

08

## Комплексная технология вакуумно-дуговой обработки поверхности конструкционных материалов

© В.Н. Арустамов, Х.Б. Ашуров, Х.Х. Кадыров, И.Х. Худойкулов

Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН Узбекистана  
100125 Ташкент, Узбекистан  
e-mail: arustamov@aie.uz

(Поступило в Редакцию 5 сентября 2014 г.)

Создание экологически чистых и энерго-ресурсосберегающих технологий на основе вакуумного дугового разряда является актуальной научно-технической задачей. Катодные пятна вакуумной дуги в силу своей уникальной природы формируют процесс очистки поверхности изделия — катода от различных загрязнений, импульсное термическое воздействие на приповерхностные слои. Осуществление этих процессов комплексно с процессом вакуумного дугового нанесения покрытий, в одном технологическом цикле, позволяет существенно повысить эффективность методов изменения физико-механических и химических свойств поверхностей стальных изделий, направленных на существенное увеличение их срока службы. Изучение формирования температурного режима поверхности в процессе вакуумного дугового воздействия и параметров нанесенного покрытия позволит оптимизировать режимы комплексной обработки поверхности изделий и представляет значительный как научный, так и практический интерес.

### Введение

Наиболее доступным резервом экономии энергии, материалов и других видов ресурсов является увеличение срока службы изделий и технологического оборудования. Это достигается приданием рабочей поверхности изделий высоких прочностных, антикоррозионных и других эксплуатационных свойств соответствующей физико-химической обработкой и нанесением покрытий. На смену традиционным способам обработки поверхности и нанесения на нее покрытий приходят вакуумные, ионно-плазменные технологии. В отличие от традиционных методов очистки, обработки и осаждения покрытий вакуумные ионно-плазменные технологии, и прежде всего основанные на вакуумном дуговом разряде [1], более экономичны, эффективны и экологически безопасны. Воздействие вакуумного дугового разряда на поверхность металлического изделия — катода осуществляется в области катодных пятен (КП), формирующихся на его поверхности и создающих среду существования вакуумного дугового разряда. КП характеризуется малым временем существования ( $\sim 10^{-4}$  s), высокой плотностью тока ( $10^9 - 10^{10}$ ) A/m<sup>2</sup>, выделяемой энергией порядка  $10^{13} - 10^{12}$  Js<sup>-1</sup>g<sup>-1</sup> и температурой  $\sim (3-4) \cdot 10^3$  K при размере катодного пятна  $\sim 10^{-6}$  m. Процесс формирования новых КП взамен прекративших существование представляется их хаотическим перемещением по поверхности катода со скоростью до нескольких сотен метров в секунду в зависимости от состояния поверхности. Высокая концентрация энергии в быстро перемещающемся катодном пятне вызывает кратковременный, локальный разогрев поверхности в зоне его воздействия с последующим быстрым ее охлаждением, что способствует повышению механической прочности

деталей, улучшению их антикоррозионных свойств и других свойств изделия, а также обеспечивает очистку поверхности от различных загрязнений. Осуществление очистки и обработки поверхности изделия, нанесения покрытий на основе вакуумного дугового разряда позволяет совместить эти процессы в одном технологическом цикле и тем самым реализовать комплексный подход к модификации поверхности металлических изделий, обеспечивающий высокую экономическую эффективность вакуумного дугового метода.

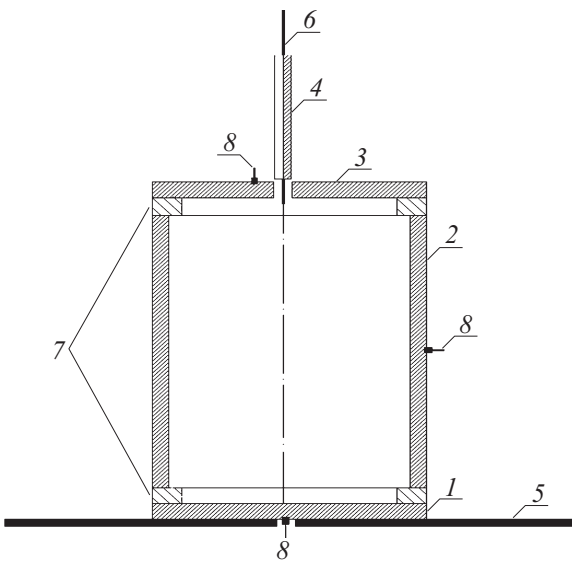
Работа посвящена определению зависимости между режимами очистки и температурой образца механическими свойствами обработанной поверхности на образцах низкоуглеродистых сталей, изучению и оптимизации режимов вакуумно-дуговой очистки, обработки с последующим нанесением покрытий, в едином технологическом цикле.

