

УДК 621.9.04; 621.7.02; 621.039.531, 004.942

П.П. Сафьян, Т.В. Селиверстова, В.А. Тутык

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ВНЕШНЕЙ
ПОВЕРХНОСТИ ТРУБЫ СТРУЙНЫМ ПАРОПЛАЗМЕННЫМ
РАЗРЯДОМ В ВИДЕ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА С ПОМОЩЬЮ
ЕГО КЛЕТОЧНО-АВТОМАТНОЙ МОДЕЛИ**

Приведены результаты математического моделирования процесса обработки внешней поверхности трубы струйным пароплазменным разрядом в виде точечного источника.

Ключевые слова: обработка пароплазменным разрядом, концентрированный поток энергии, математическое моделирование, клеточные автоматы, эффективная погонная энергия, скорость нагрева, скорость охлаждения.

Наведено результати математичного моделювання процесу обробки зовнішньої поверхні труби струменевим пароплазменним розрядом у вигляді точкового джерела.

Ключові слова: обробка пароплазменним розрядом, концентрований потік енергії, математичне моделювання, клітинні автомати, ефективна погонна енергія, швидкість нагріву, швидкість охолодження.

The results of mathematical modeling of processing outside of the pipe jet of steam-plasma discharge in the form of a point source.

Keywords: steam-plasma discharge treatment, a concentrated stream of energy, mathematical modeling, cellular automata, the effective heat input, the rate of heating, cooling rate.

Введение. Создание новых машиностроительных материалов и улучшение качества существующих является одним из ключевых заданий научно-технического прогресса. Постоянное ужесточение требований к материалам, эксплуатируемых в агрессивных средах, вакууме, при высоких температурах и давлениях, а также в других экстремальных условиях, ставит трудноразрешимые в материаловедческой науке вопросы. Важное место в решении данной глобальной проблемы принадлежит поверхностным слоям твердых тел. Именно они ответственны за износ- и коррозионную стойкость и усталостную прочность, а также за ряд других физико-механических характеристик. Возможности традиционных методов обработки поверхностных слоев исчерпаны в отличие от новой технологии с использованием концентрированных потоков энергии (КПЭ).

Постановка задачи исследования. Актуальной является задача математического моделирования изменения температуры в локальных точках объема и поверхности обрабатываемого изделия с целью анализа динамики протекания технологического процесса и формулировки рекомендаций по его осуществлению.

Результаты исследования и их обсуждение. При воздействии КПЭ на поверхность тел часть потока энергии частично отражается от поверхности,

а остальная поглощается в тонком поверхностном слое вещества, вызывая его нагрев, плавление и испарение в зависимости от режима обработки. Процессы перестройки структуры, развивающиеся при этом, происходят в условиях, далеких от термодинамических равновесных, и позволяют получать поверхностные слои с уникальным комплексом физико-механических свойств. Систематические изучения тепловых явлений, развивающихся в изделиях при воздействии КПЭ, позволяет определить наиболее эффективные технологические процессы, сформулировать основные требования к энергетическим характеристикам КПЭ и определить оптимальные режимы воздействия.

Однако отсутствует представление о механизмах изменения структуры и свойств поверхностных слоев под воздействием КПЭ, а также выбор оптимальных режимов обработки, все это является серьезным препятствием внедрения данных технологических процессов. Для сокращения проведения экспериментов по отработке технологического процесса используется математическое моделирование.

На данный момент моделей описывающих термическое воздействие пароплазменного разряда (ППР) на поверхность труб в существующей научно-технической литературе не выявлено. Для построения модели термического воздействия разряда на поверхность трубы, необходимо обобщить электрические характеристики разряда и на их основе провести расчет энергетического баланса.

Таким образом, в результате комплексных экспериментальных исследований физических процессов струйного пароплазменного разряда между токопроводящим твердым анодом (обрабатываемая труба) и электролитическим катодом в ходе обработки поверхности коррозионностойких труб, было проведено обобщение электрических характеристик необходимых для проведения расчета энергетического баланса, а также моделирование термического воздействия разряда на поверхность трубы.

Очевидно, что важной характеристикой разряда является энергетический баланс. Исходя из принципов термодинамики, можно записать тепловой баланс в межэлектродном зазоре, связывающий приход и расход тепла:

$$Q_{\text{прих}} = Q_{\text{н.э.}} + Q_{\text{п.э.}} + Q_{\text{упр.}} + Q_{\text{неупр.}} + Q_{\text{полез}} \quad (1)$$

где $Q_{\text{прих}}$ – общее количество тепла, поступившего в элементы цепи электролитно-плазменной установки при прохождении тока; $Q_{\text{н.э.}}$ – количество тепла, на нагрев электролита в области зажигания разряда; $Q_{\text{п.э.}}$ – количество тепла, на парообразование электролита в области зажигания разряда; $Q_{\text{упр.}}$ – количества тепла, на упругие столкновения в области горения разряда; $Q_{\text{неупр.}}$ – количества тепла, на неупругие

столкновения в области горения разряда; $Q_{\text{полез.}}$ – количества тепла, поступающие в анод для его обработки в области горения разряда.

