

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ ДВИЖУЩЕЙСЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЛЕНТЫ ПРИ МНОГОЗОННОЙ ОБРАБОТКЕ ЕЕ ПОВЕРХНОСТИ КАТОДНЫМИ ПЯТНАМИ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО РАЗРЯДА**

*Кузнецов В.Г.*

**Ключевые слова:** температура, катодное пятно, вакуумная дуга, многозонный нагрев, движущийся проводник, поверхность.

**Аннотация.** Разрабатываются экологически чистые, ресурсосберегающие технологии и оборудование вакуумно-дуговой обработки (катодным пятном вакуумной дуги) поверхности металлопроката. Рассматривается решение задачи о теплообмене металлической ленты, нагреваемой в процессе очистки поверхности при непрерывной протяжке ее через вакуумную камеру. Предложена математическая модель процесса, разработана программа для компьютерного расчета, получены распределения полей температур в проводнике для конкретных случаев. Результаты расчета хорошо согласуются с экспериментальными данными.

## **MATHEMATICAL MODEL AND CALCULATION OF THE TEMPERATURE OF A MOVING METAL STRIP DURING MULTIZONE TREATMENT OF ITS SURFACE BY THE CATHODE SPOTS OF VACUUM ARC DISCHARGE**

*Kuznetsov V.G.*

**Keywords:** temperature, cathode spot, vacuum arc, multizone heating, moving conductor, surface.

**Abstract.** Environmentally friendly, resource-saving technologies and equipment of vacuum arc treatment (by the cathode spot of vacuum arc) of metal rolling surface are being developed. The solution of the problem of heat exchange of the metal tape heated in the process of surface cleaning at its continuous broaching through the vacuum chamber is considered. The mathematical model of process is offered, the program for computer calculation is developed, distributions of fields of temperatures in a conductor for concrete cases are received. The calculation results are in good agreement with the experimental data.

Обработка поверхности материалов катодными пятнами вакуумно-дугового разряда – новое направление теоретических, экспериментальных и прикладных исследований, которое в последние годы активно развивается. Данный вид обработки эффективно может быть использован для очистки поверхности металлов от загрязнений, закалки поверхности, восстановления пластически деформированной формы поверхности, подготовки поверхности под нанесение покрытий, создания микрорельефа на поверхности изделий, дефектоскопии приповерхностных слоев и других применений. Определяющим параметром при таком виде обработки поверхности является температура, как в самом катодном пятне, так и средняя температура по поверхности. Принципиально новые области использования вакуумно-дугового разряда [1], осваиваемые в последние годы, потребовали изучения поведения катодных пятен вакуумной дуги на движущихся поверхностях и, в ряде случаев, покрытых пленками другого материала. В таких условиях

исследования катодных пятен практически не проводились. Поведение катодных пятен в основном рассматривалось на неподвижных и очищенных от поверхностных загрязнений электродах. При локализации зоны горения вакуумно-дугового разряда на определенной площади катода можно говорить о некоторой интегральной температуре поверхности, которая устанавливается при высоких скоростях перемещения катодного пятна.

Основными направлениями повышения эффективности технологии и оборудования, надежности и производительности вакуумно-дуговой обработки поверхности металлов являются совершенствование систем управления катодными пятнами, оптимизация конструкции и геометрии катодно-анодных узлов и шлюзовых систем, оптимальный выбор вакуумных насосов, решение проблем, связанных с удалением продуктов очистки из вакуумной системы, оптимизация тепловых процессов на электродах и др.

На рис. 1 представлена упрощенная принципиальная схема вакуумной электродуговой установки с непрерывно движущимся катодом в виде ленточного проводника. На рис. 2 представлена система электродов с четырьмя анодами внутри вакуумной камеры действующей установки для вакуумно-дуговой очистки металлической ленты от технологической смазки.

