

УДК 533.9.004.14

А.М. Жукешов\*, А.Т. Габдуллина, С.П. Пак, А.У. Амренова,  
А. Кайбар, С.К. Кульжанова

НИИЭТФ, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы

\*E-mail: zhukeshov@physics.kz

### Принципы разработки вакуумных систем для плазменных приложений

**Аннотация.** В статье рассмотрены принципы разработки вакуумных систем для применения в плазменных технологических процессах. Показаны преимущества импульсной плазменной обработки и методов вакуумного плазменного напыления. Рассматриваются основные приемы автоматизации и коммутации вакуума.

**Ключевые слова:** плазменные технологии, метод вакуумного напыления, вакуумная установка.

В развитых странах уделяется большое внимание исследованиям в области вакуумных и плазменных технологий. Особенностью этих технологий является низкая стоимость сырья и высокая стоимость технологии в конечном продукте. По данным зарубежных ученых, рыночная стоимость 1 кг товарной продукции, производимой с помощью плазменных технологий, составляет 10-30 тыс. долл. США, что в 1000 раз выше, чем в машиностроении, и на порядок выше, чем в микроэлектронике. Потенциальный объем рынка вакуумного оборудования и технологий на его основе исчисляется миллиардами долларов.

В КазНУ им. аль-Фараби проводятся исследования в области диагностики плазмы и импульсных плазменных технологий. Вакуумное оборудование, основанное на процессе импульсного плазменного воздействия плазмы, открывает принципиально новые возможности для высокоэнергетического воздействия на материалы [1]. Все технологические возможности применения такого оборудования в настоящее время еще не исчерпаны. Поэтому необходимо создание опытно-промышленного производства вакуумного оборудования нового поколения, которое позволит занять пока еще свободную нишу на рынке высокотехнологичного оборудования для обработки и модификации поверхностных слоев материалов с высокими механическими, физико-химическими и эксплуатационными свойствами. Реализация данного проекта позволит организовать опытно-промышленное произ-

водство вакуумного плазменного оборудования и предложить на отечественный и зарубежный рынки новые инновационные технологии. Этот результат будет достигнут за счет вывода на рынок новых продуктов: автоматизированного вакуумного ионно-плазменного оборудования для осаждения сверхтвердых, функциональных покрытий на детали машин и механизмов, стекло и фурнитуру, вакуумно-дугового оборудования для модификации поверхностных слоев в материале импульсными низкоэнергетическими плазменными пучками, плазменных стерилизаторов, материалов медицинского назначения, создания производства услуг по защите от абразивного высокотемпературного износа рабочей поверхности режущего и штампового инструмента и т.д.

Детали машин и механизмов при незначительном износе (0,1-1,0 мм) рабочей поверхности не годятся для дальнейшей эксплуатации. Предложить технологическое решение данной проблемы возможно только на базе современных электронно-ионно-плазменных технологий [2]. Применение пучково-плазменных технологий в металлообработке, энергетическом и общем машиностроении, электронной и электротехнической промышленности, медицинской технике способно обеспечить значительную экономию материальных и энергетических ресурсов, экологическую чистоту производства, замещение вредных химико-термических технологий, увеличение ресурса работы деталей машин и технологического оборудования в 3-4 раза. Во

многих случаях становится возможным многократное увеличение ресурса работы. Изношенные детали машин в большинстве случаев подлежат переплавке и проходят полный цикл от изготовления металла, заготовки и новой детали, включая химико-термическую и термическую обработку, что требует больших энергетических и трудовых затрат. При переплавке изношенных деталей выгорает 20% металла, в первую очередь таких дефицитных и дорогостоящих элементов, как Cr, Ni и др. При ремонте машин затраты на запасные части составляют примерно 60% стоимости ремонта. Восстановление деталей, себестоимость которых в 1,5-3,0 раза ниже новых, значительно уменьшает стоимость ремонта машин.