Рассмотрим подробно способы определения каждой из статей теплового баланса.

При обработке поверхности трубы пароплазменным разрядом приход тепла за счет работы электрического тока [1] можно записать как функцию.

$$Q_{\text{прих}} = U \cdot j \cdot S \cdot t = I \cdot U \cdot t \text{ [Дж]}, \quad (2)$$

где I – сила тока в межэлектродном расстоянии при обработке ППР поверхности трубы, [А]; U – напряжение в межэлектродном расстоянии при обработке ППР поверхности трубы, [В]; t – время обработки ППР поверхности трубы, [с]; j – плотность тока в межэлектродном расстоянии при обработке пароплазменным разрядом поверхности трубы, [А/м²]; S – площадь поверхности трубы обрабатываемая пароплазменным разрядом, [м²].

При обработке поверхности трубы пароплазменным разрядом расход тепла за счет нагрева электролита под действием электрического тока можно представить в следующем виде:

$$Q_{\text{н.э.}} = m_{\text{эсп}} \cdot c_{\text{э}} \cdot (T_{\text{к}} - T_{\text{н}}) \text{ [Дж]} \quad (3)$$

где $m_{\text{эсп}}$ – масса электролита в зоне зажигания разряда, [кг]; $c_{\text{э}}$ – средняя удельная теплоемкость электролита, [Дж/(кг·К)]; $T_{\text{к}}$ – температура газожидкостной смеси при данном давлении, [К]; $T_{\text{н}}$ – начальная температура электролита, [К]; G – расход электролита (экспериментальная величина), [м³/с]; H – высота пленочного кипения (экспериментальная величина), [м]; L – межэлектродное расстояние, (экспериментальная величина), [м]; $\rho_{\text{э}}$ – плотность электролита, для 2% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ при 20°С равен 1010,1 [кг/м³].

При обработке поверхности трубы ППР расход тепла за счет парообразования электролита под действием электрического тока можно представить в следующем виде:

$$Q_{\text{н.э.}} = m_{\text{эисп}} \cdot \gamma_{\text{э}} \text{ [Дж]}, \quad (4)$$

где $m_{\text{эисп}}$ – масса испарившегося электролита в зоне зажигания разряда, [кг]; $\gamma_{\text{э}}$ – удельная теплота парообразования, [Дж/кг].

Высота столба пароплазменного разряда определялась по фотографиям полученных при скоростной фотосъемке. На фотографии пароплазменный разряд закрывала парогазовая оболочка и мешала объективно оценить его геометрические размеры и провести их анализ. Для этого полученное изображение, обрабатывалось в системе MATLAB путем контрастирования синей цветной составляющей в пакете Image Processing Toolbox. После

этого замерялись параметры ППР: межэлектродное расстояние и высота столба пароплазменного разряда.

Воздействие пароплазменного разряда на поверхность обрабатываемого изделия (см. рис. 1) осуществляется в результате ряда сложных, взаимосвязанных процессов энергетического, массового и зарядового обмена частиц плазмы с атомами обрабатываемого изделия. Результатом такого взаимодействия является десорбция атомов и молекул с поверхности тела, распыление и испарение частиц материала, изменение структуры и фазового состава. При плазменной обработке происходит взаимодействие материала поверхности изделия с активными и неактивными частицами плазмы, имеющими высокую кинетическую и потенциальную энергии [2].

При физическом взаимодействии плазмы с поверхностью, частицы обладают в основном кинетической энергией. Заряженные частицы также имеют высокую потенциальную энергию – энергию рекомбинации. В связи с этим, при соударении заряженных частиц с поверхностью обрабатываемого тела происходит распыление поверхности. При химическом взаимодействии плазмы с поверхностью, частицы обладают в основном потенциальной энергией. При соударении заряженных частиц с поверхностью обрабатываемого тела происходит формирование химических соединений [3-5]. В столбе ППР непрерывно происходят процессы ионизации и деионизации заряженных частиц. В установившемся режиме ионизационные и деионизационные процессы находятся в равновесии [6-9]. Рассмотрим элементарные процессы в плазме столба разряда, приводящие к возникновению заряженных частиц и к их потерям.