Особенность исследований заключается в том, что они направлены на оптимизацию процессов нанесения покрытий на предварительно обработанную (очищенную от окалины) поверхность металлических изделий посредством вакуумного дугового разряда. Предварительная обработка поверхности вакуумным дуговым разрядом приводит к возникновению модифицированного поверхностного слоя, свойства и толщина которого зависят от конкретного режима вакуумного дугового разряда в процессе очистки [2]. В этом случае оптимальный технологический режим предполагает не только получение желаемого свойства поверхности, минимизацию энергозатрат, но и нагрев поверхности изделия до температуры, необходимой для достижения высокой адгезии, при нанесении покрытия на обрабатываемую поверхность изделия.

## Изучение распределения тепловых потоков между элементами электродной системы вакуумного дугового разряда

Ключевым вопросом формирования процесса очистки и обработки поверхности изделия и нанесения на нее покрытий на основе вакуумного дугового разряда в одном технологическом цикле является создание условий для процесса осаждения покрытий. Это прежде всего нагрев поверхности изделия до соответствующей температуры. В связи с чем особую актуальность имеет изучение распределения энергии дугового разряда между элементами электродной системы, формирующей разрядное пространство, и соответствующего ему повышение температуры этих элементов. Для изучения этого вопроса разработана замкнутая электродная система для реализации импульсного вакуумного дугового разряда, представленная на рис. 1.

Основой электродной системы является цилиндрический электрод 2, внутренняя область которого формирует вакуумно-дуговое разрядное пространство. Торцевые диски электроды 1 и 3 локализуют пространство, в котором распространяется плазма вакуумной дуги. Указанные элементы этой замкнутой разрядной системы могут использоваться при реализации импульсного вакуумного дугового разряда в различных качествах. Электрод, не участвующий в реализации вакуумного дугового разряда, используется в качестве теплового зонда, стенки которого принимают энергию плазмы разряда в условиях ее нейтральности по отношению к разрядным электродам (аноду и катоду). Цилиндри-



**Рис. 1.** Схема электродной системы для измерения тепловых потоков в импульсном дуговом разряде. 1 — катод (медный диск), 2 — цилиндрический электрод, 3 — электрод (диск диаметром  $2 \cdot 10^{-2}$  м), 4 — поджигающий электрод, 5 — топодвод к катоду, 6 — токоподвод к поджигающему электроду, 7 — опорные, изолирующие элементы, 8 — термопары.

ческий электрод выполнен из меди и представляет собой цилиндр диаметром  $2 \cdot 10^{-2}$  м. Для реализации межэлектродного пространства с различными межэлектродными расстояниями использовались три цилиндра длиной  $L = 6 \cdot 10^{-3}$ ,  $11 \cdot 10^{-3}$ ,  $11 \cdot 10^{-3}$  м. Цилиндрический электрод установлен вертикально на дисковом электроде — катоде 1 диаметром  $21 \cdot 10^{-3}$  м и толщиной  $3 \cdot 10^{-3}$  м, на тефлоновых изоляторах 7 толщиной  $10^{-3}$  м и шириной  $2 \cdot 10^{-3}$  м, что обеспечивало хорошую тепло-электроизоляцию электродов друг от друга, а также вакуумирование внутреннего разрядного пространства через щели между цилиндром и диском — катодом. Измерение температуры элементов вакуумно-дуговой электродной системы осуществлялось тремя термопарами хромель-копель 8 диаметром  $2 \cdot 10^{-4}$  м. Рабочая часть термопары зачеканивалась в соответствующее отверстие в теле электрода со стороны, противоположной его рабочей поверхности. Подключение элементов дуговой разрядной системы и термопар к источникам электрического питания и приборам измерения осуществлялось тонкими медными проводниками, что обеспечивало минимизацию теплоотвода от элементов электродной системы и обеспечивало измерение их тепловых характеристик. Время остывания электродов до исходной температуры составляло не менее  $36 \cdot 10^2$  с. Источником электрического питания импульсного дугового разряда являлась „длинная линия“. Длительность импульсного дугового разряда варьировала от  $10^{-6}$  до  $5 \cdot 10^{-6}$  с, ток импульсного дугового разряда составлял 100–300 А. Генерация вакуумного дугового разряда осуществлялась искровым пробоем по поверхности диэлектрика поджигающего электрода 4, выбрасывающим плазменный факел в межэлектродный промежуток, инициирующий в дальнейшем импульсный дуговой разряд. Выброс инициирующего плазменного факела производился в отверстие, расположенное в центре верхнего диска — электрода. Питание искрового разряда осуществлялось от отдельного источника электрического питания высокого напряжения с током импульса 1–5 А и длительностью  $(10–20) \cdot 10^{-6}$  с. Поэтому вклад в тепловой баланс вспомогательным разрядом был пренебрежимо мал. Измерение температуры электродов осуществлялось с точностью до 1 К. Параметры дугового разряда (ток и напряжение) фиксировались с помощью запоминающего осциллографа, синхронизированного с импульсом искрового поджигающего разряда.

