

### Литература

1. Гуревич Я.Л., Горохов М.В. Режимы резания труднообрабатываемых материалов. Справочник: М., Машиностроение, 1986. 268 с.
2. Максимов Ю.В., Оленин Л.Д. и др. Сопоставительный анализ методов расчета процесса резания: М., Известия МГТУ «МАМИ», № 1(11), 2011. с. 159 – 169.
3. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов. М.: Высшая шк., 1974. 590 с.
4. Черепяхин А.А., Кузнецов В.А. Технология конструкционных материалов. Обработка материалов резанием: М., изд. Академия, 2011. 287 с.
5. Клепиков В.В. Комплексный подход к теоретическим и экспериментальным методам обработки зубчатых колес. Монография. М. издательство «Поиск», 2001. 577 с.
6. Черепяхин А.А., Виноградов В.М. Высокопроизводительное протягивание фасонных поверхностей. Монография: Deutschland, Leipzig, the publishing house Lambert Academic Publishing., 2012. 293 с.

### **Перспективы развития и применения физико-химических методов и технологий в производстве двигателей**

к.т.н. проф. Шандров Б.В., к.т.н. проф. Моргунов Ю.А., д.т.н. проф. Саушкин Б.П.  
*Университет машиностроения*  
8-916-376-83-56, [morgunov56mail.ru](mailto:morgunov56mail.ru)

*Аннотация.* В работе обоснована и подчеркнута роль технологий физико-химической обработки деталей машин в производстве наукоемкой техники. Обобщены и сформулированы основные направления развития таких технологий и средств технологического оснащения. Представлены основные области применения технологий электроэрозионной, электрохимической, лазерной обработки в производстве двигателей. Показана целесообразность и эффективность использования таких технологий для решения новых технологических задач, связанных с удалением припусков величиной 1...30 мкм с получением поверхностей с шероховатостью  $Ra = 0,2...0,4$  мкм.

*Ключевые слова:* технологии физико-химической обработки, технологии электроэрозионной, электрохимической, лазерной обработки, целесообразность и эффективность использования

Уровень индустриального развития и инвестиционной активности в машиностроении оценивается величиной потребления металлообрабатывающего оборудования на душу населения, выраженного в денежной форме. По данным ежегодного обзора мирового производства и импорта-экспорта металлообрабатывающего оборудования, подготовленного компанией Garduer Publications Inc. (США), Россия по этому показателю в 2008 году находилась на 28 месте, в то время как в начале 80-х годов СССР занимал 3 место [1].

Анализ машиностроительной продукции, выпускаемой наиболее развитыми странами, указывает на наличие корреляции между уровнем развития отдельной страны и долей наукоемкой продукции в структуре изделий машиностроительной отрасли [2]. Это соответствует общей устойчивой тенденции мирового рынка к возрастанию доли наукоемкой продукции в суммарном объеме производимых товаров и услуг [3–6]. Оценить уровень индустриального развития отдельной страны по этому показателю можно, сопоставив экспорт и импорт наукоемкой продукции. Так, общая доля машин, оборудования, транспортных средств, экспортируемых из России, составила в 2006 году около 5%, а импортируемых в страну – 46%. Доля России в мировом рынке наукоемкой продукции составляет около 0,3% [1].

Повышение доли выпуска наукоемкой продукции, все более глубокая переработка сырья и полуфабрикатов, разработка новых научных идей и принципов организации и развития производства, включая его электронную компоненту – производство средств управления и контроля – это основные задачи, решение которых позволит нашей стране сохранить и упро-

чить технологический суверенитет [3, 6].

Ускоренное развитие наукоемкого машиностроительного производства является необходимым условием выхода нашей страны из затянувшегося экономического кризиса и рассматривается в качестве первостепенной общенациональной задачи [2]. Приоритетным фактором такого развития является разработка и внедрение высокоэффективных технологий, базирующихся на новейших достижениях фундаментальных наук [3, 4]. К их числу относят технологии физико-химической обработки, такие как электроэрозионная (ЭЭО), электрохимическая (ЭХО), лазерная (ЛО) обработка материалов, в основе которых лежат немеханические процессы направленного разрушения твердых тел [7].