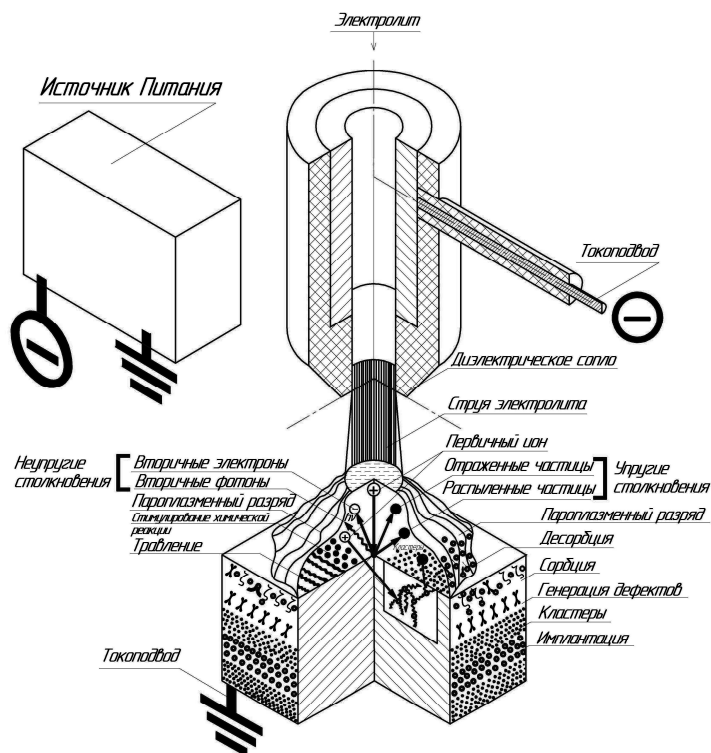


Рисунок 1. – Схема элементарных процессов в твердом теле, инициируемых обработкой ППР

На рисунке 1 приведена схема ППР. При упругих соударениях электрона с атомом не происходит деформации атомной структуры, а следовательно, и его ионизации. Эти столкновения возникают в тех случаях, когда запас энергии движущегося электрона мал и он легко отражается атомным электронным облаком, результатом данных столкновений является повышение температуры плазмы [9]. При обработке поверхности трубы ППР, потери на упругие соударения на единицу пути определяются по следующей формуле [10]:

$$\left(\frac{dQ}{dx}\right)_{упр.} = n_n \cdot \sigma \cdot \frac{m_e}{M} \cdot E \cdot \frac{v_0}{c} \text{ [Дж/м]} \quad (5)$$

где n_n – число нейтральных частиц в единице объема, $[м^{-3}]$; σ – эффективное сечение соударений, $[м^2]$; m_e – масса электрона, $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ [кг]; M – масса молекулы газа в столбе разряда, [кг]; E – энергия электрона, [Дж]; v_0 – скорость электрона, [м/с]; c – скорость света, $c = 3 \cdot 10^8$ [м/с]; x – средняя длина свободного пробега электрона, [м].

При неупругих столкновениях частиц, энергия передается в виде энергии ионизации. При этом электрон нейтрального атома переходит с низкого уровня на высокий уровень, потенциальная энергия атома растет и атом возбуждается или ионизируется, результатом данных столкновений является свечение столба ППР [9]. При обработке поверхности трубы ППР потери на неупругие соударения на единицу пути определяются по следующей [11]:

$$\left(\frac{dQ}{dx}\right)_{неупр.} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0^2} \cdot \frac{e^4 \cdot n_n \cdot Z}{m_e \cdot v_0^2} \cdot \left[\ln \left(\frac{m_e \cdot v_0^2 \cdot W_{pe}}{2 \cdot \bar{W}^2 \cdot \left(1 - \frac{v_0^2}{c^2}\right)} \right) - \ln 2 \cdot \left(2 \cdot \sqrt{1 - \frac{v_0^2}{c^2}} - 1 + \frac{v_0^2}{c^2} \right) + 1 - \frac{v_0^2}{c^2} \right] \text{ [Дж/м]} \quad (6)$$

где ε_0 – электрическая постоянная, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ [Ф/м]; Z – атомный номер вещества выбираем по периодической системе химических элементов Д.И. Менделеева; W_{pe} – кинетическая энергия электрона [Дж]; \bar{W} – средняя энергия ионизации атомов газа, [Дж];

Определение длины проникновения (прохождения) электронов подчиняется закону Томсона и Виддингтона, получено выражение справедливое для области нерелятивистских скоростей электронов при $U_0 \leq 10 \text{ кВ}$ [12].

$$R_e = \frac{U^2}{\rho_e \cdot b} \quad (7)$$

где R_e – длина проникновения электронов в газе [м]; ρ_e – плотность газа [кг/м³]; $b = \text{const} = 4 \cdot 10^{11}$ [см²·в²/г].

Было выявлено, что при стабильной обработке поверхности трубы ППР, потери энергии на нагрев электролита составляют до 20% от вкладываемой энергии. Потери на парообразование электролита составляют до 5%. Потери на упругие и на неупругие соударения составляют соответственно 91 мДж и 30 Дж, что составляет до 3% от вкладываемой энергии. Коэффициент полезного действия ППР при обработке поверхности труб составляет 70-75% от подводимой энергии.