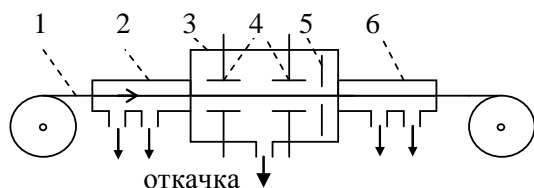


Рис. 1. Упрощенная принципиальная схема установки

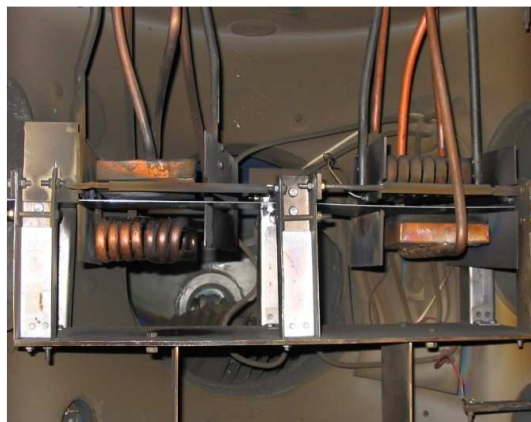


Рис. 2. Система электродов внутри вакуумной камеры (четыре анода)

Лента 1 с размоточного барабана через входной шлюз 2 непрерывно поступает в вакуумную камеру 3. В вакуумной камере между лентой, являющейся катодом, и анодами 4 зажигается вакуумно-дуговой разряд. С помощью системы электродов 5 разряд на поверхности катода напротив каждого из анодов локализуется в зоне определенной площади. Очищенное изделие из вакуумной камеры через выходной шлюз выводится в атмосферу и наматывается на барабан. Для поддержания в вакуумной камере необходимого давления откачка с помощью вакуумных насосов осуществляется не только из камеры, но и из шлюзов.

Расчет формы и геометрии электродов (в первую очередь анода) выполнялся с учетом баланса мощности, выделяющейся на электродах. Стремление повысить скорость очистки за счет увеличения тока дугового

разряда может привести к возникновению анодного пятна, и как следствие, к выходу установки из строя. Поэтому форма и размеры анода определяются технологическими параметрами работы установки. Между анодом и плазмой формируется приэлектродный слой объемного заряда. За счет этого слоя между анодом и плазмой возникает разность потенциалов (прианодное падение напряжения), регулирующая поступление заряженных частиц на поверхность электрода. Прианодное падение напряжения может иметь как положительный, так и отрицательный знак, а его значение в зависимости от режима работы и геометрии анода изменяется в широких пределах. Значение и знак прианодного падения напряжения определяется [2] следующим образом:

$$U_a = -\frac{kT_e}{e} \ln \frac{j_{et}}{j_a + j_{es} + j_i}, \quad (1)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;  $T_e$  – температура электронов в плазме;  $e$  – элементарный заряд;  $j_{et}$  – плотность хаотического тока электронов в плазме;  $j_a$  – реальная плотность тока на аноде, определенная через ток между электродами  $I$  и площадь анода  $S_a$ ;  $j_{es}$  – плотность электронного тока, эмитированного поверхностью анода (учитывается в случае достаточно горячей поверхности);  $j_i$  – плотность тока ионов, достигших поверхности анода.

В качестве критерия для выбора геометрии анода необходимо, чтобы  $U_a$ , определяемое формулой (1), в предельном случае не превышало нулевого значения, тогда [2]:

$$S_a \geq 4I\omega_e \tau_e / \pi e n_e \sqrt{8kT_e / \pi m}, \quad (2)$$

где  $\omega_e \tau_e$  – параметр Холла для электронов;  $n_e$  – концентрация электронов в плазме;  $m$  – масса электрона. Выражение (2) позволяет оценить площадь анода как коллектора электронов в вакуумной дуге.

Мощность, выделяющаяся на аноде, определяется вкладом электронной и ионной составляющих плазмы, а также энергетическим воздействием со стороны плазмы, связанным с ее излучением и конденсацией нейтральных атомов. Для единичной поверхности [2] можно использовать выражение:

$$P_a^{y0} \approx j_{ia}(U_a + U_i - \phi) + j_{ea}(\phi + 2kT_e/e) + q, \quad (3)$$

где  $j_{ia}$  – плотность тока ионов, поступающих из плазмы на анод;  $U_i$  – эффективное значение потенциала ионизации с учетом многозарядных ионов в вакуумно-дуговом разряде;  $\phi$  – работа выхода материала катода;  $q$  – плотность мощности, связанной с излучением плазмы и конденсацией атомов материала катода.

