ЦКП уникальной аппаратурой. Следует отметить не только техническую, но и выгодную экономическую составляющую данного подхода. В современных условиях большинство промышленных предприятий не имеет возможности содержать научно-исследовательские лаборатории, оснащённые дорогой аппаратурой и приборами. Наиболее естественный выход из данной ситуации – создание и совместное использование ЦКП.

В рамках выполнения федерального проекта было показано, что высшие учебные заведения, НИИ и КБ являются не только центрами научных и технологических разработок, которые решают задачи оснащения и освоение новейших приборов оптической, электронной растровой, просвечивающей микроскопии, стендами для механических испытаний новых композиционных материалов на прочность, твёрдость и трение, но и основным источником квалифицированных кадров как для региона в целом, так и для промышленных предприятий в частности.

Базой такого сотрудничества могут быть только передовые технологии 5 и 6 технологических укладов со своими уникальными возможностями и характеристиками.

Этап создания, организационного оформления ЦКП был завершён в 2012 году. Головная роль в этой работе принадлежит ТвГУ и Тверскому ИнноЦентру. Следует особо отметить работу Тверского ИнноЦентра по сбору и систематизации данных об уникальных и высокотехнологичных измерительных приборах в Тверском регионе. На основе систематизированных данных с участием практически всех научных коллективов было подготовлено несколько сборников [1, 2, 3], в которых достаточно полно представлены средства измерения, их характеристики и возможности, порядок предоставления услуг по их применению заинтересованными организациями и ведомствами.

Одним из примеров эффективного и результативного использования ресурсов ЦКП Тверского государственного университета являются исследования и оценка свойств опытных образцов титановых сплавов, полученных на базе инновационной технологии электронно-лучевой обработки, для ОАО «Электромеханика».

Разработка новых подходов к управлению технологическим процессом электронно-лучевой обработки (сварка, пайка, термическое упрочнение, локальный отжиг, наплавка, напыление, модифицирование поверхностей и узлов, послойный синтез изделий) является актуальной задачей. Это

обусловлено как необходимостью совершенствования технологии и повышения управляемости этим процессом, так и развитием современных компьютерных систем управления построенных, как правило, на базе сетевых программируемых логических контроллеров и промышленных компьютеров.

Технологии электронно-лучевой обработки изделий успешно зарекомендовали себя при изготовлении изделий авиационной и медицинской промышленности. Электронно-лучевая обработка (ЭЛО) основана на явлении превращения кинетической энергии электронов в тепловую при их торможении в поверхностных слоях обрабатываемого изделия, которая расходуется на нагрев, плавление и испарение металла. В отличие от дуговых и плазменных источников энергии, производящих нагрев поверхности, электронный нагрев осуществляется в самом веществе на некоторой глубине от поверхности. Величина проникновения электрона вглубь металла зависит от рода металла и энергии электронов. Этим объясняется, например, возможность сварки алюминия. При ЭЛО тепло выделяется под поверхностным слоем окислов, вследствие чего внутренние участки металла быстро расплавляются и нагреваются до испарения. Процесс действует подобно взрыву: окисные пленки разрушаются и не препятствуют сплавлению кромок. Способность электронов, достигших поверхности обработки, внедряться в материал до нескольких десятков микрон повышает твердость и износостойкость поверхностного слоя изделий. Высокие скорости нагрева, достигающие значений  $10^5 \dots 10^6$  °C/с, создают необходимые условия для формирования изделия с мелкодисперсной структурой.

Для анализа структуры, механических и теплофизических свойств образцов из титановых сплавов требовалось провести необходимый с учетом нормативных документов лабораторный контроль и измерение:

- исследование микроструктуры;
- расчёт износостойкости;
- энергодисперсионный микрохимический анализ продуктов износа;
- измерение показателя твердости.

Специалисты ТвГУ и ТГТУ за короткий срок на уникальной аппаратуре провели исследования микроструктуры, оценку химического состава и свойств образцов, полученных по технологиям горячего изостатического прессования и ЭЛО.

