

УДК 537.533

Мощные абляционные плазменные потоки для технологических применений

М. Н. Казеев

РНИЦ “Курчатовский институт”, Институт ядерного синтеза, Москва, Россия
e-mail: kazeev@nfi.kiae.ru

Абляционные импульсные плазменные ускорители производят плазменные потоки с длительностью от единиц микросекунд до миллисекунд, с минимальным диаметром ≈ 1 см, потоком частиц до 10^{26} см $^{-2}$ /с и скоростями до $\approx 10^7$ см/с. В работе рассмотрены методы применения мощных абляционных плазменных потоков для закалки, упрочнения, имплантации и изменения кристаллической структуры металлов. Показано, что взаимодействие импульсного потока CF_2 -плазмы с поверхностью металла приводит к существенному уве-

личению микротвердости некоторых стандартных сталей. Предложена и продемонстрирована схема имплантации примесей, введенных в плазменный поток, использующая столкновение плазменного потока с частицами примеси, распределенными в пространстве в виде пылевидной структуры. Электронно-микроскопические исследования поверхностных слоев металла показали, что плазменная обработка приводит к чрезвычайно сильному уменьшению размера зерен материала. При обработке плазменным потоком содержащим примеси, получена имплантация примеси на глубине 4 мкм с концентрацией 2—4 %.

Абляционные импульсные плазменные ускорители (АИПУ) являются хорошо известной разновидностью импульсных ускорителей плазмы. В этих устройствах плазма образуется в результате импульсного испарения изолятора, разделяющего разрядный промежуток. Такой метод подачи рабочего вещества в разрядный промежуток позволяет обеспечить согласование расхода вещества и параметров ускорителя. Это дает возможность реализовать на практике достаточно высокую эффективность преобразования энергии, запаасаемой в источнике питания, в кинетическую энергию плазмы [1, 2].

АИПУ производят плазменные потоки с длительностью от единиц микросекунд до миллисекунд, с минимальным диаметром ≈ 1 см, потоком частиц до 10^{26} см⁻²/с и скоростями до $\approx 10^7$ см/с. Выбором геометрических параметров АИПУ и параметров электрической цепи можно реализовать как газодинамический, так и электродинамический режим ускорения плазмы. В первом случае ускорение плазмы в канале ускорителя происходит за счет ее газодинамического расширения. В этом режиме магнитное давление на плазму меньше газокинетического. Исследования и разработки АИПУ этого типа в основном связаны с их применением в качестве космических электрореактивных двигателей [3]. В режиме электродинамического ускорения плазмы магнитное давление превышает газокинетическое, и ускорение плазмы происходит в основном за счет пондеромоторной силы, [JH]/с.

Мощные АИПУ (более 10^9 Вт) коаксиальной геометрии обладают эффективностью до 70 % при скоростях истечения плазмы в диапазоне 30—100 км/с. Максимальная концентрация плазмы достигает $\sim 10^{18}$ см⁻³. Генерируемый поток плазмы расширяется со скоростью порядка 10^6 см/с. Такие потоки плазмы при взаимодействии с поверхностью материала могут изменять его поверхностные свойства, не воздействуя на образец в целом.

При использовании в технологии АИПУ обладают рядом преимуществ, связанных с их относительно несложной, по сравнению с другими ускорителями плазмы, конструкцией (отсутствии быстродействующих клапанов, коммутирующих устройств, возможность увеличения длительности импульса до миллисекунд), сохранением рабочего тела в компактной форме, надежностью и т. д. Кроме того, ускоренный плазменный поток также имеет преимущества из-за его низкой стоимости по сравнению с лазерными [4] и рядом химических технологий. Важными факторами являются также возможность обработки больших поверхностей и относительно высокая энергия частиц, что обеспечивает достаточно высокую производительность.

Типичные энергии ионов достигают 3 кэВ с энергией плазмы в потоке от 0,1 до 100 Дж/см². Энергия, поглощаемая образцом, сначала распределяется в тонком скин-слое и далее распространяется в образец за счет теплопроводности.

В работе рассматриваются методы применения мощных абляционных плазменных потоков для закалки, упрочнения, имплантации и изменения кристаллической структуры металлов. Приводятся параметры установок для

генерации мощных плазменных потоков в широком диапазоне параметров и времени существования плазмы. Исследуется взаимодействие импульсного потока CF_2 -плазмы (на абляции политетрафторэтилена) плотностью $\approx 10^{16} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$, скоростью $7-9 \cdot 10^6 \text{ см/с}$ и временем существования $3-5 \text{ мкс}$ с поверхностью металла. Продемонстрирована схема имплантации примесей, введенных в плазменный поток, использующая столкновение плазменного потока с частицами примеси, распределенными в пространстве в виде пылевидной структуры.

