

## ПЕРСПЕКТИВЫ ТЕХНОЛОГИИ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ УСКОРЕННЫМИ ИОНАМИ

ВОРОБЬЕВ В.Ф., канд. техн. наук, БЕЛЯЕВ Г.В., КРАЙКОВ А.Н. аспиранты

Рассматриваются вопросы модификации поверхности металлов при помощи имплантации ионов. Предложена новая технология ускорения ионов, предполагающая «энергетическую накачку» среды с последующим ускорением ионов непосредственно из плазмы газового разряда. Рассмотрена принципиальная схема экспериментальной установки ускорителя ионов и представлены результаты исследований.

*Ключевые слова:* долговечность деталей, обработка поверхности металлов, ускоритель ионов.

## THE PERSPECTIVE OF METAL SURFACE MODIFICATION TECHNOLOGY WITH ACCELERATED IONS

VOROBIOV V.F., Ph.D., BELYAEV G.V., KRAYKOV A.N., postgraduates

The article deals with the metal surface modification with the help of ion implantation. A new technology of ion accelerating with environment "power excitation" with subsequent ion acceleration directly from gaseous discharge plasma is suggested. The article concerns a particular experimental ion accelerator installation diagram and contains the results of the research.

*Key words:* parts durability, metal surface processing, ion accelerator.

Проблема повышения износостойкости и коррозионной стойкости материалов приобретает все большую актуальность в связи с непрерывно повышающимися требованиями к надежности и долговечности современных деталей машин. Основными материалами в производстве, из которых изготавливается большинство изделий, являются металлы и их сплавы. В необработанном виде эти материалы для изготовления деталей практически не используются из-за недостаточно высокой прочности и низкой износостойкости.

Эффективным и экономичным способом повышения долговечности деталей, работающих в условиях циклических нагрузок, контактной усталости и истирания, является создание на их поверхностях прочных, долговечных и коррозионно-стойких слоев. Вид и оптимальная толщина слоя, а также глубина проникновения зависят от режимов работы и назначения деталей и варьируются от долей микрометра до нескольких миллиметров. Упрочнение тонкого поверхностного слоя деталей из обычных конструкционных материалов позволяет экономить дорогостоящие легированные стали, цветные металлы и другие дефицитные материалы, повышать ресурс и надежность механизмов, снижать энергоёмкость производства, успешно решать проблему восстановительного ремонта в целях повторного использования изношенных деталей и т.д.

Известно много традиционных способов создания поверхностных слоев с целью улучшения рабочих свойств изделий. Наиболее широкое применение на производстве нашли методы поверхностной закалки, различные химико-термические способы обработки (цементация, азотирование, борирование и т.п.), наплавки, гальванические методы осаждения покрытий и т.д. Возможности этих методов к настоящему моменту в значительной мере уже исчерпаны. Так, например, частицы внедряемого за счет диффузии вещества не способны проникнуть слишком глубоко в обрабатываемый материал и создать на поверхности детали высокие концентрации. Чтобы повысить глубину проникновения внедряемой в деталь частицы, необходимо придать ей большую энергию, а для получения больших концентраций частиц вблизи поверхности – поддерживать низкую температуру обрабатываемой детали. В связи с этим в последнее время интенсивно развива-

ются новые методы упрочнения деталей, основанные на так называемых нанотехнологиях: воздействии на поверхность детали концентрированных потоков высокоэнергетических частиц (ионов, атомов, молекул и кластеров и т.д.). Ионная имплантация – одно из наиболее перспективных направлений в этой области.

Ионной имплантацией принято называть легирование тонких приповерхностных слоев твердого тела путем облучения поверхности пучком ионов, ускоренных до энергии  $10^4$ – $10^6$  эВ. Первые публикации по этой тематике датированы началом 60-х гг. XX в. и рассматривали технологии легирования полупроводников. Это направление доминировало вплоть до начала 80-х гг., когда параллельно с ним появилась и за несколько лет сформировалась новая ветвь в исследованиях и технологиях, получившая в последние годы название «имплантационная металлургия». Со второй половины 80-х гг. прошлого столетия это научное направление стало быстро развиваться и в ИГЭУ. Сотрудниками кафедры «Высоковольтные электроэнергетика, электротехника и электрофизика» были предложены новые подходы в решении задач по имплантации частиц газа непосредственно из плазмы тлеющего разряда, проведено теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение новой технологии ускорения ионов.

