

# ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ПЛАЗМА В НАУКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ



**Валентин Асташинский,**  
заведующий отделением физики  
плазмы и плазменных технологий  
Института тепло- и массообмена  
имени А.В. Лыкова НАН Беларуси,  
член-корреспондент

Бурное развитие физики плазмы связано с формулировкой в начале 50-х гг. прошлого века идеи магнитного удержания плазмы для реализации управляемого термоядерного синтеза, созданием термоядерного взрывного устройства (водородной бомбы), а также с началом освоения человеком космического пространства и необходимостью изучения процессов вхождения космических аппаратов в атмосферу Земли. В настоящее время это направление современной науки является одним из приоритетных и обеспечивает разработку новейших нау-

коемких технологий практически во всех важнейших сферах человеческой деятельности: от наноразмерных систем в микроэлектронике до космических приложений, включая машиностроение и металлургию, плазмохимию, энергетику, оборону, здравоохранение и биомедицину, экологию и т.д.

В Институте тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси исследования в области физики низкотемпературной плазмы были начаты с середины 50-х гг. На первом этапе изучались процессы переноса энергии и вещества при высоких температурах (2000–15 000 К).

Были выполнены теоретико-экспериментальные работы по диагностике плазменных потоков и процессов их взаимодействия с твердым телом, радиационно-конвективному теплообмену при гиперзвуковом обтекании осесимметричных затупленных тел, решению стационарных и нестационарных задач теплообмена при взаимодействии плазменных потоков с поверхностью аблирующих материалов, исследованию работоспособности тепловой защиты стенок с транспирационным охлаждением для газозатупленного ядерного двигателя. Кроме того, были проведены испытания различных композиций стекло-, асбо- и органоуглепластиков, углерод-углеродных композиций, графитов, металлов, керамик и других материалов в потоках низкотемпературной плазмы. Одновременно разрабатывались и создавались плазмотроны, обеспечивавшие получение потоков газа с параметрами, моделирующими натурные условия траектории спуска космических аппаратов, и служившие экспериментальной базой для всех перечисленных исследований.

Второй этап работ был связан с использованием плазменных технологий для решения широкого круга народнохозяйственных задач. Был разработан процесс плазмохимического получения ацетилена и технического водорода из природного газа в водородной плазме в совмещенном плазмотроне-реакторе, реализованы плазменные процессы получения полых стеклянных и керамических микросфер в плазмохимическом реакторе из порошкообразного сырья. На базе дуговых плазмотронов созданы исследовательские установки для изготовления углеродных нанотрубок и нановолокон из промышленного углеводородного сырья производительностью 50–120 г/ч с многостенными нанотрубками. Изучение плазменных процессов термической переработки многокомпонентных дисперсных материалов и диспергированных растворов в низкотемпературной плазме при наличии физико-химических превращений позволило получить методики теплового расчета плазменных (шахтной, камерной и двухкамерной) печей с плазмотронами постоянного и переменного тока.

Заметные успехи были достигнуты в последнее десятилетие в области развития плазменных и плазмохимических методов очистки и утилизации отходов, создания новых плазменных реакторов для обработки дисперсных материалов и растворов, переработки и уничтожения техногенных отходов (медико-биологических, химических, токсичных и радиоактивных), термической переработки отходов с целью получения топливных ресурсов.

Важным направлением исследований Института является экспериментальное изучение теплофизических характеристик образцов теплозащитных материалов, в первую очередь для перспективных космических аппаратов, в высокоэнергетических плазменных потоках. Плазмотронная установка ЭДПГ непрерывного действия позволяет проводить натурные экспериментальные исследования по испытанию новых теплозащитных материалов, определению их теплофизических свойств, динамике прогрева и уноса материалов систем тепловой защиты, в том числе в двухфазных