Экспериментальная установка

Подробное описание установки содержится в работе [5]. Приведем наиболее существенные детали, необходимые для дальнейшего изложения. АИПУ коаксиальной геометрии располагался в вакуумной камере объемом $1,2 \text{ м}^3$, откачиваемой до давления $3 \cdot 10^{-5} \text{ тор}$. АИПУ запитывался от конденсаторной батареи, состоящей из 16 малоиндуктивных конденсаторов общей емкостью 115 мкФ . Собственная индуктивность каждого конденсатора составляла 35 нГн , максимальный разрядный ток 100 кА . Конденсаторная батарея соединялась с фидером АИПУ низкоиндуктивным кабельным мостом, состоящим из 48 сильноточных коаксиальных кабелей. Индуктивность кабельного моста (расчет) составляет около $3 \cdot 10^{-9} \text{ Гн}$. Ускорительный канал коаксиального АИПУ (рис. 1) состоит из медного анода с внутренним диаметром 12 см и катода диаметром 2 см . Плазма генерируется при абляции рабочего изолятора (политетрафторэтилен). Основной разряд в ускорительном канале запускается при пробое искрового промежутка. Максимальное зарядное напряжение при отсутствии коммутирующей аппаратуры определяется напряжением электрического пробоя по изолятору. Для политетрафторэтилена электрическое поле пробоя составляет 22 кВ/см . В качестве рабочих изоляторов также могут быть использованы полиэтилен, капрон, карбонитрид бора и т. д. Эксперименты проводились при напряжении на батарее до 15 кВ .

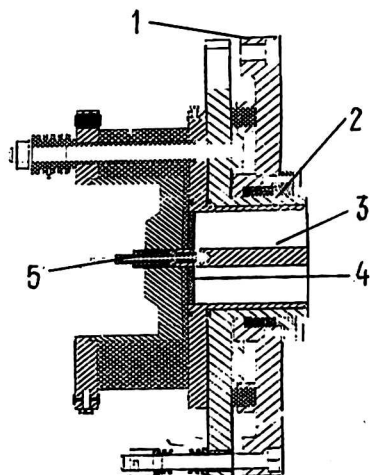


Рис. 1. Конструкция мощного АИПУ:

- 1 — вакуумный ввод; 2 — внешний электрод;
3 — внутренний электрод; 4 — тефлоновый
изолятор; 5 — поджигной электрод

Параметры потока плазмы

Основными параметрами при взаимодействии плазменного потока с образцом являются концентрация плазмы и скорость направленного движения и расширения потока. Определение скорости плазмы проводилось различными методами: из анализа интерферограмм, сигналов магнитных зондов, спектральными методами и др. Результаты измерений направленной скорости плазмы удовлетворительно согласуются между собой. Измерения показали, что распределение ускоряемой массы по скоростям достаточно компактно и при запасаемой в источнике питания энергии более 5 кДж средняя скорость плазмы составляет $7-9 \cdot 10^6$ см/с. Максимальная электронная концентрация в потоке плазмы составляет 10^{18} см $^{-3}$ (4 см от выхода из коаксиала). Поток в 1–2 см от выхода из ускорителя фокусируется до диаметра 1,5–2 см и далее расширяется со скоростью, приблизительно соответствующей температуре плазмы около 3 эВ. Основные характеристики плазменного потока и цепи питания для начального напряжения батареи 10 кВ приведены ниже.

Характеристики АИПУ для зарядного напряжения 10 кВ

Зарядное напряжение, кВ.....	10
Энергия батареи, кДж.....	5,7
Расход массы за импульс (C ₂ F ₄), г.....	10 $^{-3}$
Емкость батареи, мкФ.....	114
Время импульса (полупериод), мкс.....	5
Эффективность преобразования энергии, %.....	>50
Средняя скорость, см/с.....	$7 \cdot 10^6$
Обрабатываемая площадь, см ²	10–100
Угол расширения потока плазмы, град.....	10
Температура плазмы, эВ.....	3
Максимальная плотность плазмы, см $^{-3}$	10^{18}

До границы зоны взаимодействия с частицами примеси плазменный поток имеет:

- плотность плазмы $10^{16}-2 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$;
- скорость плазмы $\sim 10^7$ см/с;
- поперечное сечение потока плазмы ≤ 50 см².