Технологии импульсной модификации и упрочнения инструмента, деталей машин и механизмов уникальны и позволяют добиться более высоких прочностных свойств и ресурса работы изделий по сравнению с традиционными технологиями химико-термической обработки и нанесения покрытий, являясь при этом экологически чистыми. Однако производимые в рамках инновационных проектов пучково-плазменные энергокомплексы должны быть полностью автоматизированы и не уступать по качеству технологического дизайна лучшим мировым аналогам (компании Balzers, Sun coating Inc. США, Leibold heraeus Gmbx, Metaplass Corp. Германия и др.), при этом их цена должна быть в 2-2,5 раза ниже, для преодоления конкурентной борьбы.

В данной работе рассматриваются основные конструктивные предложения для будущей вакуумной установки с учетом вышеизложенных особенностей. Спектр вакуумного оборудования весьма многообразен. Вакуумное оборудование условно можно разделить на три большие категории, определяющие различия оборудования по: размерам вакуумной камеры, уровню предельного вакуума, назначению. Первая из них (по размерам вакуумной камеры) определяет размеры объектов – «участников» технологических процессов, и, соответственно, производительность оборудования и габариты вакуумных камер и систем. Вторая категория (по уровню предельного вакуума) характеризует тип применяемых средств откачки и тип вакуумных уплотнений установок. Третья (по назначению) связана, прежде всего, с различиями в оснастке вакуумных камер. В последнем разделе под оборудованием специального назначения подразумевается оборудование, не имеющее серийных аналогов.

**Таблица 1** – Категории вакуумного оборудования

По размерам вакуумной камеры	По уровню предельного вакуума	По назначению
Лабораторные установки и вакуумные посты Полупромышленные и промышленные установки для работы с малогабаритными изделиями Промышленные установки для работы с крупногабаритными изделиями (для технологических процессов с объектами, линейные размеры которых более 500 мм)	Низковакуумные системы (< 1 Торр) Системы со средним вакуумом (< 10 <sup>-3</sup> Торр) Высоковакуумные системы (< 10 <sup>-7</sup> Торр) Сверхвысоковакуумные системы (> 10 <sup>-7</sup> Торр)	Откачные посты Напыление Термообработка Плазмохимическое травление Эпитаксия (МВЕ) Электронная микроскопия Испытания и исследования Оборудование специального назначения

В начале исследований первый критерий не является актуальным, поскольку до завершения НИОКР достаточно малогабаритной полупромышленной установки. Увеличение размеров системы в дальнейшем можно компенсировать применением более мощных насосов. По второму критерию, наличие высокого вакуума не менее 10<sup>-7</sup> торр для импульсных дуговых установок является обязательным условием, поэтому в вакуумной системе должны быть высоковакуумные насосы. Что касается выбора высоковакуумных насосов, то для обеспечения требуемой производительности в условиях загрязнения вакуума продуктами эрозии и эмиссии материалов электродов при больших разрядных токах, характерных для импульсных установок, подходят турбомолекулярный и диффузионный типы насосов. Здесь окончательный выбор определяется удельными энергозатратами на выполнение цикла технологической операции. В этом контексте молекулярные насосы без водяного охлаждения более предпочтительны, учитывая немалую (до 500 л/с) скорость откачки современных турбонасосов. Что касается выбора форвакуумного насоса, вакуумные системы изготавливаемых установок могут быть укомплектованы средствами откачки различных типов, в том числе

безмасляными насосами. По третьему критерию, установка предполагает специальное назначение, а именно, многофункциональность. Здесь необходимо отметить, что в последнее время активно развиваются так называемые дуплексные технологии, которые сочетают два и более метода воздействия или несколько операций на одной установке. Учитывая накопленный опыт применения плазмы в технологии поверхности материалов, целесообразно развивать опытную установку по модульному принципу. В базовой комплектации это может быть камера для напыления традиционными способами, однако в максимальной комплектации необходимо предусмотреть использование дополнительной оснастки по желанию потребителя. Например, это может быть импульсный вакуумно-дуговой напылитель, импульсный плазменный ускоритель для очистки поверхности, импульсный магнетрон т.д.