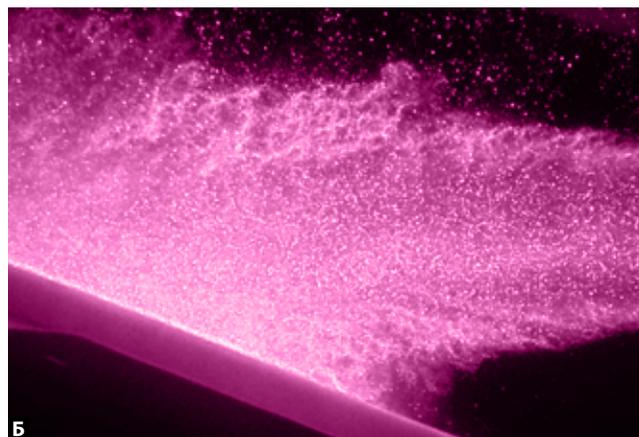


Рис. 1. Высокоэнергетическая плазмотронная установка ЭДПГ: А – экспериментальный стенд; Б – воздействие двухфазного плазменного потока на образец тепловой защиты

потоках плазмы, в широком диапазоне плотности мощности воздействия – 30–100 Вт/см<sup>2</sup> (рис. 1). Так, в 2017 г. в рамках проекта «ЭкзоМарс» с НПО им. С.А. Лавочкина были выполнены исследования по изучению теплофизических свойств систем теплозащиты десантного модуля, в том числе в условиях воздействия двухфазных плазменных потоков, а также ударной стойкости элементов экранной защиты модуля при воздействии высокоскоростных метеорно-техногенных тел, ускоряемых созданной принципиально новой двухступенчатой легкогазовой магнитоплазменной установкой.

С начала 2000-х гг. в Институте тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси получили дальнейшее развитие приоритетные исследования в области физики квазистационарных сильноточных плазмотермодинамических систем, что позволило сформировать новое научное направление, связанное с разработкой принципов получения высокоэнергетических компрессионных плазменных потоков в квазистационарных плазменных ускорителях,

в которых реализуется ионно-дрейфовое ускорение замагниченной плазмы. Эти научные результаты имеют приоритетный характер и определяют мировой уровень в данном направлении научных исследований. В частности, в физику плазменных ускорителей введены новые представления о ключевом влиянии ионно-обменных процессов в каналах квазистационарных плазменных ускорителей, образованных проницаемыми для плазмы и магнитного поля электродами, на ускорение, течение и сжатие замагниченной плазмы в присутствии собственных электромагнитных полей сложной конфигурации; разработана научная теория, связывающая характер распределения разрядного тока с ионно-обменными процессами в канале ускорителя. Генерируемые квазистационарными ускорительно-компрессионными плазмотермодинамическими системами нового поколения высокоэнергетические компрессионные плазменные потоки по совокупности параметров (скорость плазмы – 50÷200 км/с, температура и концентрация

заряженных частиц плазмы – 3÷15 эВ и 1016÷1018 см<sup>-3</sup> соответственно, длительность разряда – 100÷500 мкс) превосходят все существующие в настоящее время типы плазменных ускорителей.

Для изучения физических процессов в таких системах были разработаны новые оптические методики и оборудование, позволяющие проводить исследования высокоэнергетических компрессионных плазменных потоков интерференционно-теньевыми методами с пространственно-временным разрешением, такие как:

- *двухлучевой автоколлимационный интерферометр, который отличается от мировых аналогов компактностью, виброустойчивостью, минимальным количеством оптических элементов и размещением их на одной оси. Это обеспечивает простоту монтажа прибора на установках практически любой конфигурации и удобство его юстировки, что, в свою очередь, позволяет использовать его для динамического контроля в технологических процессах;*

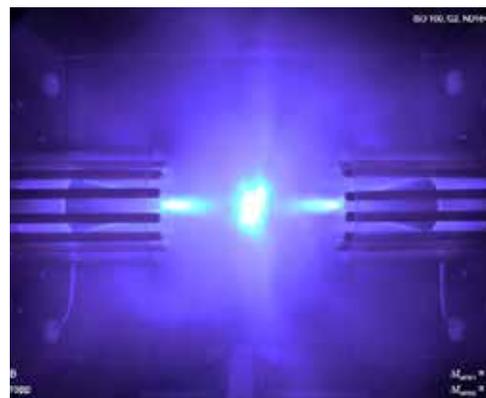


Рис. 2. Формирование квазистационарных высокоэнергетических плазменных образований при столкновении компрессионных плазменных потоков