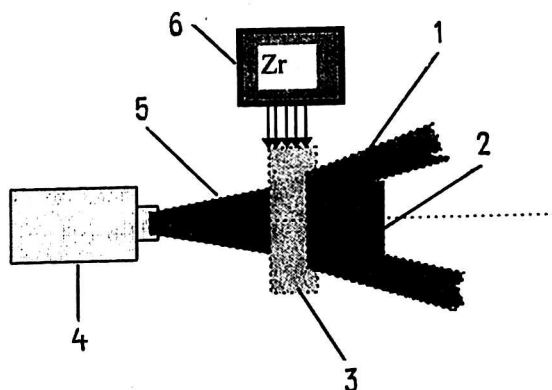
При высокой плотности частиц примеси плазменный поток не проходит через примесь или полностью термализуется. Расстояние между облаком пеллетов примеси и образцом составляет 150–200 мм. В работе исследовалось взаимодействие потока с частицами циркония, вольфрама и бора.

Введение примесей в поток плазмы

Выбор материалов для рабочего изолятора АИПУ и, следовательно, состава плазмы является ограниченным. Реальные технологии могут потребовать плазменные потоки с содержанием самых различных элементов. Изменить состав потока плазмы можно при взаимодействии потока с облаком достаточно мелких частиц. Успешные результаты были получены с массой примеси, меньшей, чем масса плазмы, и размером пеллетов $\sim 10^{-3}$ см. Схема введения примеси в мощный поток плазмы показана на рис. 2.

Рис. 2. Схема введения примесей в поток плазмы АИПУ:

- 1 — вторичный поток; 2 — образец;
3 — частицы примеси; 4 — АИПУ;
5 — первоначальный поток;
6 — инжектор



Некоторые результаты взаимодействия потока плазмы с образцами

Ст. 45 (закалка). Исследовано изменение микротвердости стали под действием одного или серии импульсов. Расстояние от источника до образца 200—250 мм, напряжение на конденсаторной батарее 10 кВ. Приведенные микрофотографии (рис. 3) показывают, что воздействие плазменного потока на образцы приводит к характерному изменению рельефа их поверхности. Исследованные образцы из Ст. 45 'а', 'б', 'с' с одной стороны были подвергнуты обработке плазменным пучком. Количество импульсов плазмы, которыми обрабатывались образцы, составило: 1 импульс для образца 'а', 5 — для образца 'б' и 15 — для образца 'с'.



Рис. 3. Типичные структуры поверхности образцов из стали Ст. 45 после обработки потоком плазмы АИПУ ($\times 420$)

На рис. 3 показан типичный вид структуры поверхности образцов 'а', 'б', 'с', соответственно, подвергнутой обработке плазменным потоком. Из микрофотографий видно, что обработка приводит к исчезновению рисок, существовавших на поверхности образцов в исходном состоянии. Кроме того, изменение количества плазменных импульсов при обработке поверхности образцов приводит к характерному изменению их рельефа. Поверхность всех трех образцов представляет собой совокупность впадин и выступов, причем характерные размеры последних колеблются в пределах 40—60 мкм.

Оценка изменения прочностных характеристик металла образцов после плазменной обработки проводилась посредством измерения микротвердости. Из приведенных результатов следует, что обработка стали Ст. 45 плазменным потоком приводит к существенному возрастанию микротвердости поверхностного слоя металла. Для образца "с" (15 импульсов) среднее значение микротвердости по всему образцу составило 902 кг/мм^2 . Воздействие одним плазменным импульсом приводит к увеличению среднего значения микротвердости поверхностного слоя металла по сравнению с исходным состоянием в 2,2 раза, воздействие пятью плазменными импульсами — в 2,4 раза, а воздействие пятнадцатью плазменными импульсами — в 3,4 раза.

Таким образом, обработка стали плазменным пучком может приводить к весьма значительному повышению микротвердости поверхностного слоя металла (Ст. 45) толщиной $\sim 1 \text{ мкм}$.