Круг задач машиностроительного производства, решаемых с применением электрофизических и электрохимических технологий, постоянно расширяется: появляются новые научные разработки, создается оборудование нового поколения [8–10]. Анализ литературных данных и патентно-лицензионной ситуации показывает, что инновационные процессы в этой области технологических знаний протекают достаточно интенсивно [11–13].

К числу наукоемких изделий машиностроительного производства, прежде всего, относятся двигатели различного функционального назначения и конструктивного исполнения. Именно двигателестроение является основным потребителем и пользователем технологий физико-химической обработки. Дело в том, что совершенствование энергетических машин сопряжено с применением новых, трудно обрабатываемых традиционными средствами материалов, применением пространственно сложных и маложестких конструкций в двигателях летательных аппаратов, решением совершенно новых технологических задач [7, 14].

Обобщение достигнутых результатов с учетом общих тенденций развития технологии машиностроения позволяет прогнозировать пути развития, место и роль указанных технологий в производстве поршневых, газотурбинных (ГТД) и жидкостных ракетных (ЖРД) двигателей в обозримом будущем.

1. Быстрый успех, достигнутый в прикладной области в 60-х...80-х годах прошлого века за счет преимущественно эмпирического и полуэмпирического подхода к разработке технологий и оборудования, привел к заметному отставанию теоретических разработок. Если теоретические исследования в области процессов взаимодействия лазерного излучения с веществом, процессов высокоскоростного анодного растворения и катодного осаждения получили заметное развитие [10, 15, 16], то разработка адекватных теоретических моделей процессов электроэрозионной обработки далеко не завершена. Это сдерживает разработку инженерных методик проектирования электроэрозионных технологий, заставляет технологов ориентироваться преимущественно на экспериментальные данные и предшествующий опыт [8].
2. Разработка технологических основ физико-химической обработки, создание достаточно простых и надежных методик расчета на основе адекватных моделей макро- и микроформообразования, переход от эмпирических и полуэмпирических знаний к теоретическому описанию процесса формообразования – важное направление прикладных исследований. Несмотря на достаточно большое число выполненных в этой области работ, инженерных методик, доступных широкому кругу цеховых технологов, явно недостаточно. CAD-CAM – системы, адаптированные к технологическим задачам в области физико-химических методов обработки, еще только создаются. Отсутствуют развитые банки и базы технологических данных, что затрудняет разработку высокоэффективных технологий.

Негативным явлением является односторонний подход к развитию отдельных методов обработки. Так, в области ЭЭО длительное время усилия специалистов концентрировались на разработке методов и средств интенсификации процесса. Достигнуты определенные успехи: создан высокопроизводительный способ размерной обработки дугой, скорость проволочной резки достигла 600...800 мм<sup>2</sup>/мин [8]. Следует признать, что разработка методов и средств повышения производительности ЭЭО является одним из основных условий сохранения и повышения конкурентоспособности электроэрозионной обработки. Однако в ряде практически важных задач производительность не является главным показателем эффектив-

ности технологии. Поэтому имеющуюся технологическую базу знаний необходимо расширять, в том числе за счет внедрения новых технических решений.

3. Разработка методов и средств повышения точности и качества обработанной поверхности является самостоятельной задачей технологий физико-химической обработки. Новые результаты в этой области делают возможным применение технологий ЭЭО, ЭХО и ЛО в микромашиностроении и при создании наноструктурных объектов [10, 13].

Так, при использовании импульсов напряжения длительностью 2 нс электрохимическим травлением никеля получены трехмерные структуры с размерами порядка 10...100 нм и глубиной 400 нм. Показана возможность изготовления структурных элементов размером 100...10000 нм различной конфигурации.

Технологии ЭЭО используют для изготовления миниатюрных объектов с размерами порядка 10 мкм. Расширяется спрос на оборудование для микро-ЭЭО, поэтому ведущие производители создали и совершенствуют модельный ряд станков для микрообработки.

При применении лазерных технологий нижняя граница получаемых размеров ограничена длиной волны излучения. Поэтому минимальный диаметр фокального пятна для газовых лазеров составляет 20...30 мкм, для твердотельных – 4...10 мкм. Работа в режиме испарения (длительность импульса – несколько десятков нс) позволяет снимать поверхностные слои толщиной ~ 1 мкм и менее, с глубиной зоны термического влияния примерно такого же порядка.