В первой серии измерений импульсный вакуумный дуговой разряд формировался между анодом диском 3 и катодом — диском 1, расположенными с противоположных торцов цилиндрического электрода. Его внутренняя полость локализует тепловое воздействие плазмы импульсного дугового разряда в пределах электродной системы. При этом цилиндрический электрод 2 использовался в качестве теплового зонда, электрически и теплоизолированного от анода и катода импульсного дугового разряда.

**Таблица 1.** Распределение тепловой энергии импульсного вакуумного дугового разряда между электродами в разрядной системе: анод—диск, тепловой зонд—цилиндр

Электродная система	Длина цилиндрического электрода, м	$U, V$	$Q_{arc}, J$	$Q_{an}, J$	$Q_{c.pr}, J$	$\eta_{an}$	$\eta_{c.pr}$	$\eta_{eat}$
Анод-диск	$L = 6 \cdot 10^{-3}$	33.6	$21.0 \pm 0.9$	$15.7 \pm 0.6$		0.75		0.132
Зонд-цилиндр		30.5	$33.0 \pm 0.2$		$3.9 \pm 0.4$		0.12	
Анод-диск	$L = 11 \cdot 10^{-3}$	33.0	$22.5 \pm 0.3$	$16.2 \pm 0.3$		0.72		0.133
Зонд-цилиндр		30.0	$35.4 \pm 0.1$		$1.55 \pm 0.1$		0.08	
Анод-диск	$L = 16 \cdot 10^{-3}$	41.0	$22.8 \pm 0.6$	$15.4 \pm 0.3$		0.68		0.135
Зонд-цилиндр		32.0	$33.9 \pm 0.7$		$1.35 \pm 0.2$		0.04	

**Таблица 2.** Распределение тепловой энергии импульсного вакуумного дугового разряда между электродами в разрядной системе: анод—цилиндрический электрод, тепловой зонд электрод—диск

Электродная система	Длина цилиндрического электрода, м	$U, V$	$Q_{arc}, J$	$Q_{an}, J$	$Q_{D.pr}, J$	$\eta_{an}$	$\eta_{D.pr}$	$\eta_{eat}$
Анод-цилиндр	$L = 6 \cdot 10^{-3}$	30.5	$33.0 \pm 0.2$	$24.4 \pm 0.7$		0.7		0.132
Зонд-диск		33.6	$21.0 \pm 0.9$		1.03		0.05	
Анод-цилиндр	$L = 11 \cdot 10^{-3}$	30.0	$35.4 \pm 0.01$	$21.6 \pm 0.4$		0.61		0.134
Зонд-диск		36.0	$22.5 \pm 0.3$		1.92		0.08	
Анод-цилиндр	$L = 16 \cdot 10^{-3}$	32.0	$39.9 \pm 0.7$	$32.3 \pm 4.5$		0.81		0.135
Зонд-диск		41.0	$22.8 \pm 0.6$		4.2		0.18	