Суть предлагаемой технологии заключается в том, что необходимый для имплантационной технологии процесс ускорения ионов газовых частиц разбивается на два последовательных этапа. Первый этап – получение высокой степени ионизации газовой среды, находящейся в разрядном промежутке. По аналогии с процессами, протекающими в газоразрядных лазерах, его можно назвать «процессом энергетической накачки среды». Теоретическое обоснование необходимости получения высоких степеней ионизации газа в разрядном промежутке для достижения высоких энергий ионов, бомбардирующих поверхность обрабатываемой детали, приводится в [1, 2]. Действительно, ионы, двига-

раться ускоренно в электрическом поле, постоянно испытывают столкновения с нейтральными газовыми частицами и теряют при этом значительную часть энергии, которая расходуется на нагрев нейтральной компоненты. Учитывая, что вероятность ион-ионных столкновений мала (частицы имеют одинаковый положительный знак заряда), преодолеть этот негативный процесс рассеяния энергии ионами в технологии их ускорения можно, повысив степень ионизации газа, т.е. переведя как можно большую долю нейтральных атомов в ионизированное состояние. Значение энергии взаимодействия иона, ускоренного из сильно ионизированной плазмы, с обрабатываемой поверхностью детали можно ориентировочно оценить по формуле [1]

$$W^{(+)} \approx 2,2 \cdot 10^{12} \sqrt{\left(\frac{\delta}{\delta_H}\right) \frac{eBT}{N_0 \sigma_{tr}}}, \quad (1)$$

где  $W^{(+)}$  – энергия однозарядного иона, бомбардирующего поверхность катода, эВ;  $B$  – константа в формуле расчета ионизационного коэффициента Таунсенда, В/(м · Па);  $T$  – температура газа, К;  $N_0$  – плотность потока ударяющихся частиц (при давлении 133,29 Па и температуре 273 К), м<sup>-3</sup>;  $\sigma_{tr}$  – транспортное сечение столкновения ионов с молекулами газа, м<sup>2</sup>;  $e$  – элементарный заряд.

На втором этапе осуществляется ускорение ионов в межэлектродном промежутке непосредственно из плазмы газового разряда. Для реализации этого процесса к электродной системе прикладываются потенциалы высокого напряжения разной полярности. При этом обрабатываемая деталь должна находиться под отрицательным потенциалом. Быстрая смена полярности электродов приводит к тому, что в квазинейтральной высокоионизированной плазме тлеющего разряда будет наблюдаться процесс разделения зарядов: легкие, подвижные электроны будут быстро перемещаться к аноду, оставляя вблизи катода большой нескомпенсированный объемный заряд ионов. Анализ процессов на расчетных моделях методом крупных частиц показал, что практически все электрическое поле будет приложено к промежутку вблизи катода, причем длина этого промежутка значительно меньше длины свободного пробега ионов. Таким образом, ионы, преодолевая участок разрядного промежутка с сильным электрическим полем, получают энергию, достаточную для реализации технологии имплантации.

С целью экспериментальной проверки возможности осуществления предложенной технологии ускорения ионов непосредственно из плазмы тлеющего разряда была создана испытательная установка на базе серийно выпускаемого промышленностью вакуумного поста «Булат-3Т». В ее состав входят (рис. 1):

- вакуумная камера (1), в которой обеспечивается поддержание предельного остаточного давления до 10<sup>-3</sup> Па;
- высоковольтные емкостные накопители ВЕН1 (5) и ВЕН2 (6);
- разделительный высоковольтный импульсный трансформатор (7);
- блок управления технологическим процессом (8);
- система электродов в виде коаксиальных цилиндров. Внутренний электрод (3) моделирует обрабатываемую деталь, а внешний (2) выполняет двойную функцию: создает эффект потенциальной ловушки на первом этапе работы и служит анодом на втором этапе.

Принцип работы установки состоит в следующем. На первом этапе осуществляется «энергетическая накачка» газовой среды в электродной системе коаксиальных цилиндров импульсом, генерируемым

емкостным накопителем ВЕН1. Импульс отрицательной полярности длительностью несколько микросекунд подается на среднюю точку вторичной обмотки разделительного импульсного трансформатора. В результате электроды (2) и (3) получают одинаковые отрицательные потенциалы величиной до нескольких киловольт, становясь катодом по отношению к заземленному корпусу вакуумной камеры (1). Вследствие этого при достаточно высоком напряжении в полости между электродами (2), (3) зажигается тлеющий разряд особой формы – разряд с эффектом полого катода. В этом разряде реализуется эффект «потенциальной ловушки» для электронов. Выбитые с катодов (2), (3) электроны попадают в межэлектродную область и начинают двигаться по сложной зигзагообразной траектории, претерпевая большое количество ионизирующих столкновений с нейтральными молекулами газа [3]. В результате внутри электродной системы удается достичь степени ионизации плазмы, близкой к единице.