Рис. 3. Принципы поверхностной плазменной металлургии

- кюветный интерферометр, предназначенный для исследования течений оптически прозрачных сред, ограниченных стенками канала, обладает высокой вибростойкостью и точностью измерений;
- сдвиговый интерферометр, имеющий широкий диапазон изменения чувствительности, что позволяет применять его для изучения динамических процессов в средах с высокими градиентами рефракции. Эти устройства являются основой для дальнейшего развития интерференционно-теневых систем различного целевого назначения;
- оптический датчик импульсного давления, отличающийся от известных устройств компактностью, минимальным количеством компонентов и их расположением вдоль одной оптической оси, чем достигается его невосприимчивость к вибрациям. Датчик позволяет по частоте модуляции интерференционной картины, образованной взаимодействием лазерного пучка, отраженного от измерительного торца акустического элемента с излучением в резонаторе лазера, найти

временную зависимость скорости вызванного импульсом давления сдвига воспринимающего торца акустического элемента и, в свою очередь, рассчитать временной ход давления.

С использованием высокоточных плазодинамических систем впервые при столкновении газоразрядных и эрозивных компрессионных плазменных потоков были сформированы квазистационарные сферические газоразрядные и эрозивные плазменные образования, устойчиво существующие более 50 мкс. Было показано, что, изменяя динамические характеристики взаимодействующих потоков, можно управлять параметрами, протяженностью и местоположением формируемого плазменного образования. В Институте создан уникальный квазистационарный сильноточный плазменный ускоритель КСПУ П-12х2 (рис. 2), который предназначен для генерации высокоэнергетических компрессионных плазменных потоков для решения ряда задач управляемого термоядерного синтеза (заполнение магнитных ловушек, моделирование условий на первой стенке реактора и др.), для эффективной модификации поверхностных свойств

материалов, а также для создания плазменных двигателей космического назначения.

Воздействие компрессионных плазменных потоков на различные материалы открывает принципиально новые возможности для управляемой модификации их поверхностных свойств. Совместно со специалистами кафедры физики твердого тела БГУ было предложено новое научное направление – поверхностная плазменная металлургия, в рамках которого разрабатываются методы эффективной структурно-фазовой модификации поверхностных свойств различных материалов при плазменно-энергетическом воздействии на них компрессионными потоками, что приводит к глубокому (15–100 мкм) плавлению поверхностного слоя, в том числе с легирующими тонкими покрытиями, жидкофазному перемешиванию в расплавленном слое легирующих элементов с подложкой и одновременному синтезу новых упрочняющих соединений – интерметаллидов, нитридов, карбидов и их твердых растворов (рис. 3). Такой энерго- и ресурсосберегающий подход, недоступный для других методов обработки, позволяет существенно улучшать эксплуатационные

характеристики материалов, широко используемых в промышленности (конструкционные и инструментальные стали, твердые и легкие сплавы, полупроводники и др.).

Реализация принципов поверхностной плазменной металлургии позволила впервые установить закономерности формирования глубокого (до 50 мкм) модифицированного слоя в образцах конструкционных и инструментальных сталей при воздействии на них компрессионных плазменных потоков (плазмообразующий газ – азот) с легирующими добавками титана, молибдена и хрома. Было показано, что при воздействии компрессионным плазменным потоком на пластины твердого сплава Т15К6 создается полностью проплавленный поверхностный слой (глубиной до 10 мкм), представляющий собой обогащенный вольфрамом твердый раствор (W, Ti) С с ячеистым концентрационным распределением металлов, за которым следует образовавшаяся область контактного плавления зерен карбидов. Проведенные на ЗАО «Амкодор-Уникаб» производственные испытания инструмента, изготовленного из этого сплава и применяемого в токарно-винторезных станках с ЧПУ, показали существенное

увеличение (более чем в 7 раз) его работоспособности: вместо 30 деталей при стандартной обработке – 216 деталей при использовании компрессионного потока.