Во второй серии измерений в качестве анода использовался цилиндрический электрод 2 и импульсный вакуумный дуговой разряд зажигался между ним и катодом — диском 1. При этом торцевой электрод — диск 3 являлся тепловым зондом, расположенным напротив катода — диска. В процессе измерений менялось расстояние между торцевыми дисками — электродами путем установки цилиндрического электрода 2 с соответствующей длиной:  $L = 6 \cdot 10^{-3}$ ,  $11 \cdot 10^{-3}$ ,  $16 \cdot 10^{-3}$  м. В процессе измерений изменялись ток импульсного дугового разряда и его длительность. Энергия, выделившаяся в дуговом разряде,  $Q_{arc}$  рассчитывалась по формуле

$$Q = IUt. \quad (1)$$

Тепловая энергия, поглощенная электродами (анодом —  $Q_{an}$ ) и зондами (диск —  $Q_{D.pr}$ , цилиндрическим электродом —  $Q_{c.pr}$ ) определялась по формуле

$$Q = cm \cdot \Delta T, \quad (2)$$

где  $c$  — удельная теплоемкость меди,  $m$  — масса электрода или зонда,  $\Delta T$  — температура, приобретаемая электродами в процессе реализации импульсного вакуумного дугового разряда и регистрируемая соответствующими термометрами. На основании полученных данных определялось относительное к энергии

импульсного вакуумного дугового разряда поглощение тепловой энергии дугового разряда электродами  $\eta_{an}$ ,  $\eta_{cat}$  и тепловыми зондами  $\eta_{c.pr}$ ,  $\eta_{D.pr}$ . Полученные результаты представлены в табл. 1, 2.

В табл. 1 представлены результаты измерений распределения тепловой энергии импульсного вакуумного дугового разряда, в электродной системе с анодом-диск и катодом-диск, в которой цилиндрический электрод является тепловым зондом. Полученные результаты показывают, что в указанной электродной системе количество теплоты, которое передается аноду-дису, в процессе горения дугового разряда составляет значительную величину, до 75% ( $\eta_{an} = 0.75$ ), относительно энергии импульсного вакуумного дугового разряда. С увеличением расстояния между катодом и анодом  $\eta_{an}$  снижается, но не существенно, до 10%. Относительная тепловая энергия, принимаемая изолированным, цилиндрическим тепловым зондом  $\eta_{c.pr}$ , составляет 11–12% от энергии дугового разряда и также снижается с увеличением расстояния между катодом и анодом, но более существенно на 30%. В табл. 2 представлены результаты измерений, характеризующих распределение тепловой энергии импульсного вакуумного дугового разряда в электродной системе, в которой анодом является ци-

линдрический электрод, а торцевой электрод — диск является тепловым зондом.

В электродной системе, в которой анодом является цилиндрический электрод, относительная тепловая энергия, выделяемая на аноде  $\eta_{ан}$ , имеет в среднем аналогичное значение порядка 71% энергии дугового разряда. При этом относительная тепловая энергия, принимаемая изолированным, тепловым зондом — диском, имеет более низкое значение  $\eta_{Д,пр}$  порядка 4%, которое возрастает с увеличением расстояния катод-анод до 18%. Доля тепловой энергии, приобретаемой катодом, составляет 12–13% от энергии импульсного дугового разряда и не меняется с изменением геометрии анода.