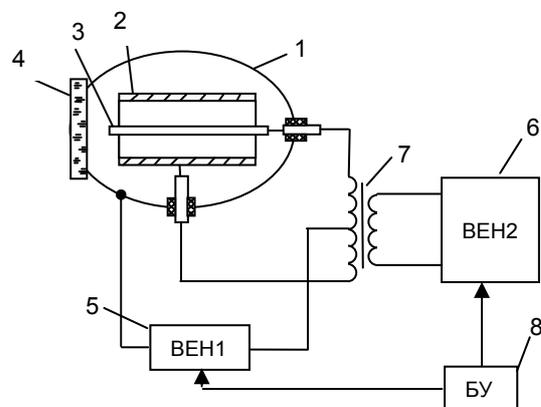


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – вакуумная камера; 2 – внешний цилиндр электродной системы; 3 – внутренний цилиндр электродной системы; 4 – смотровое стекло; 5 – емкостный накопитель ВЕН1; 6 – емкостный накопитель ВЕН2; 7 – импульсный трансформатор; 8 – блок управления

На втором этапе производится ускорение ионов в межэлектродном промежутке импульсом, вырабатываемым емкостным накопителем ВЕН2. Напряжение этого импульса увеличивается импульсным трансформатором (7) до ±50 кВ. Ускоряющее напряжение прикладывается между электродами (2) и (3). При этом электрод (2) становится катодом, а электрод (3) – анодом. Длительность импульса определяется временем разряда емкостных накопителей и составляет несколько десятков микросекунд.

Задержка генерации второго импульса относительно первого плавно регулируется блоком управления в пределах 1–100 мкс.

В экспериментальных исследованиях в качестве рабочего газа использовался азот. Во время экспериментов поддерживалось постоянное давление 10 Па.

Косвенной характеристикой степени ионизации газа можно считать мощность  $P_{уд}$ , выделяемую в единице объема межэлектродного пространства (2)–(3) [3]. На рис. 2 представлены графики зависимости удельной мощности  $P_{уд}$ , выделяемой во время этапа «энергетической

накачки», от амплитуды напряжения  $U$ , прикладываемого к электродной системе, для разных соотношений радиусов цилиндрических электродов (2) и (3). Диапазон напряжений, при которых проводились эксперименты, определялся напряжением зажигания разряда и напряжением, при котором происходило возникновение дугового жгутированного разряда.

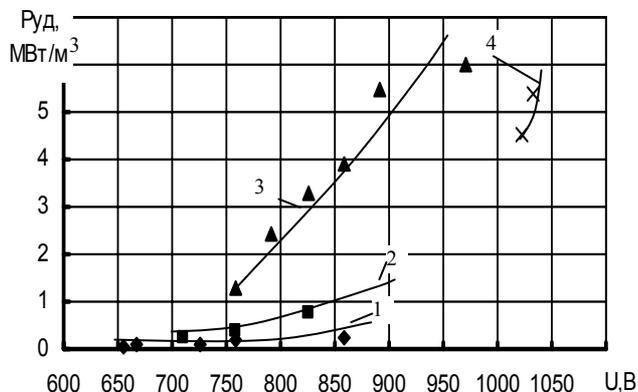


Рис. 2. Графики зависимости удельных мощностей электродной системы от напряжения при отношении радиусов электродов: 1 – 0,22; 2 – 0,36; 3 – 0,55; 4 – 0,73

Полученные результаты (рис. 2) показали, что степень ионизации возрастает с увеличением напряжения, прикладываемого к разрядному промежутку. Кроме того, она сильно зависит от расстояния между стенками электродов. На рис. 3 представлен график зависимости максимальной удельной мощности, которая может быть достигнута для данной электродной системы, от соотношения радиусов электродов. Анализ полученных данных (рис. 3) позволяет сделать вывод, что максимальная мощность достигается при соотношении радиусов электродов  $r/R = 0,55$ . Дальнейшее увеличение радиуса внутреннего электрода не ведет к увеличению удельной мощности. Исходя из этих соображений, в последующих опытах использовалось соотношение радиусов электродов, равное 0,55.