Моделирование процесса тепловой обработки внешней поверхности трубы производилось на основании разработанной клеточно-автоматной модели затвердевания с учетом фазового перехода. Было принято, что внешняя поверхность трубы из коррозионно-стойкой стали 08X18H10T обрабатывается ППР. В соответствии с технологией для создания ППР применяется кольцевой электрод-инструмент, который равномерно распыляет электролит на внешнюю поверхность в виде кольца с 25 отверстиями, каждое отверстие создает ламинарный поток электролита, после подачи напряжения горит устойчивый пароплазменный разряд, образуя замкнутое кольцо плазмы на внешней поверхности трубы. Для удобства расчета, были введены упрощения, связанные с рассмотрением одного точечного источника, который соответствует одной струе (см. рис. 1). В ходе обработки пароплазменный разряд движется вдоль направления сканирования поверхности трубы, при этом в зоне действия разряда происходит бомбардировка поверхности ионами и электронами. Температура бомбардируемой поверхности повышается, и в зависимости от мощности разряда, химического состава обрабатываемого изделия происходит модификация поверхности с оплавлением или без оплавления [13].

При моделировании модификации поверхности использовались следующие параметры пароплазменного разряда и электрод-инструмента: разряд горит при напряжении $U = 800 \dots 2500 \text{ В}$, плотности тока разряда $j = 0,29 \dots 0,13 \text{ А/мм}^2$, длине струи электролита $L = 8 \text{ мм}$, диаметре струи электролита $d = 2,2 \text{ мм}$, расход электролита $Q = 2,5 \text{ мл/с}$, температура электролита $T_{эл} = 293 - 333 \text{ К}$, электролит $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 20 г/л , атмосферное давление. Скорость сканирования поверхности трубы пароплазменным разрядом варьировалась в диапазоне $v = 0,1 - 5 \text{ мм/с}$. Образец трубы выполнен из коррозионностойкой аустенитной стали 08X18H10T.

При программной реализации модификации поверхности трубы выполнен расчет для трехмерной модели с параметрами образца: длина $0,5 \text{ м}$; диаметр 16 мм , толщина стенки $1,5 \text{ мм}$; теплофизические параметры коррозионностойкой аустенитной стали 08X18H10T плотность 7900 кг/м^3 ; температураковки $1220 - 900^\circ\text{C}$ (начало-конец); температура плавления (солидус) – 1400°C ; коэффициент теплопроводности $16 - 18 \text{ Вт/(м}\cdot\text{C)}$; удельная теплоемкость $750 \text{ Дж/кг}\cdot\text{C}$; скрытая теплота фазового перехода 250 кДж/кг . Граничные условия: на боковых поверхностях тепловой поток равен нулю $\partial T / \partial n = 0 \text{ Вт/м}^2$, на верхней и нижней поверхностях задано граничное условие конвективного теплообмена: коэффициент теплообмена – $\alpha = 150 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ и излучения, коэффициент черноты $0,6$, температуры окружающей среды и объекта сканирования – 20°C .

Параметры клеточно-автоматной модели: шаг по x – $0,000303 \text{ м}$, по y – $0,000313 \text{ м}$. Шаг по z принят $0,0001 \text{ м}$ исходя из физических предпосылок, поскольку интересует глубина проплавления (прогрева) при сканировании поверхности пароплазменным разрядом; расчетное время зависит от скорости сканирования, шаг по времени $0,00003 \text{ с}$ определен из критерия устойчивости клеточно-автоматного алгоритма для термодинамической модели.

На рисунках 2 и 3 приведено температурное поле процесса обработки внешней поверхности коррозионностойкой трубы из стали 08X18H10T размером $\text{Ш16}\times\text{Ч1,5}$ мм струйным пароплазменным разрядом в виде точечного источника. Температурное поле представлено в виде цветовой карты на которой темно синему цвету соответствует температура 273 К , желто-оранжевому $873 \text{ К} - 1273 \text{ К}$.