Исследования показали, что процесс управления катодными пятнами для равномерной обработки всей поверхности при движении ленты-катода подчиняется тем же законам, что и в вакуумно-дуговых испарителях с катодами торцевого типа и протяженными катодами.

Выделяющаяся на рабочей поверхности катода мощность расходуется на испарение материала, излучение и мощность, отводимая в результате теплопроводности. Кроме того, вне зоны вакуумной камеры необходимо учитывать, что дополнительно тепло от изделия отводится за счет теплоотдачи на воздух. Количество теплоты, проходящее через поверхность соприкосновения пропорционально коэффициенту теплоотдачи, площади поверхности, через которую происходит теплоотдача, разности температур поверхности твердого тела и газа и продолжительности процесса теплоотдачи.

Важным параметром, определяющим эффективность процесса вакуумной электродуговой обработки, является температура изделия. Она не должна приводить к изменению свойств материала изделия. Линейные и объемные размеры изделия при нагреве не должны измениться на столько, чтобы происходило заклинивания изделия в узких зазорах шлюзовых устройств. Неравномерность нагрева изделия также должна быть недостаточной для изменения его геометрической формы за счет возникающих напряжений. В связи с этими обстоятельствами была разработана математическая модель и получено уравнение для компьютерного расчета распределения температуры в движущемся изделии, как внутри вакуумной камеры, так и за ее пределами.

Уравнение теплопроводности для движущейся ленты с локальным источником нагрева и теплоотдачей за счет указанных выше источников имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \Delta T - V \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{h_k IU}{\nu \rho c} [H(x - l_2) + H(l_1 - x)] - \frac{\varepsilon \sigma}{\rho c d} (T^4 - T_0^4) - \frac{\lambda}{\rho c d} \frac{2}{d} (T - T_0) [H(x - L_2) + H(L_1 - x)], \quad (4)$$

где  $T = T(t, x, y)$  - температура, зависящая от времени и двух пространственных координат,  $T_0$  - температура окружающей среды,  $\Delta$  - двумерный лапласиан,  $\kappa = K/\rho \cdot c$  - коэффициент температуропроводности,  $K$  - коэффициент теплопроводности,  $\rho$  - плотность,  $c$  - теплоемкость,  $V$  - скорость движения ленты,  $h_k$  - коэффициент катодной мощности,  $I$  - сила тока,  $U$  - напряжение,  $\nu$  - объем, соответствующий зоне нагрева,  $H(x)$  - функция Хевисайда,  $\varepsilon$  - интегральный коэффициент излучения,  $\sigma$  - постоянная Стефана-Больцмана,  $d$  - толщина ленты,  $\lambda$  - коэффициент теплоотдачи,  $L_i$  и  $l_i$  линейные размеры, характеризующие координаты вакуумной камеры и источника нагрева.

Решение уравнения проводилось численно, методом конечных элементов. По предварительным расчетам даже при малой скорости движения происходит значительный сдвиг температурного распределения в сторону движения ленты. Температура ленты почти до области действия источника остается равной температуре окружающей среды. Это позволило сместить начало отсчета внутрь камеры и таким образом уменьшить величину

рассчитываемой области. Число ячеек было выбрано равное 2000 и 2500. Результаты расчета в том и другом случае совпадали.

В качестве примера на рис. 3 представлены распределения температур для двух значений скорости протяжки.