### Зависимость температуры поверхности образца от режима обработки вакуумно-дуговым разрядом

Целью данных исследований является определение режима вакуумно-дугового разряда в процессе обработки поверхности образца, обеспечивающего полную очистку поверхности от загрязнений и достижение значений температуры поверхности, необходимой для последующего вакуумно-дугового нанесения покрытий. Известно [3,4], что основным условием получения прочного сцепления металлических покрытий со сталью является то, что в момент нанесения первых слоев покрытия температура поверхности образца должна быть не меньше некоторых значений. Для этих целей применяется предварительный подогрев изделий. Характерной особенностью вакуумно-дуговой технологии является то, что она позволяет при нанесении покрытий в едином технологическом цикле использовать для предварительного нагрева поверхности изделия энергию, выделяемую в процессе вакуумно-дуговой очистки, и тем самым сэкономить общие энергозатраты. Поэтому важно знать, до каких температур прогревается образец при различных режимах очистки и обеспечивается ли необходимая температура поверхности образца для нанесения покрытий. Применяемая для измерения температуры электрода хромель—алюмелевая термопара обеспечивает измерение температуры до 1573.15 К, имеет практическую линейную термоэлектрическую характеристику и высокую чувствительность порядка  $0.15 \cdot 10^{-6}$  В/К. Изучение зависимости между режимом обработки поверхности образца вакуумно-дуговым разрядом и температурой его поверхности проводили на образцах размером  $(2.5 \times 100 \times 600) \cdot 10^{-3}$  м из Стали 3 (ГОСТ380-71, химический состав которой: С-0.22, Р-0.05, Si-0.055). Измерения проводились при скорости очистки 0.01 м/с и токах дуги 150–350 А, что выражено в поверхностной плотности заряда  $C/m^2$ . Обработку поверхности образца проводили за один, два и три прохода двумя анодными блоками. Температуру образца измеряли по окончании работы второго анодного блока (50 с) перед

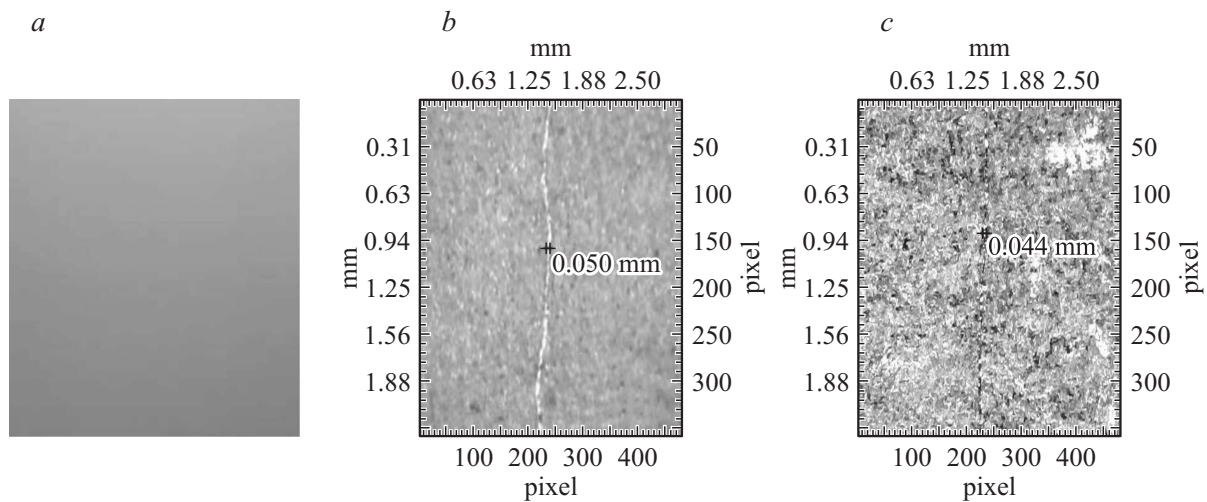
**Таблица 3.** Зависимость температуры образца от режимов обработки

Режим обработки $10^4 C/m^2$	Средняя температура образца, К	Поверхностная плотность заряда $10^{-2} C/m^2$
36.5	499.15	0.073
17.6	361.15	0.048
35.0	414.15	0.085
71.8	579.15	0.12
44.0	447.15	0.098
112.0	656.15	0.17

нанесением покрытия на образец. Результаты исследований представлены в табл. 3. Полученные результаты позволили определить поверхностную плотность электрического заряда, обеспечивающую нагрев поверхности образца на один градус. Для указанных сортов стали она имеет значение  $(0.38–0.257) \cdot 10^4 C/m^2K$ . Полученное значение позволяет формировать режим вакуумно-дугового разряда при обработке поверхности образца, обеспечивающий достижение обрабатываемой поверхностью необходимого значения температуры, что является определяющим для реализации последующего нанесения покрытий вакуумно-дуговым методом в едином технологическом цикле. Например, для полной очистки указанного выше образца необходимая поверхностная плотность заряда составляет  $(112–115) \cdot 10^4 C/m^2$ . Учитывая величину поверхностной плотности заряда в процессе вакуумно-дуговой обработки, необходимой для нагрева обрабатываемой поверхности на 274.15 К, следует, что поверхность образца нагреется до 708.15 К, что согласуется с данными проведенных исследований.