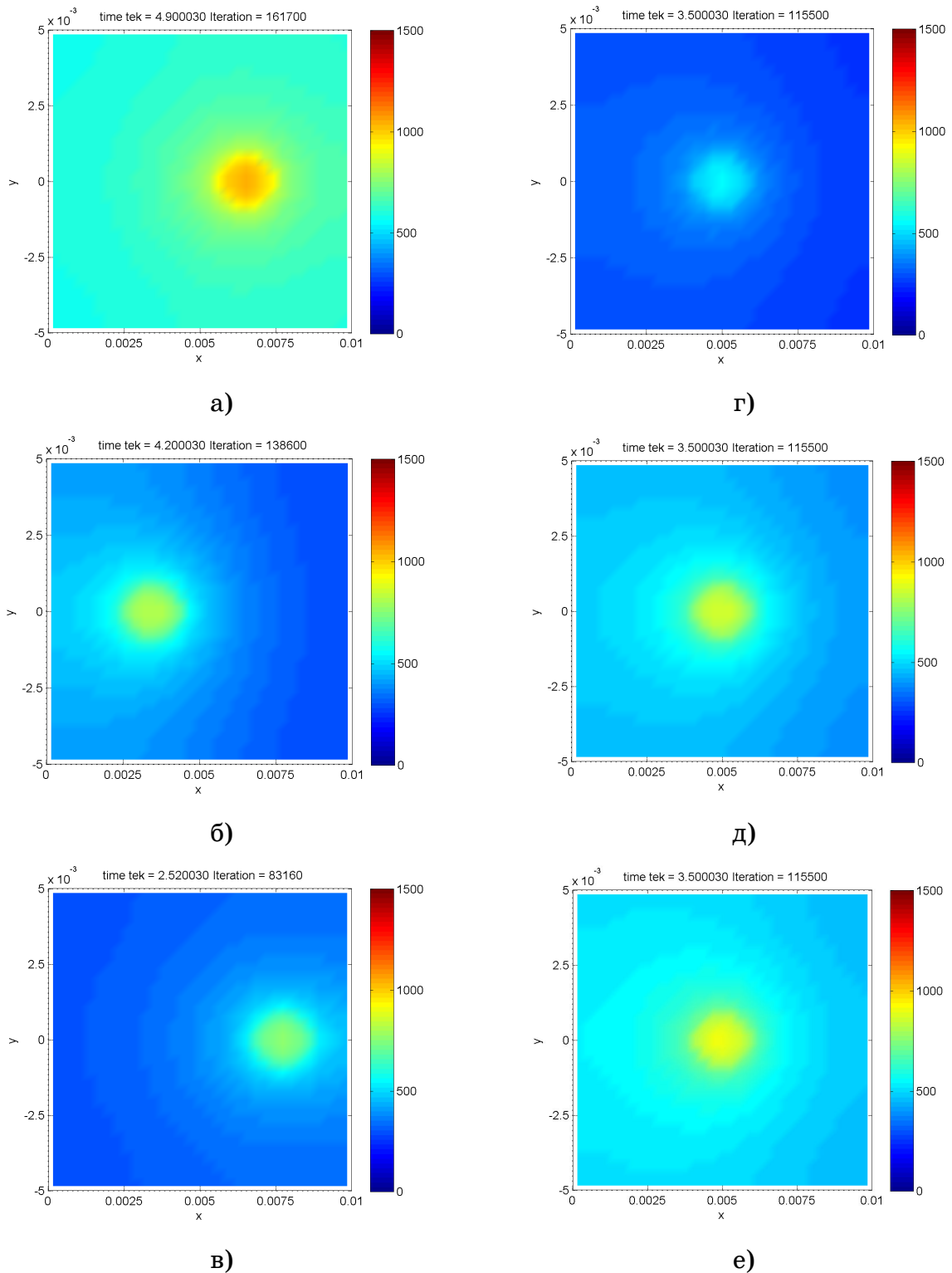


Рис. 2. Визуалізація процесу обробки зовнішньої поверхні корозійностійкої труби из стали 08X18H10T размером Ш16Ч1,5 мм струйним пароплазменним разрядом в виде точечного источника. Температурное поле зоны обробки (вид сверху): при постоянной мощности разряда 1500 Вт, скорость движения источника а) 0,5 мм/с; б) 1,0 мм/с; в) 2,5 мм/с; при постоянной скорости движения источника 1,0 мм/с, мощность разряда г) 900 Вт; д) 1500 Вт; е) 1700 Вт