При воздействии последнего на образцы титана ВТ 1.0 с предварительно нанесенным тонким слоем хрома получено существенное улучшение трибологических свойств поверхности, заключающееся в увеличении ее твердости в 1,5–2,5 раза и уменьшении коэффициента трения до 4,5 раз при глубине легированного слоя 15–20 мкм, а также установлены основные закономерности существенного улучшения эксплуатационных характеристик алюминия и его сплавов. Показано, что воздействие на них компрессионными плазменными потоками с добавками титана и молибдена приводит к формированию в модифицированном слое упрочняющих фаз (нитридов и интерметаллидов), позволяющих повысить микротвердость поверхностного слоя в зависимости от режимов обработки в 4–7 раз.

Впервые при направлении на пластины кремния потока, нагруженного металлическими мелкодисперсными частицами (Ni, Cu, Ta и др.), в течение длительности одного разряда (~100 мкс) магнитоплазменного компрессора были синтезированы поверх-

ностные объемные субмикронные структуры и покрывающие их наноструктурированные металлические кластеры, представляющие собой сферические образования (диаметром 50–200 нм), состоящие из наночастиц размером 10–30 нм. Их осаждение происходит на заключительной стадии разряда при завершении кристаллизации расплавленного слоя кремниевой подложки, что в совокупности и приводит к формированию наноструктурированных металлических покрытий на уже синтезированных цилиндрических структурах.

Принципы поверхностной плазменной металлургии были использованы при разработке и создании не имеющих аналогов элементов экранной противометеорной защиты космических аппаратов повышенной стойкости, содержащих двухслойные композиционные покрытия (вязкий металлический слой и слой из твердого керамического материала), модифицированные в результате воздействия компрессионного плазменного потока. Данные исследования были выполнены в рамках программы Союзного государства «Мониторинг-СГ» (2013–2017 гг.) совместно с коллегами из лаборатории сварки, родственных технологий и неразрушающего контроля НИПИ БНТУ (рис 4).

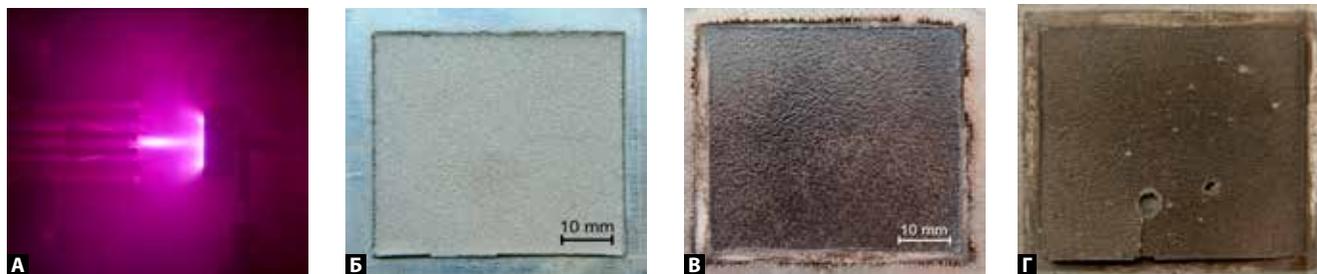


Рис. 4. Технологические принципы создания элементов экранной противометеорной защиты повышенной стойкости:

А – модификация элемента защиты при воздействии КПП; Б – элемент экранной защиты до воздействия КПП;

В – модифицированный элемент экранной защиты; Г – элемент экранной защиты после испытаний на баллистической установке