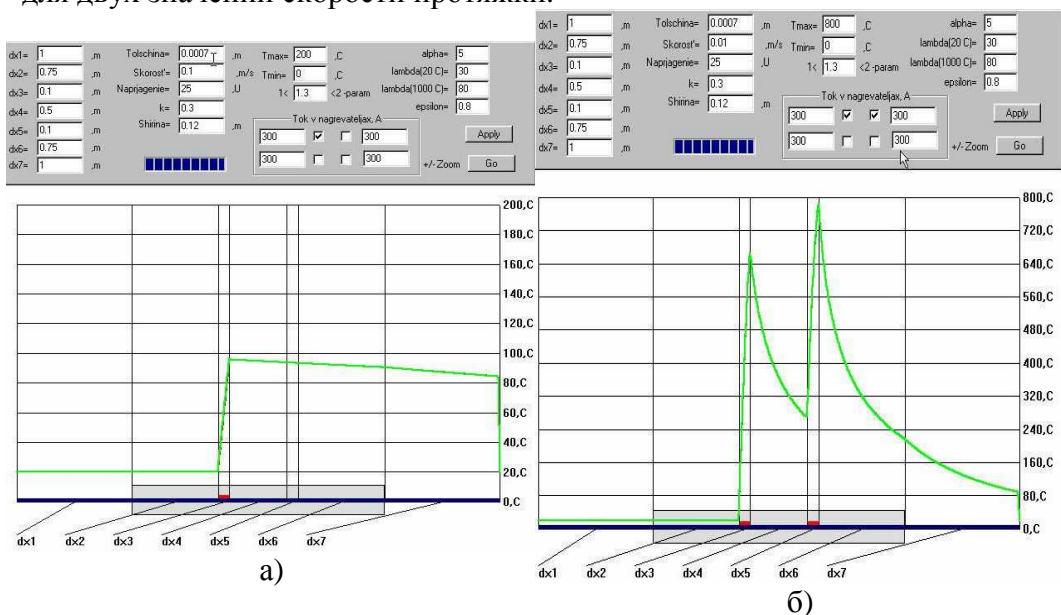


Рис. 3. Распределение температуры вдоль ленты при скорости ее движения:  
а) – 0,1 м/с; в) – 0,01 м/с

На координатной сетке условно изображена вакуумная камера. Ее длина, местоположение четырех зон очистки и их протяженность, расстояние от камеры до размоточного и намоточного барабанов определены отрезками dx1-dx7. Эти размеры, толщину и ширину ленты, ток дуги для каждой зоны очистки и напряжение на дуге, количество зон очистки, скорость протяжки ленты, теплофизические параметры материала ленты и другие можно устанавливать и изменять с помощью установочной таблицы. После того, как все параметры заданы, они фиксируются с помощью кнопки (apply) и с помощью кнопки (go) запускается расчет. Сразу же на экране монитора осуществляется построение распределения температуры вдоль движущейся ленты.

Представленные результаты расчета распределения температуры выполнены для ленты шириной 12 см и толщиной 0,7 мм при локализации зоны разряда длиной 10 см и на всю ширину ленты. При этом распределение а) получено для одной зоны очистки, а распределение в) – для двух зон очистки, расположенных в вакуумной камере на расстоянии 0,5 м друг от друга. Полученные результаты расчета удовлетворительно совпадали с результатами термопарных измерений.

Время выхода процесса на стационарный режим составляло приблизительно 20 сек. Как видно из графиков, даже при незначительной

скорости движения (кривая – в) происходит существенное смещение распределения температуры в сторону движения ленты. Оценки показали, что ”конвективный” член  $-V(\partial T/\partial x)$  в зависимости от скорости может на порядок и более превосходить все остальные величины, входящие в уравнение. Таким образом, доминирующее влияние на распределение температуры в движущейся ленте оказывает скорость движения.

Экспериментальные исследования выполнялись на действующей установке [4] для очистки от технологической смазки стальной ленты шириной 120 мм и толщиной 0,7 мм при токах дугового разряда от 60 до 350А.

### Список литературы

1. Кузнецов В.Г. Вакуумная электродуговая очистка поверхности металлопроката – новое направление в металлообработке // Труды 7-й Международной конференции “Пленки и покрытия-2005”. – Санкт-Петербург, 2005. – С. 57- 62.
2. Гришин С.Д., Лесков Л.В., Козлов Н.П. Плазменные ускорители. – М.: Машиностроение, 1983. – 231 с.

### References

1. Kuznetsov V.G. Vacuum electric arc cleaning of metal rolling surface – a new direction in metalworking // Proceedings of the 7th International conference "Films and coatings-2005". – St. Petersburg, 2005. – P. 57-62.
2. Grishin S.D., Leskov L.V., Kozlov N.P. Plasma accelerators. – M.: Mechanical Engineering, 1983. – 231 p.

<p><b>Кузнецов Вячеслав Геннадьевич</b> – доктор технических наук, заведующий лабораторией, Институт проблем машиноведения Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия, kvg-ipme@yandex.ru</p>	<p><b>Kuznetsov Viacheslav Gennadievich</b> – doctor of science, head of laboratory, Institute for problems in mechanical engineering of Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russia, kvg-ipme@yandex.ru</p>
--	--

*Received 23.12.2019*