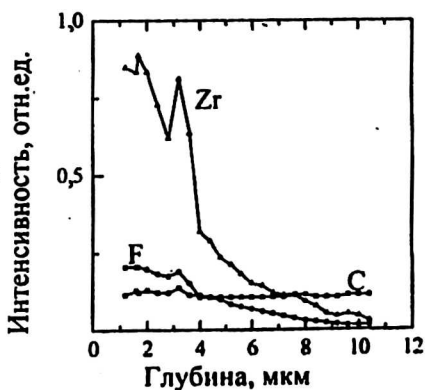
Аустенитная нержавеющая сталь (имплантация, модификация поверхностного слоя). Исследовались образцы из нержавеющей стали X18H10T в отожженном состоянии (6, 7). Эти образцы были подвергнуты воздействию пяти импульсов. Образец 6 экспонировался в потоке плазмы с примесью циркония. Масса примеси, введенной в поток, составляла около 1 мг. Экспонирование образца 7 проводилось в потоке фторуглеродной плазмы, генерируемом АИПУ без введения примеси.

Механические свойства поверхностных слоев металла образцов после плазменной обработки оценивались по измерению микротвердости. Результаты измерений показывают, что плазменная обработка образцов 6 и 7 не привела к заметным изменениям микротвердости поверхностных слоев металла.

Распределение углерода, фтора и циркония в приповерхностных слоях образцов 6 и 7 и измерение толщины модифицированного слоя были проведены методом вторичной ионной масс-спектрометрии (SIMS). Поверхность распылялась ионами O_2^+ с энергией 12 кэВ и плотностью тока $5 \cdot 10^{-4} \text{ А/см}^2$. Масс-спектрометрирование вторичных ионов показало наличие в поверхностном слое образцов углерода и фтора. В образце 7 не были обнаружены следы циркония, тогда как в образце 6 интенсивность ионов изотопов циркония была значительной.

На рис. 4 представлены результаты послойного профилирования поверхности образцов 6 и 7, полученные методом SIMS. Полная рассчитанная глубина травления поверхности образцов достигала 11 мкм. Прямое измерение глубины кратера распыления механическим профилометром оказалось невозможным в силу высокой шероховатости поверхности. Подобное распределение, но без циркония, было получено для образца 7. Максимальная глубина модифицированного слоя с высоким содержанием циркония и фтора в образце 6 составила 4 мкм (см. рис. 4). Распределение углерода, по-видимому, является суперпозицией профиля внедрения из разряда и его равномерным распределением как примесного элемента. Медленное уменьшение интенсивности циркония и фтора на глубине выше 4 мкм, вероятно, связано с появлением присущих методу SIMS "затянутых хвостов" послойных распределений. При условии примерно одинаковой шероховатости поверхностей образцов 6 и 7 толщина модифицированного слоя в образце 7 более чем в два раза ниже, чем у образца 6. Таким образом, результаты измерений профиля распределения атомов, присутствовавших в плазме в процессе обработки образцов, показывают, что глубина их проникновения в образцы примерно на три порядка превышает длину пробега соответствующих ионов (с энергией $\sim 2 \text{ кэВ}$) в железе.

Рис. 4. Распределение углерода фтора и циркония в поверхностном слое образца 6



Для выявления структурных изменений, вызванных плазменной обработкой образцов, а также для определения концентрации Zr в поверхностных слоях металла образца 6 были проведены трансмиссионные электронно-микроскопические исследования структуры различных по глубине слоев металла до и после плазменной обработки. Электронно-микроскопические исследования поверхностных слоев металла (на глубине $\sim 0,1$ мкм) образцов 6 и 7 показали, что плазменная обработка привела к чрезвычайно сильному уменьшению размера зерен материала. Если в исходном состоянии размер зерна составлял ~ 20 мкм (рис. 5), то после обработки размер зерна уменьшился до $\sim 0,1$ – $0,2$ мкм в образце 6 (рис. 6) и до $\sim 0,3$ – $0,5$ мкм в образце 7.



Рис. 5. Микроструктура нержавеющей стали X18H10T в исходном состоянии (увеличение $\times 25\ 000$ раз)



Рис. 6. Микроструктура ультрадисперсных зерен и новой фазы в поверхностном слое металла образца 6 после плазменной обработки с добавкой циркония ($\times 100\ 000$)

Исследования образца 6 после плазменной обработки с использованием рентгеновского микроанализа показали, что содержание Zr в поверхностных слоях металла составляет в среднем 2–5 мас. %. На рис. 7 показано присутствие пика Zr в характеристическом спектре рентгеновского излучения образца 6. В поверхностном слое образца 7, а также в глубинных слоях металла обоих образцов пик Zr отсутствует.