Что касается принципов управления вакуумной установкой, то современное состояние электроники позволяет провести полную автоматизацию такого оборудования, однако, это напрямую связано с возможностями элементов коммутации и измерения вакуума, а также в наибольшей степени возможностями разрабатываемой оснастки. Для реализации системы управления установкой может быть использован контроллер промышленного стандарта PLC с графической операторской панелью на камере, предусматривающий также возможность управления установкой с компьютера.

Принципиальными моментами в данном направлении являются:

- разработка алгоритма автоматического управления вакуумной системой на начальном этапе и технологическим процессом в целом на конечном этапе;

- разработка системы измерения вакуума на основе твердотельных датчиков давления вместо устаревших ламповых;

- разработка схемы коммутации силового вакуумного оборудования на современной элементной базе с управлением через ПЛК в автоматическом режиме на основе обратной связи через датчики давления и других параметров.

Не вдаваясь в подробности автоматизации как таковой, остановимся на некоторых особенностях коммутации импульсных плазменных установок. Как известно, импульсные плазмен-

ные устройства работают в широком диапазоне токов от сотен миллиампер в стационарном режиме до сотен килоампер в импульсном режиме [3]. Напряжения также варьируются от нескольких десятков вольт до нескольких десятков киловольт. Причем такое сочетание возможно на одной установке, в плане разработки упомянутого выше оборудования для дуплексной технологии. Если для низковольтной аппаратуры есть широкий выбор полупроводниковых коммутирующих элементов, то в области высоковольтной техники выбор ограничен мощными вакуумными устройствами – разрядниками и игнитронами [2]. Полупроводниковые элементы для такой коммутации пока находятся на стадии экспериментальных разработок и стоят весьма дорого, даже для диапазона до 5 кВ. Вакуумные разрядники на диапазон токов сто килоампер необходимо откачивать, а ртутные игнитроны экологически небезопасны. И то, и другое является нежелательным дополнительным оборудованием. В связи с этим решение проблемы нам представляется по двум направлениям. Во-первых, это дополнительные НИР, направленные на создание неоткачиваемых управляемых вакуумных разрядников, так как на сегодняшний день промышленные образцы таких устройств предназначены в основном для защиты высоковольтных линий электропередач. Во-вторых, более оптимальный путь связан с разработкой устройств, обеспечивающих технологический процесс при более низких напряжениях по сравнению с уже известными аналогами такого оборудования. Например, путем подачи дополнительного потенциала на подложку и применением импульсов различной скважности можно добиться желаемых результатов обработки.

## Литература

- 1 Zhukeshov A. Plasma diagnostics in a pulsed accelerator used for material processing // *Journal of Physics. Conference series.* – 2007. – №63. – P. 012014 (7 p.)
- 2 Морозов А.И. Введение в плазмодинамику. – М.: Физматлит, 2006. – 560 с.
- 3 Ibraev B.M. Peculiarities of the generation of a plasmoid in a pulsed coaxial accelerator // *Journal of Engineering Thermophysics.* – 2003. – Vol.12. – P.183-190.

**Ә.М. Жүкешов, А.Т. Габдуллина, С. П. Пак, Ә.У. Әміренова, А. Қайбар,  
С.Қ. Құлжанова, Қ.Е. Құрманбаев**  
**Плазмалық қолданбаларына арналған вакуумдық жүйелерді жасау принциптерін жоспарлау**

Осы жұмыста плазмалық процестерде қолданатын вакуумды жүйелерді жоспарлау негізгі принциптері қарастырылған. Плазмамен өңдеу және импульстік плазма арқылы тозаңдату ерекшеліктері көрсетілген және автоматтау принциптерімен вакуумды қосу әдістері сарапталынған.

**Түйін сөздер:** плазмалық технологиялар, вакуум шаңдану әдісі, вакуумдық құрал.

**A. Zhukeshov, A. Gabdullina, S. Pak, A. Amrenova, A. Kaibar,  
S. Kulzhanova, K. Kurmanbaev**  
**Principles for the development of vacuum systems for plasma applications**

This article contains basic principles for the development of vacuum systems for use in plasma processes. Outlines the advantages of pulse plasma treatment and methods of vacuum plasma spraying. Explains the basic principles of automation and vacuum switch.

**Keywords:** Plasma technology, method of vacuum evaporation, vacuum unit.