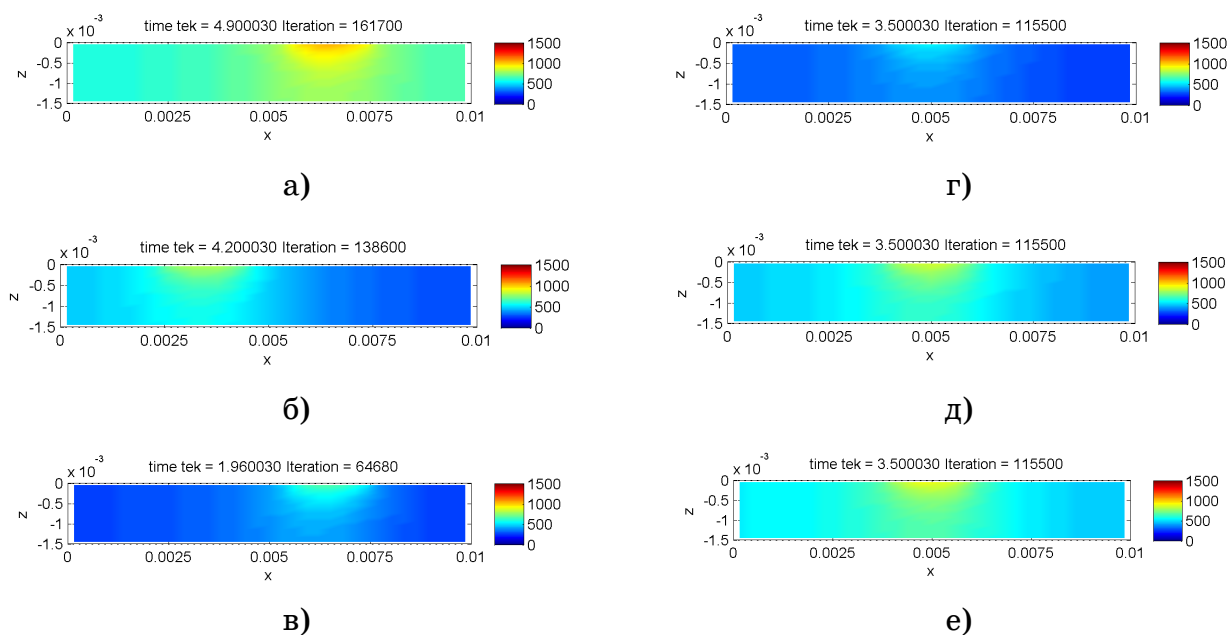


Рис. 3. Визуалізація процесу обробки зовнішньої поверхності корозійностійкої труби із сталі 08X18H10T розміром Ш16Ч1,5 мм струйним пароплазменним розрядом в формі точкового джерела. Температурне поле зони обробки (по сеченню стінки труби): при постійній потужності розряду 1500 Вт, швидкість руху джерела а) 0,5 мм/с; б) 1,0 мм/с; в) 2,5 мм/с; при постійній швидкості руху джерела 1,0 мм/с, потужність розряду г) 900 Вт; д) 1500 Вт; е) 1700 Вт

Висновки

В результаті моделювання був встановлений ряд закономірностей, які включаються в наступному:

1) При постійній потужності розряду (див. рис 2 а,б,в) з підвищенням швидкості обробки від 0,5 мм/с до 2,5 мм/с, області нагріті вище певної температури (наприклад, вище 600 К), зменшуються за площею, а відповідні ізотерми звужуються в напрямку, перпендикулярному фронту руху джерела енергії, і згущуються впереди розряду.

2) При постійній швидкості обробки пароплазменним розрядом (див. рис 2 г,д,е) встановлено, що з підвищенням потужності розряду від 900 Вт до 1700 Вт, області нагріті вище 500 К значно збільшуються за площею, причому їх розміри ростуть не пропорційно збільшенню потужності, а більш інтенсивно.

3) Вплив швидкості обробки при постійній потужності розряду на розміри температурного поля по сеченню стінки труби (див. рис 3 а,б,в), показує, що з підвищенням швидкості від 0,5 мм/с до 2,5 мм/с руху пароплазменного розряду, призводить до того, що чим швидше рухається джерело, тим менше тепло розповсюджується впереди нього, і тим швидше зменшується температура впереди джерела. При цьому, якщо джерело буде рухатися надзвичайно швидко, то практично все тепло буде розповсюджуватися позади нього. Позади ж джерела температура

распределяется равномерно, и ее распространение не зависит от скорости. Степень вытянутости температурного поля определяется не абсолютной величиной скорости v , а сложным параметром v/a , выражающим отношение скорости v к коэффициенту температуропроводности a . Глубина обработки поверхности трубы пароплазменным разрядом определялась в центре действия разряда и составляет 10 мкм (см. рис. 3).

4) При термическом цикле скорость охлаждения, рассчитывают в зависимости от эффективной погонной энергии q/v (отношение мощности разряда к скорости его движения), формы и размеров обрабатываемой трубы, начальной температуры трубы. Чем больше эффективная погонная энергия q/v , тем ниже при прочих равных условиях скорость охлаждения (см. рис. 5, 7).

5) На рисунке 4 приведена зависимость скорости нагрева внешней поверхности трубы обрабатываемой пароплазменным разрядом от эффективной погонной энергии, при постоянной мощности разряда 1500 Вт, показано, что с увеличением скорости движения источника эффективная погонная энергия уменьшается, так же как и скорость нагрева. Было установлено, что при скорости движения пароплазменного разряда 0,1 мм/с, эффективная погонная энергия составляет 15 кДж/м, скорость нагрева – 2130 К/с. При скорости движения пароплазменного разряда 5,0 мм/с, эффективная погонная энергия составляет 0,3 кДж/м, а скорость нагрева – 778 К/с.