Микроструктуру опытных образцов исследовали методами оптической и растровой электронной микроскопии на универсальном микроскопе JEOL 6610LV (Япония). Для проведения микрохимического анализа использовали энергодисперсионный спектрометр INCA Energy++ фирмы Oxford Instruments. Микротвердость измеряли на отечественном микротвердомере ПМТ-3 согласно ГОСТ Р 8.748-2011(ИСО 14577-1:2002).

Проведенные в Тверском государственном университете комплекс оценок и измерений на передовом измерительном комплексе представленных опытных изделий в соответствии с требованиями российских и международных ГОСТов позволили получить надежную базу для дальнейшего развития

технологий по производству инновационных образцов титановых сплавов для различных сфер применения. Одновременно это стало примером плодотворного сотрудничества бизнеса, высшей школы и органов управления региона.

На основе полученных в ТвГУ экспериментальных данных и налаженного научно-технического сотрудничества в ОАО «Электромеханика» появилась возможность перейти к этапу разработки методики прогнозирования надежной технологической операции ЭЛО.

Общая методика прогнозирования надежной технологической операции ЭЛО состоит из следующих этапов: математическое описание технологической операции; разработка диагностической модели прогнозирования параметров надежности операции; выработка технологических рекомендаций по построению операции, режимам обработки поверхности электронным лучом.

Работы по теории прогнозирования и принятия решений, развитие аппарата исследований операций, теории эвристических решений, современные методы исследований в области технологии и автоматизации проектирования позволяют формализовать процедуру проектирования операции ЭЛО изделий. Разработанные математические модели позволяют выбрать оптимальные значения параметров при обработке поверхности электронным лучом.

Проектирование технологии по модульному принципу предусматривает последовательное представление операции ЭЛО в виде теоретико-множественных универсальных моделей. При этом каждая универсальная модель описывает форму изделия, кинематическую компоновку манипуляторов электронно-лучевой установки с ЧПУ, теоретическую схему базирования, размерные схемы операции ЭЛО.

В основе теоретико-множественной модели технологического проектирования лежат исходные модули  $D_{sk}$ ,  $D_{sg}$ ,  $D_{sp}$ ,  $D_{sc}$ , реализующие функции отношений на множестве кинематических  $S_k$ , геометрических  $S_g$ , размерных  $S_p$  и структурных  $S_c$  связей. Модуль  $D_{sk}$  устанавливает компоновку установки,  $D_{sg}$  - формирует теоретическую схему базирования по ГОСТ 21495-76,  $D_{sp}$  — формирует размерные цепи,  $D_{sc}$  — формирует состав и структуру технологической операции ЭЛО.

Результаты математического моделирования является базой для выработки технологических, конструкторских и технологического решений при создании изделия.

Этап инженерного прогнозирования входит в систему проектирования информационной технологии. Под технологическим прогнозированием понимается установление качественных и количественных характеристик информационной технологии и основных параметров технологической системы.

При решении практических задач управления ЭЛО предлагается использовать системный подход, включающий расчёт оптимальных значений параметров управления на базе математической модели (ММ) и корректирование значений параметров режима обработки по результатам

обработки информации от датчиков в реальном масштабе времени. При таком подходе можно выделить две составляющие управления: управляющую технологическую программу, разработанную на базе ММ, и комплекс программно-аппаратных средств адаптивного управления, позволяющих адаптировать технологический процесс ЭЛО к реальным условиям, адекватно реагировать на возмущающие воздействия.

Высокоэффективная технология ЭЛО может быть разработана с помощью построения модели прогнозирования технологической операции (ТО). В состав модели прогнозирования, построенной по модульному принципу, входят следующие модули:  $M_1$  — структура технологической операции,  $M_2$  — конструктивно-технологические характеристики,  $M_3$  — режим обработки.

С учетом введенных обозначений имеем:

$$M = \langle M_1, M_2, M_3, \varphi_m \rangle, (1)$$

где

$\varphi_m$  — связи между модулями модели прогнозирования ТО.