Считают, что в обозримом будущем применение указанных технологий в области микро- и нанообработки для изготовления элементов с размерами  $10^{-7} \dots 10^{-5}$  м будет расширяться.

4. Разработка новых способов обработки и их теоретическое обоснование являются методологической базой для создания новых технологий и оборудования. Так, расширение числа управляющих воздействий на процесс ЭХРО в результате применения биполярного импульсного тока, пульсирующего потока электролита и других факторов, привело к увеличению числа возможных комбинаций управляющих параметров и появлению значительного числа патентов на новые способы обработки. Этому способствовало также выявление новых физико-технических эффектов, влияющих на показатели качества обрабатываемого объекта.

В области ЭЭО появились четырех- и пятикоординатные проволочно-вырезные станки, обеспечивающие получение линейчатых поверхностей пространственно сложной формы, заметно расширяющие множество возможных конструкторских решений.

Достигнуты значительные успехи в области трехкоординатной лазерной обработки (лазерное фрезерование и гравирование).

Практика показывает, что далеко не все патенты реализуются в производственной деятельности, однако заложенные в них новые идеи аккумулируются и формируют общее направление развития данной области техники.

5. Наряду с применением метода прямого копирования формы инструмента получают все большее развитие электроэрозионные и электрохимические технологии для формообразования методом следов. Для их реализации создано специальное оборудование. Так, появились многокоординатные станки для электроэрозионной обработки вращающимся стержневым инструментом (SX-200 НРМ компании SARIX SA). Расширяется применение технологий и оборудование для электрохимической обработки с использованием диэлектрических масок и трафаретов [17].
6. Повышение уровня автоматизации является неременным условием развития технологий и оборудования как при технологической подготовке, так и при производстве изделий. Применение современных адаптивных систем управления станками, повышение уровня надежности таких систем, создание высокоэффективной системы сервиса – все это обеспечивает переход к безлюдным и безбумажным технологиям в практике применения технологий физико-химической обработки. Заметим, что уровень автоматизации и качество управления электроэрозионных станков заметно выше, чем электрохимических. Повы-

сился уровень автоматизации лазерного оборудования, особенно установок для резки и раскроя заготовок на базе линейных синхронных приводов.

7. Разработка научных основ, технологий и оборудования для защиты окружающей среды и безопасности жизнедеятельности при выполнении электрохимических и электроэрозионных работ является основополагающей задачей. Так, снижение масштабов применения ЭХО в промышленности Японии в конце прошлого века непосредственно связано с ужесточением законодательства по защите окружающей среды в этой стране. Поэтому созданы технологии утилизации вторичных продуктов ЭЭО и ЭХО и регенерации рабочих жидкостей, позволяющие эффективно эксплуатировать основное технологическое оборудование без техногенной нагрузки на окружающую среду.

В связи со сказанным необходимо продолжить, углубить и расширить работы по созданию относительно дешевых технологий переработки отходов и регенерации рабочих сред, создать базу данных по составу, концентрациям и токсикологическому действию продуктов разложения рабочих сред при высокоскоростном анодном растворении и при осуществлении мощных электрических разрядов.

8. Расширение номенклатуры материалов, трудно обрабатываемых резанием, вызывает необходимость постановки и проведения исследований по обрабатываемости этих материалов средствами ЭХО, ЭЭО и ЛО. Так, проблемными остаются вопросы обработки некоторых видов композиционных материалов, керметов, керамик. Считают, что технологические исследования в указанном направлении приведут к расширению области эффективного применения операций физико-химической обработки.
9. Создание новых и совершенствование существующих комбинированных методов обработки на основе или с привлечением методов ЭХО и ЭЭО позволяет успешно решить ряд новых технологических задач. К этому направлению примыкает создание интегрированных технологических систем на основе процессов физико-химической обработки. Получили промышленное применение и продолжают развиваться технологии электроэрозионно-электрохимической, электрохимикоультразвуковой, электрохимиколазерной, электрохимикоабразивной и других видов комбинированной обработки [18, 19].
10. Все большее значение в технологиях, основанных на физико-химических методах обработки, приобретают разработка и применение методов и процедур структурной и параметрической оптимизации. Расширяется информационная база, совершенствуются методы и средства технико-экономической оценки альтернативных технологических решений.