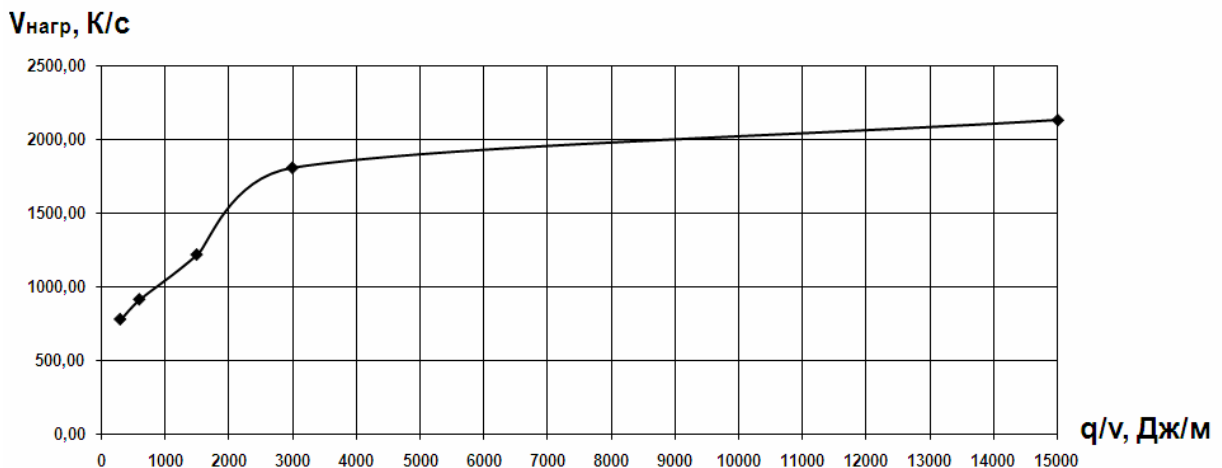


Рис. 4. Зависимость скорости нагрева внешней поверхности трубы обрабатываемой пароплазменным разрядом от эффективной погонной энергии, при постоянной мощности разряда 1500 Вт

6) На рисунке 5 приведена зависимость скорости охлаждения внешней поверхности трубы после обработки пароплазменным разрядом от эффективной погонной энергии, при постоянной мощности разряда 1500 Вт, показано, что с увеличением скорости движения источника эффективная погонная энергия уменьшается, а скорость охлаждения увеличивается.

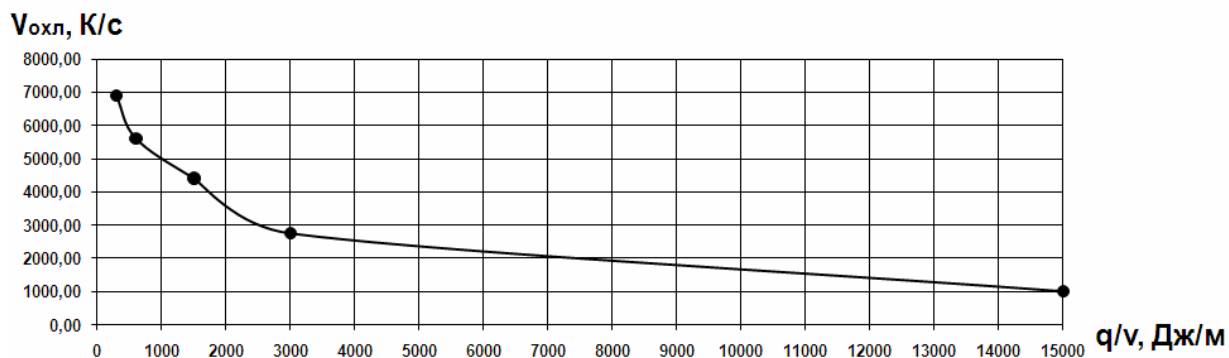


Рис. 5. Зависимость скорости охлаждения внешней поверхности трубы после обработки пароплазменным разрядом от эффективной погонной энергии, при постоянной мощности разряда 1500 Вт

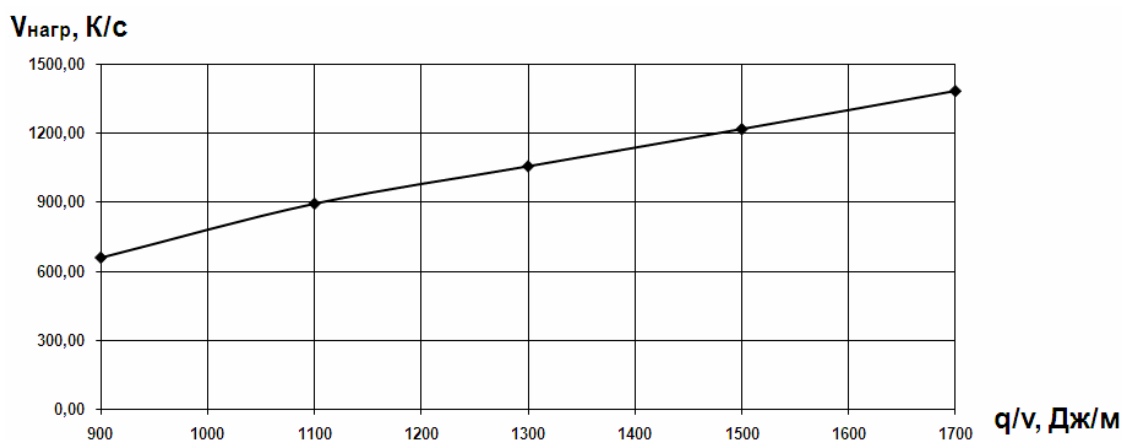


Рис. 6. Зависимость скорости нагрева внешней поверхности трубы обрабатываемой пароплазменным разрядом от эффективной погонной энергии, при постоянной скорости движения источника 1,0 мм/с