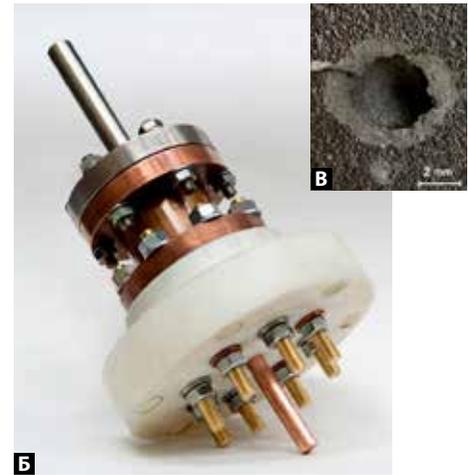
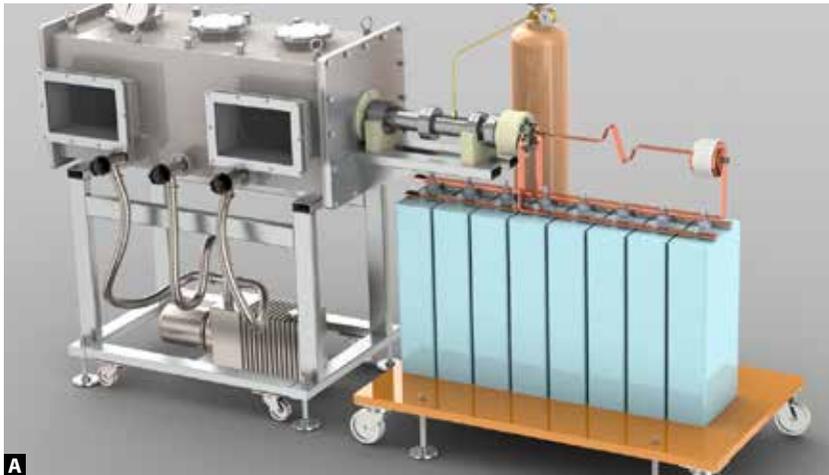


Рис. 5. Комбинированная магнитоплазменная баллистическая установка:

А – схема установки;

Б – активный (металлический) блок;

В – фрагмент элемента экранной защиты после воздействия графитового шарика диаметром 2,5 мм со скоростью 4,8 км/с

Для испытаний ударной стойкости элементов экранной противометеорной защиты в Институте была создана уникальная комбинированная магнитоплазменная баллистическая установка (рис. 5).

В ИТМО создаются компактные плазодинамические системы для получения маневренных двигателей космических аппаратов, в том числе с управляемым вектором тяги. В рамках научно-технической программы Союзного государства «Разработка комплексных технологий создания материалов, устройств и ключевых элементов космических средств и перспективной продукции других отраслей» («Технология-СГ», 2016–2020 гг.) были получены физические принципы создания и изготовлен не имеющий аналогов электро-разрядный тяговый элемент с секционированным внешним электродом для плазменного микродвигателя космического назначения, позволяющий управлять пространственной ориентацией вектора тяги за счет установления задан-

ной конфигурации электромагнитных полей, формируемых самосогласованным образом распределенными токами электроразрядной системы, и характеризующийся отсутствием подвижных механических узлов и внешних магнитных систем. Показано, что при изменении начального напряжения накопителя энергии с 1 до 3,5 кВ отклонение тягового плазменного потока от оси системы составляет 3–15 °С.

Дальнейшее развитие работ в области высокоэнергетических плазодинамических систем нового поколения позволит решить и ряд перспективных научных задач. Среди них разработка принципов ускорения макрочастиц высокоэнергетическими компрессионными плазменными потоками в квазистационарных плазодинамических системах, создание высокоинтенсивных плазменных источников излучения, создание и комплексные исследования квазистационарных магнитных ловушек (квадрупольного типа с  $\beta \sim 1$ ) для

удержания высокоэнергетической плазмы, а также способов ее нагрева, предназначенных для решения задач управляемого термоядерного синтеза и для глубокой модификации (обработки) полной поверхности многопрофильных деталей, разработка компактных электроразрядных плазодинамических систем для двигателей беспилотных и космических аппаратов, в том числе с управляемым вектором тяги, а также мощных маршевых двигателей для межпланетных перелетов.

Таким образом, сотрудники отделения физики плазмы и плазменных технологий проводят фундаментальные исследования высокоэнергетических плазменных потоков, которые открывают новые возможности для создания приоритетных технологий в различных сферах человеческой деятельности, в том числе для аэрокосмических приложений. ■

Материалы рубрики подготовили  
Ирина ЕМЕЛЬЯНОВИЧ,  
Юлия ВАСИЛИШИНА