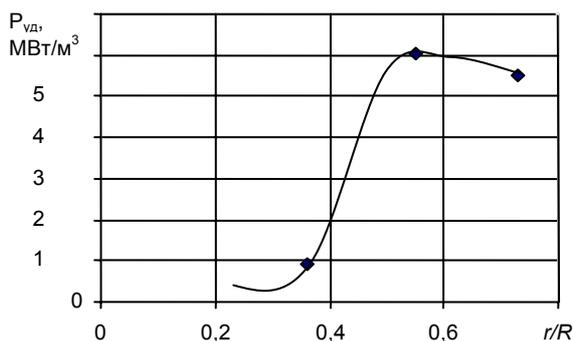


Рис. 3. График зависимости удельной мощности разряда  $P_{уд}$ , выделяемой в единице объема межэлектродного пространства полого катода, от отношения радиусов электродов  $r/R$

Чтобы оценить эффективность предложенной технологии, была произведена обработка образца – цилиндра, диаметром 30 мм, длиной 116 мм, из стали 38ХМЮА. Амплитудное напряжение импульса «энергетической накачки» составляло 950 В, амплитуда ускоряющего напряжения –  $\pm 50$  кВ. Задержка второго импульса относительно первого составляла 40 мкс. Частота подачи импульсов – 0,1 Гц. Результаты эксперимента представлены на рис. 4 (зависимость 1). Для

сравнения на рис. 4 приведен график зависимости микротвердости от времени обработки той же стали традиционным газопечным методом азотирования (зависимость 2) [4].

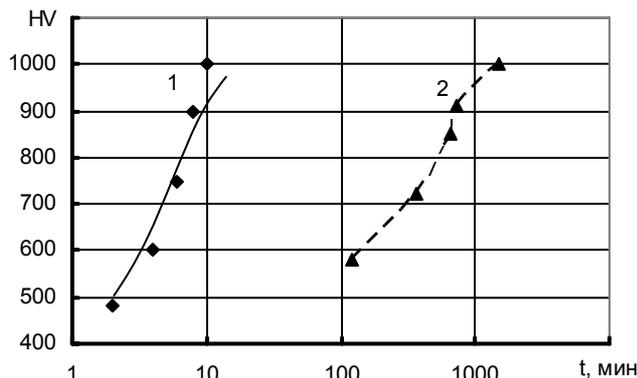


Рис. 4. Графики зависимости микротвердости стали 38ХМЮА от времени обработки: 1 – азотирование методом имплантации; 2 – газопечное азотирование

Результаты эксперимента (рис. 4) показали, что предлагаемая нами технология позволяет достичь той же микротвердости, что и газопечной метод азотирования (1100 HV), за меньшее время. При этом газопечной метод является более энергоемким. Микротвердость стали после обработки в экспериментальной установке увеличивается в 2,5 раза (рис. 5). Другое преимущество обработки потоками частиц состоит в более гибком управлении температурным режимом детали во время обработки путем изменения частоты следования импульсов в процессе обработки. Это направление представляет собой поле для дальнейших исследований.

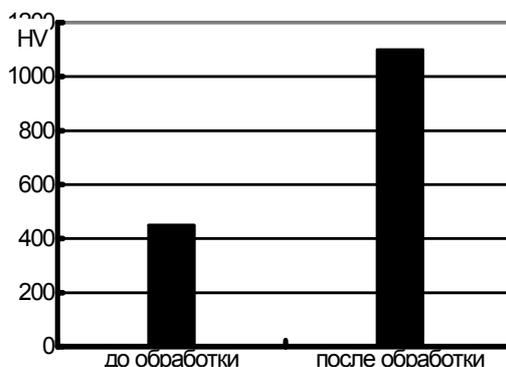


Рис. 5. Диаграмма изменения микротвердости образца до и после обработки в экспериментальной установке

Таким образом, предложенная технология ионной имплантации достаточно перспективна для обработки конструкционных и инструментальных сталей с целью придания их поверхности повышенной прочности.

#### Список литературы

1. Воробьев В.Ф., Ильин Н.В., Шипко М.Н. Повышение коррозионной стойкости постоянных магнитов в устройствах магнитожидкостных уплотнений // Вестник машиностроения. – 2002. – № 1. – С. 20–23.
2. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987. – 592 с.

**3. Оптимизация** электродных систем ускорителей ионов / М.Н. Шипко, В.Ф. Воробьев, Г.В. Беляев, А.Н. Крайков // Вестник ИГЭУ. – 2005. – № 1. – С. 70–72.

**4. Лахтин Ю.М., Коган Я.Д.** Азотирование стали. – М.:Машиностроение, 1976. – 256 с.

*Воробьев Виктор Федорович,*

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой высоковольтной электроэнергетики, электротехники и электрофизики,  
телефон (4932) 26-97-28,  
e-mail: vvf@vetf.ispu.ru

*Беляев Георгий Владимирович,*

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
аспирант кафедры высоковольтной электроэнергетики, электротехники и электрофизики,  
телефон (4932) 26-97-23,  
e-mail: vvf@vetf.ispu.ru

*Крайков Алексей Николаевич,*

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
аспирант кафедры высоковольтной электроэнергетики, электротехники и электрофизики,  
телефон (4932) 26-97-23,  
e-mail: vvf@vetf.ispu.ru