Одним из эффективных путей повышения эффективности является унификация технологий физико-химической обработки. Разработаны и продолжают совершенствоваться типовые и групповые технологические операции электрохимической и электроэрозионной обработки. Новые станки оснащают встроенными САМ-системами, системами автоматической смены инструмента, встроенными системами измерения геометрических параметров детали.

Высоким уровнем гибкости обладают лазерные технологические системы.

11. Наряду с использованием физико-химических методов обработки для реализации на их основе субтрактивных технологий, все больший интерес проявляется к их использованию в аддитивных технологиях. Создание технологий и оборудования для синтеза трехмерных объектов рассматривают как одно из самых перспективных направлений развития технологии машиностроения в XXI веке. Замена технологий, основанных на принципе съема материала, аддитивными технологиями, обеспечивающими послойное выращивание пространственно сложных объектов, привлекает все большее внимание инженеров и исследователей.

Интенсивные процессы катодного осаждения материалов в потоке электролита позволяют получать трехмерные структуры из меди и других металлов и сплавов. Процессы переноса материала электрода-инструмента на заготовку также используют для создания трехмерных структур при реализации низковольтного электрического разряда в диэлектрических, жидких средах [20]. Появились и активно развиваются технологии лазерной стереолитографии, DMD-технологии, основанные на прецизионном лазерном спекании металлических по-

рошков с созданием трехмерных структур.

Можно предполагать, что аддитивные способы и технологии формообразования, основанные на указанных выше процессах, будут развиваться и все шире внедряться в машиностроении и приборостроении.

12. Значительные технологические резервы могут быть выявлены и использованы при разработке новых рабочих сред для ЭЭО и ЭХО. Так, применение суспензий из алюминиевой пудры позволило значительно снизить шероховатость обработанной поверхности при ЭЭО, такой же эффект достигнут при проведении процесса ЭХО в некоторых неводных и водно-органических электролитах.

Необходимым условием успешного развития технологий ЭХРО является дальнейшее повышение технического уровня средств технологического оснащения. Совершенствование конструкций станков для этих видов обработки идет по пути их дальнейшей унификации, модульного принципа построения основных элементов, повышения геометрической и кинематической точности за счет применения новых конструкционных материалов, достижений в области мехатроники, современных приводов рабочих и вспомогательных движений [21].

Основные области применения технологий физико-химической обработки в производстве двигателей показаны в таблице 1.

Таблица 1

**Области применения технологий физико-химической обработки в производстве двигателей**

Тип двигателя, применение	Операции, изделия, материалы	Вид обработки
Газотурбинные авиационные двигатели и наземные установки	Охлаждающие отверстия диаметром 0,4...1,2 мм в деталях из жаропрочных сплавов и жаростойких высоколегированных сталей. Щелевые каналы, карманы в сотовых уплотнениях из жаропрочных сплавов. Для прошивочных операций при изготовлении пространственно сложных деталей используют высокопроизводительные 4- и 6-координатные электроэрозионные прошивочные станки [22]. Изготовление штамповой оснастки из жаропрочных сплавов на никелевой основе.	ЭЭО
	Лопатки компрессора высокого давления малой жесткости, моноколеса, аэродинамические занижения, маркировка.	ЭХО
	Раскрой и разделка листовых заготовок, маркировка. Сварка тонколистовых заготовок, лазерная стереолитография, прошивка отверстий.	ЛО
Жидкостные ракетные двигатели	Прошивка отверстий в форсунках, формообразование межлопаточных каналов в рабочих колесах и сопловых аппаратах ТНА.	ЭЭО
	Удаление дефектных слоев после ЭЭО, калибровка отверстий в форсунках, получение облегчений в деталях сложной формы.	ЭХО
	Раскрой и разделка листовых заготовок, сварка тонколистовых заготовок сосудов высокого давления, лазерное упрочнение.	ЛО
Поршневые двигатели внутреннего сгорания	Прошивка отверстий в форсунках, изготовление штамповой оснастки.	ЭЭО
	Калибровка отверстий, снятие заусенцев, скругление кромок.	ЭХО
	Раскрой и разделка листовых заготовок, сварка тонколистовых заготовок, лазерное упрочнение, маркирование.	ЛО

Объем применения технологий физико-химической обработки можно оценить имеющимся парком технологического оборудования. Так, на базовом предприятии авиационного двигателестроения эксплуатируются 186 единиц электроэрозионного оборудования, 32 единицы электрохимического оборудования, 9 единиц лазерного оборудования.