Прогнозирование структуры ТО определяется двумя правилами: первое связано с построением структуры операции, второе - с установлением соответствия проектного решения с заданными параметрами точности и качества обработки.

При таком подходе структура ТО описывается следующим отображением:

$$\varphi_{on} : (X \cdot Y) \rightarrow Z_i, (2)$$

где

$X, Y$  - признаки построения проектного решения ТО;

$Z_i$  - проектное решение структуры операции.

О надежности ТО целесообразно говорить как надежности, зависящей от технологических управляемых и неуправляемых факторов обработки: стабильности параметров элементов Т-системы, физико-механических свойств материала и т.п. Физические основы технологической надежности заключаются в нестационарном и случайном характере явлений, протекающих при ЭЛО. Для рассмотрения параметров надежности ТО введем следующие обозначения:

- $X_1$  - изменение состояния изделия;
- $X_2$  - изменение параметров Т-системы;
- $U_T$  - качество Т-системы;
- $t$  - фактор времени.

Тогда математическая модель проектирования надежной ТО может быть представлена отображением следующего вида:

$$\varphi_{n.o.} : X_1(t) X_2(t) \rightarrow U_T(3)$$

Фактически в формуле (3) зашифрован следующий смысл: реализация методов компенсации погрешностей, вызванных действием вектора возмущающих факторов.

Под надежной технологической операцией понимается технологическое решение, при котором достигается экстремальное значение:

$$U_{ц}^{\circ} = x \cap R \{U_{ц}(X_1, X_2)\}, (4),$$

где

$U_{ц}(X_1, X_2) \cap U$  - некоторая целевая функция;

$x \cap R_n$  - множество допустимых решений.

Общая методика прогнозирования ТО состоит из следующих этапов: математическое описание ТО; разработка диагностической модели прогнозирования параметров надежности ТО; выработка технологических рекомендаций по построению операции и режимам обработки.

Принцип оптимальности при проектировании операции ЭЛО можно сформулировать следующим образом: определить такие значения вектора искомых параметров  $X$  (структура операции, режимы обработки), которые обеспечили бы наибольшую эффективность процесса при выполнении ограничений по точности и качеству изделия.

Операция ЭЛО также характеризуется совокупностью рассчитываемых параметров, которые являются функциями искомых параметров, и составляют вектор  $Y$ . К составляющим вектора рассчитываемых параметров  $Y$  следует отнести скорости нагрева и охлаждения расплавленного металла шва, глубину проплава, ширину шва, температурное поле.

Оптимальные значения искомых параметров ( $X$ ) рассчитываются с учётом вектора критериев оптимизации ( $K$ ), компоненты которого являются функциями исходных, рассчитываемых и искомых параметров.

При оптимизации процесса ЭЛО варьируемые параметры вектора  $X$  можно разделить на две группы:

— структурные;

— технологические (режим обработки: ток луча  $I_l$ , диаметр пятна на изделии  $d_0$ , скорость перемещения луча  $V_0$  и др.).

В качестве критериев векторной оптимизации процесса ЭЛО можно выбрать следующие экономические и технологические показатели:

$K_1$  – приведённые затраты;

$K_2$  – производительность;

$K_3$  – качество изделия.

Качество сварного соединения можно определить по количеству пор, структуре изделия, механическим и теплофизическим свойствам.

К числу важнейших вопросов, которые необходимо решить при проектировании технологической операции ЭЛО относится расчёт режимов обработки на базе ММ.

Автоматизация технологического процесса ЭЛО, охватывающей большой комплекс физических и химических процессов, на базе компьютерной технологии открывает новые возможности управления. С развитием микропроцессорных устройств и локальных вычислительных сетей появилась возможность создания целостных технологических систем обработки данных технологического процесса.

Современная система управления, выполненная на базе промышленного компьютера и программируемых контроллеров, позволяет реализовать:

— ММ процесса ЭЛО на базе стандартных САЕ-продуктов (универсальных конечно-элементных пакетов для решения теплофизических задач и гидродинамики);

— алгоритмы адаптивного управления по информации от датчиков обратной связи для корректировки управляющей программы в реальном масштабе времени.