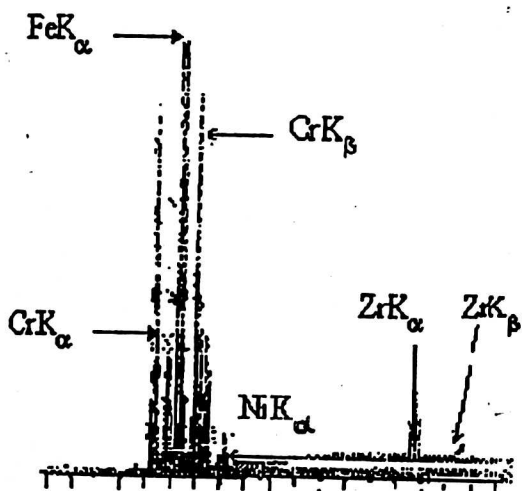


Рис. 7. Энергетический рентгеновский спектр, полученный от внутренних слоев образца 6, прошедшего плазменную обработку

Выводы

- В АИПУ с мощностью источника питания $\sim 10^9$ Вт и длительностью разряда около 5 мкс получены потоки плазмы, имеющие направленную скорость $(7-9) \cdot 10^7$ см/с, начальный диаметр 2–5 см и максимальную концентрацию около 10^{18} см $^{-3}$. Эффективность преобразования энергии источника питания в энергию направленного движения плазмы достигает 50 %.
- Разработана методика введения примесей в мощный импульсный плазменный поток.
- Проведены металлургические испытания обработанных материалов. При воздействии потока плазмы получено значительное увеличение твердости поверхностного слоя стали Ст. 45 (в 3,4 раза). Максимальное значение микротвердости поверхностного слоя составило 902 кг/мм 2 .
- При обработке плазменным потоком, содержащим примеси, получена имплантация примеси на глубине 4 мкм с концентрацией 2–4 %. Плазменная обработка приводит к сильному уменьшению размеров зерна (примерно на два порядка) в поверхностных слоях образцов. В результате средний размер зерна стали X18H10T уменьшился с 20 мкм до $\sim 0,1-0,2$ мкм.

Литература

1. Alexeev Yu. A., Vasiliev V. I., Kazeev M. N., Kisula V. V. Electromagnetic Pulsed Erosive Plasma Propulsions Study at I. V. Kurchatov Institute of Atomic Energy, Preprint IAE-5067/7, Moscow-1990.
2. Thomassen K. I. and Vondra R. J. Performance Improvements in Solid Fuel Microthrusters, AIAA paper 72-210 10 th Aerospace sciences Meeting, San Diego, CA, 1972.
3. Antropov N. N., Diakonov G. A., Kazeev M. N., Khodnenko V. P., Kim V., Popov G. A., Pokryshkin A. I. Pulsed Plasma Thrusters For Spacecraft Attitude And Orbit Control System, 26th International Propulsion Conference, Kitakyushu, Japan, October 17-21, 1999, IEPC 99-192; <http://www.nfi.kiaa.su//pmf&pdl/Papers/RiaKiafle.pdf>.
4. Mirzoev Kh., Panchenko V. Ya., Shelepin L. A. Laser control of processes in solids. Uspekhi Fizicheskikh Nauk, Russian Academy of Sciences. 1996. V. 39(1). P. 1-29.
5. Alexeev Yu. A., Kazeev M. N. Pulsed MPD-Thruster for Technology Applications, 24-th International Electric Propulsion Conference, IEPC-95-182, Moscow, September 19-23, 1995.

High power ablative pulsed plasma flows for technology applications

M. N. Kazeev

RRC "Kurchatov Institute", Institute of Nuclear Fusion, Moscow, Russia
e-mail: kazeev@nfi.kiae.ru

The opportunities for high power ablative pulsed plasma thrusters (APPT) developed at INF, RRC "Kurchatov Institute" within the framework of a program for studying the space plasma thrusters — to be used for technological purposes are considered in the paper. An experimentally based description of the plasma flow produced in high power APPT and its interaction with solid surfaces is presented. Experimental data include measured plasma flow parameters and metallographic study of different steels exposed in pulsed plasma flow. It is shown significant increase in steel Cr.45 hardness. For the stainless steel the plasma processing resulted in extremely strong reduction in the size of grains in the material. An implantation have been obtained with the depth equal 4μ and with the concentration 2–4 %. Experiments have shown the high power APPT is a competitive tool for surface processing of different materials.