Таким образом, технологии физико-химической обработки востребованы в производстве двигателей и их применение в обозримом будущем будет расширяться.

### Литература

1. Гонялин С.И. Экспорт и импорт металлообрабатывающего оборудования России в 2007. // ИТО, № 3, 2008. с. 2–6.
2. Общероссийская дискуссия «Промышленность, наука и образование – пути развития и ожидаемые результаты». М.: Союзмаш РОССИИ. 2007. 70 с.
3. Саушкин Б.П. Инновационные процессы в области физико-химических методов и технологий. // Материалы Международного форума «Высокие технологии – стратегия XXI века». М.: Экспоцентр. 2009. с. 616–619.
4. Коваленко В.С. Нетрадиционные методы обработки материалов в Японии. / Электронная обработка материалов. 2000, № 3. с. 4–12.
5. Коваленко В.С. Машиностроение в новом тысячелетии. // Электронная обработка материалов. 2001, № 3. с. 60–68.
6. Соловьев В.П. Инновационная деятельность как системный процесс в конкурентной экономике. Киев: Наукова думка. 2007. – 168 с.
7. Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей / Под ред. Б.П. Саушкина. М.: Изд. Дрофа, 2002. 656 с.
8. Елисеев Ю.С., Саушкин Б.П. Электроэрозионная обработка изделий авиационно-космической техники. М.: Изд. МГТУ им. Н.Баумана. 2010, 437 с.
9. Саушкин Б.П. Электрический разряд в жидких и газовых средах – основа нового поколения методов и технологий машиностроительного производства. / Электронная обработка материалов. 2004, № 1. с. 8–17.
10. Технологические процессы лазерной обработки. / Под ред. А.Г. Григорьянца. М.: Изд. МГТУ им. Н.Баумана. 2006. 664 с.
11. Зайцев А.Н. Технологические преимущества и область применения электрохимической обработки. / Экономика и производство. 2003, № 4. с. 63–65.
12. Advances in EDM / Metalwork Prod. 2005, V. 149, № 9. P. 23.
13. Kozak J., Rajurkar K., Makkar J. Selected problems of micro EDM / J. Mater. Proc. Technol. 2004, V. 149, № 1–3. P. 426–431.
14. Гайлит Ю.Т., Саушкин Б.П. Технологическое обеспечение производства новых изделий / Крылья Родины, № 10. 2007. с. 35–40.
15. Саушкин Б.П., Атанасянц А.Г., Сычков Г.А. Современное состояние и перспективы развития электрохимической размерной обработки. / Металлообработка. 2002, № 6. с. 9–45.
16. Саушкин Б.П., Атанасянц А.Г., Сычков Г.А. Проблемы и перспективы развития импульсной электрохимической обработки. / Электронная обработка материалов. 2003, № 2. с. 10–22.
17. Моргунов Ю.А., Саушкин Г.Б. Электрохимическое нанесение информации на поверхность деталей машин. «Упрочняющие технологии и покрытия», 2009, № 12, с. 45–50.
18. Rajurkar K.P., Kozak J. Hybrid Machining Process Evaluation and Development // Proc. 2th Intern. Conference Machin. Measurements of Sculptured Surfaces.: Krakow. 2000. P. 501–536.
19. Саушкин Б.П. Комбинированные методы обработки в машиностроительном производстве. / Металлообработка. 2003, № 1. с. 8–17.
20. Саушкин Б.П., Юриков Ю.В. Исследование электроэрозионного нанесения функциональных покрытий на детали машин Справочник: Инженерный журнал. 2001, № 3. с. 28–34.
21. Моргунов Ю.А., Саушкин С.Б. Структурное моделирование и классификация способов электрохимической размерной обработки. Журнал «Известия МГТУ «МАМИ», 2011, № 1, с. 184–188.
22. Забельян Д.М., Рогов В.В., Митрюшин Е.А., Моргунов Ю.А., Саушкин Б.П. Скоростная электроэрозионная обработка пазов системы охлаждения жаровой трубы камеры сгорания. / Металлообработка, № 3, 2012. с. 16–20.