Стохастический характер процесса ЭЛО учитывается организацией адаптивных обратных связей, что существенно повышает качество управления.

Модуль диагностики и прогнозирования процесса ЭЛО обеспечивает выполнение блокировок, переход установки в безопасное состояние при возникновении аварийных ситуаций: отказе системы охлаждения, отклонении луча от допустимых значений, неправильных действиях оператора.

Выводы:

1. Компьютерная технология позволяет учитывать большое разнообразие конструктивно-технологических характеристик проектного решения ТО, является эффективным инструментом для решения задач повышения надежности ТО и разработки модулей диагностирования и прогнозирования.

2. Сложность физико-химических процессов, фазовые переходы при воздействии на металл электронным лучом предопределяют необходимость создания математической модели процесса ЭЛО как одной из основных составляющих при подготовке управляющей программы.

3. Для решения исследовательских задач в области материаловедения целесообразно использовать следующую уникальную измерительную аппаратуру центра коллективного пользования ТвГУ:

— атомно-силовой микроскоп Solver 47Н с приставкой для исследования модуля Юнга и твердости на наноуровне;

— растровый электронный микроскоп фирмы Jeol 6510 LV;

— система микроанализа INCA Energy++ фирмы Oxford Instruments;

— исследовательский инвертированный микроскоп Axiovert 200 MAT;

— электронный измеритель шероховатости TR200;

— оптический профилометр NanoMap фирмы SEAP Technology (США).

#### *Список использованных источников*

1. Каталог услуг и измерительный потенциал. Выпуск 1. 2002, Тверь, Тверской ИнноЦентр.

2. Каталог услуг и измерительный потенциал региона Выпуск 2. 2011, Тверь, Тверской ИнноЦентр.

3. Каталог. Научно-технологическая продукция малых фирм университетских технопарков. Выпуск 2. 2010

4. Рыкалин Н.Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: справочник / Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, И.В. Зуев, А.Н. Кокора. - М.: Машиностроение, 1985. - 496 с.

5. Рыкалин Н.Н. Основы электронно-лучевой обработки материалов / Н.Н. Рыкалин, И.В. Зуев, А.А. Углов. - М.: Машиностроение, 1978. – 239 с.

6. Шиллер З., Гайзиг У., Панцер З. Электронно-лучевая технология. – М. Энергия, 1980. – 528 с.

## **EXPERIENCE OF DEVELOPMENT SCIENTIFIC-TECHNICAL AND ORGANIZATIONAL COOPERATION OF UNIVERSITY AND INDUSTRIAL ENTERPRISE**

**Y.A. Sokolov, STC "Electromechanics"**

**M.L. Misharin, Scientific and Methodological Center for innovation  
Graduate School of Tver State University**

**N.Y. Sokolova, Scientific and Methodological Center for innovation  
Graduate School of Tver State University**

This article discusses the possibility of cooperation between the university and industrial enterprises through the centers for collective use (CCU). To solve research problems in material engineering area the measurement instrumentation of Tver State University's collective use center was bewrite. A systematic approach to the design of reliable operation of electron-beam treatment was described.

**Key words:** *innovative development, integration of enterprises, creation of innovative infrastructure, prediction, analysis of models, titanium alloy, technology of electro-beam synthesis.*

*Об авторах:*

СОКОЛОВ Юрий Алексеевич, кандидат технических наук, главный конструктор НТК «Электромеханика», e-mail : s5577@inbox.ru

МИШАРИН Михаил Леонидович, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, начальник отдела, Научно-методический центр по инновационной деятельности высшей школы им. Е.А. Лурье, Тверской государственный университет, e-mail : mml1@bk.ru

СОКОЛОВА Наталья Юрьевна, младший научный сотрудник, Научно-методический центр по инновационной деятельности высшей школы им. Е.А. Лурье, Тверской государственный университет  
e-mail : snat5577@yandex.ru