### Нанесение покрытия в едином технологическом цикле на основе вакуумного дугового разряда

Одним из важнейших факторов, определяющих основные свойства покрытий: структуру, адгезию, механические и коррозионные свойства, является температура подложки в процессе осаждения на нее покрытий. Причем требуется нагрев до сравнительно высоких температур, что не всегда приемлемо для изделия, в связи с изменением его свойств. С учетом полученного значения поверхностной плотности заряда, повышающей ее температуру на один градус в процессе ее очистки, определяются соответствующие режимы очистки: скорость и токи дугового разряда. Для исследования процесса нанесения покрытий использованы образцы из стали 08 КП. Химический состав стали по ГОСТ 1050-74 следующий: (%) С-0.05, Мп-0.25, Si-0.03, S-0.04, Р-0.04, Ст-0.03, Ni-0.25. Очистку и напыление образцов производили в вакууме  $5 \cdot 10^{-2}$  Па при скорости очистки 0.01 м/с и токе дуги 150–350 А. Температура поверхности об-



**Рис. 2.** Фотографии нанесенного покрытия из нержавеющей стали (*a*) и оптического электронного микроскопа (увеличение до  $\times 500$ ) покрытия нержавеющей стали (*b*) с царапиной, металлического образца нержавеющей стали с царапиной (*c*) при нагрузках 100 g.

разца в начальный момент нанесения покрытия была в пределах (473.15–523.15) К. Достижение этого значения температуры поверхности обеспечивали два вакуумных дуговых разряда, горящие одновременно, при токе разрядов 350 А и скорости перемещения образца 0.1 м/с. В режиме нанесения покрытия ток вакуумного дугового разряда составлял 150 А, а падение напряжения на дуговом промежутке 23 В. Осаждение покрытий на обработанную поверхность образца осуществлялось со скоростью напыления  $0.035 \cdot 10^{-6}$  м/с, толщина нанесенного покрытия составила  $(10-11) \cdot 10^{-6}$  м. В [5] показано, что вакуумно-дуговая обработка поверхности стали перед нанесением покрытий, как и при обработке тлеющим разрядом, позволяет наносить покрытия, не ухудшая их качества, при значительно меньших температурах конденсации. На рис. 2, *a* представлен образец с осажденным покрытием нержавеющей стали. Полученные покрытия сплошные, не имеют отслоений, характеризуются однородностью и отсутствием островковых включений. Также отсутствуют сколы и другие макронарушения. Определение прочности сцепления покрытий осуществлялось методом царапания. Измерение адгезии царапанием исследуемой поверхности заключается в измерении ширины образуемой тончайшей канавки. На рис. 2, *b, c* представлены фотографии по-

крытия нержавеющей стали с царапиной (*b*) и металлического образца нержавеющей стали с царапиной при нагрузках 100 g.с. Ширина царапин (канавки) измерялась на оптическом электронном микроскопе. В качестве царапающего острия использовался индентор с радиусом закругления острия  $\sim 8 \cdot 10^{-5}$  м, изготовленный из твердого сплава, перемещающийся со скоростью  $3.3 \cdot 10^{-4}$  м/с. Полученные значения ширины царапин нанесенного покрытия из нержавеющей стали и образца напыляемого материала (нержавеющая сталь) под нагрузками 50 и 100 g приведены в табл. 4.

Полученные результаты по оценке прочностных свойств, сцепления покрытия из нержавеющей стали и образца напыляемого материала (нержавеющая сталь) методом царапания показывают, что нанесенное покрытие сохраняет прочностные свойства, присущие металлическому образцу, т.е. нержавеющей стали. Таким образом, покрытие, нанесенное из плазменного потока дугового разряда, имеет структуру и стехиометрический состав, соответствующие напыляемому материалу.

## Обсуждение результатов

Количество теплоты, которое передается как аноду-диску, так и аноду-цилиндрическому электроду в процессе горения дугового разряда практически одинаково и составляет 70–75% относительно энергии импульсного вакуумного дугового разряда в замкнутой электродной системе. С увеличением расстояния между катодом и анодом  $\eta_{ан}$  снижается не существенно, 10%. Доля тепловой энергии, принимаемой изолированным, цилиндрическим тепловым зондом, составляет 11–12%, а тепловым зондом-диском имеет более низкое значение порядка 4%. Тепловая энергия, приобретаемая электродом — катодом, не меняется при изменении геометрии

**Таблица 4.** Ширина царапины при испытании прочностных свойств покрытия из нержавеющей стали

Единица измерения	Ширина царапины под нагрузкой			
	образец из нержавеющей стали		покрытие нержавеющей стали	
g	50	100	50	100
$m \cdot 10^{-2}$	0.038	0.050	0.032	0.044

анода, так как получает ее не из плазмы вакуумного дугового разряда, а в процессе ионной бомбардировки его поверхности в зоне катодного пятна и джоулевой энергии, выделяемой в теле катода при прохождении электрического тока к нему. Поэтому передаваемая катоду тепловая энергия определяется катодным падением потенциала и электрическим током, проходящим в теле катода в процессе горения импульсного дугового разряда, и не зависит от конфигурации электродной разрядной системы.

Для нагрева поверхности образца на один градус при ее вакуумно-дуговой обработке необходима поверхностная плотность электрического заряда  $(0.238-0.257) \cdot 10^4 \text{ C/m}^2 \cdot \text{K}$ . Образцы сталей X15CrNiSi-25-20 и X10CrMoVNb9-1, очищенные вакуумно-дуговым методом, имеют более низкую коррозионную стойкость, чем образцы, очищенные механически. Образцы низкосортных сталей, очищенные вакуумно-дуговым методом, имеют более высокую коррозионную стойкость, чем образцы, очищенные механически. Процесс очистки поверхности катода заключается в испарении окалины перемещающимися катодными пятнами, имеющими весьма высокую среднюю температуру в ограниченной локальной области поверхности (3273.15–4273.15) К, а также примесей в приповерхностном слое. В результате чего происходит перераспределение примесных элементов в приповерхностном слое. Поверхность образца — катод обогащается примесями с более низкой теплотой испарения и более высокой вероятностью ионизации, и наоборот, обедняется примесями с противоположными свойствами. Нержавеющие стали содержат специальные легирующие примеси, повышающие коррозионную стойкость материала, можно предположить, что происходит обеднение приповерхностных слоев легирующими примесями.

## Заключение

Показано, что объединение в едином технологическом цикле наиболее производительных и прогрессивных способов: очистки загрязненной металлической поверхности и нанесение защитных покрытий на нее, основанных на вакуумно-дуговом разряде, позволяет существенно повысить эффективность методов изменения физико-механических и химических свойств поверхностей стальных изделий, направленных на существенное увеличение их срока службы.

Полученная зависимость между режимами очистки и температурой образца позволила установить значения поверхностной плотности заряда, необходимой для нагрева изделий на 1°К, которая составляет величину  $(8.7-9.4) \text{ C/m}^2$ , что позволяет оптимизировать режимы комплексной обработки поверхности изделий вакуумно-дуговым методом. Вакуумно-дуговая технология очистки, обработки металлической поверхности изделий существенно улучшает ее адгезионные, коррозионные

свойства, а вакуумно-дуговое, ионно-плазменное нанесение покрытий из специальных сталей (нержавеющая сталь) на поверхность изделий из простых сортов стали обеспечивает сохранение структуры и стехиометрического состава напыляемого материала.

## Список литературы

- [1] Булат В.Е., Эстерлис М.Х. // Физика и химия обработки материалов. 1987. № 3. С. 49–53.
- [2] Пожаров С.Л., Миркаримов А.М., Солдатов И.В. // ЖТФ. 1998. Т. 68. Вып. 11. С. 57–62; Technical Physics Journal of American Physics. 1998. Vol. 43. N 11. С. 1323–1328.
- [3] Покрытия и обработка поверхности для защиты от коррозии и износа / Под ред. К.Н. Страффорда, П.К. Датты. М.: Металлургия, 1991. 240 с.
- [4] Зимин А.Д. Адгезия пленок и покрытий. М.: 1977. 352 с.
- [5] Булат В.Е., Кейтлин Л.Г. и др. // Докл. АНУзССР. 1982. № 11. С. 16–18.