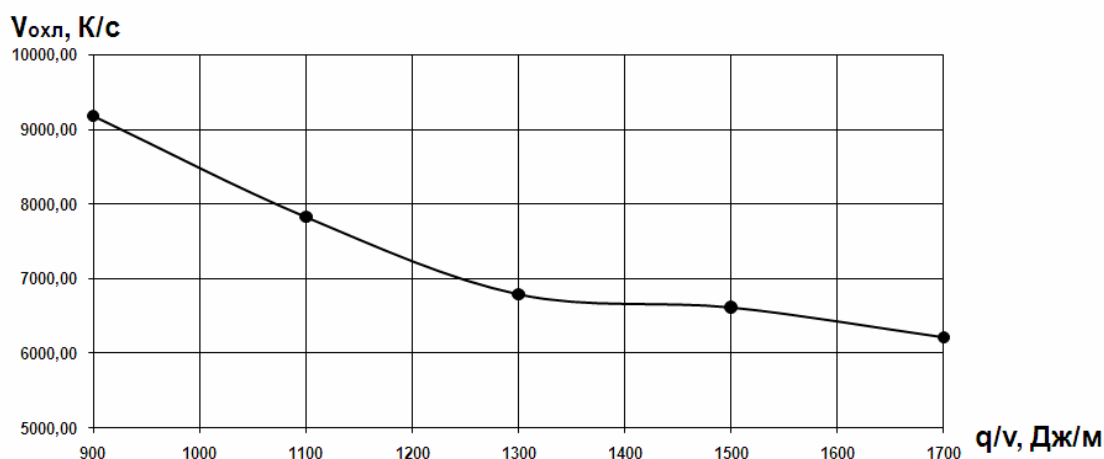


Рис. 7. Зависимость скорости охлаждения внешней поверхности трубы после обработки пароплазменным разрядом от эффективной погонной энергии, при постоянной скорости движения источника 1,0 мм/с

7) Расчет показал, что при скорости движения пароплазменного разряда 0,1 мм/с, эффективная погонная энергия составляет 15 кДж/м, скорость охлаждения – 1015 К/с. При скорости движения пароплазменного разряда 5,0 мм/с, эффективная погонная энергия составляет 0,3 кДж/м, скорость охлаждения – 6900 К/с.

8) На рисунке 6 приведена зависимость скорости нагрева внешней поверхности трубы обрабатываемой пароплазменным разрядом от эффективной погонной энергии, при постоянной скорости движения источника тепла 1,0 мм/с, показано что с увеличением мощности разряда от 900 Вт до 1700 Вт эффективная погонная энергия увеличивается, а также увеличивается скорость нагрева. При минимальной мощности разряда (для данного расчета) 900 Вт, эффективная погонная энергия составляет 0,9 кДж/м, скорость нагрева – 658 К/с. При максимальной мощности разряда (для данного расчета) 1700 Вт, эффективная погонная энергия составляет 1,7 кДж/м, скорость нагрева – 1383 К/с.

9) На рисунке 7 приведена зависимость скорости охлаждения внешней поверхности трубы после обработки пароплазменным разрядом от эффективной погонной энергии, при постоянной скорости движения источника тепла 1,0 мм/с, показано что с увеличением мощности разряда от 900 Вт до 1700 Вт эффективная погонная энергия увеличивается, а скорость охлаждения уменьшается. Так, при минимальной мощности разряда (для данного расчета) 900 Вт, эффективная погонная энергия составляет 0,9 кДж/м, скорость охлаждения – 9184 К/с. При максимальной мощности разряда (для данного расчета) 1700 Вт, эффективная погонная энергия составляет 1,7 кДж/м, скорость охлаждения равна – 6220 К/с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сивухин Д. В. Общий курс физики. — М.: Наука, 1977. — Т. III. Электричество. — 688 с.
2. Гайсин А.Ф. Струйный многоканальный разряд с электролитическими электродами в процессах обработки твердых тел./ А.Ф. Гайсин, И.Ш. Абдуллин., Ф.М. Гайсин // Казань. Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2006, 446 с
3. Диденко А.Н., Лигачев А.Е., Куракин И.Б. Воздействие пучков заряженных частиц на поверхность металлов и сплавов. – М.: Атомиздат, 1987.-234 с.
4. Пранявичус Л., Дудонис Ю. Модификация свойств твердых тел ионными пучками. – Вильнюс: Моклас, 1980. – 191 с.
5. Валяев А.Н., Погребняк А.Д., Плотников С.В. Радиационно-механические эффекты в твердых телах при облучении высокоинтенсивными импульсными электронными и ионными пучками. Алма-Ата: Гылым. - 1998 – 266 с.
6. Диденко А.Н., Лигачев А.Е., Куракин И.Б. Воздействие пучков заряженных частиц на поверхность металлов и сплавов. – М.: Атомиздат, 1987.-234 с.
7. Теория сварочных процессов. Учеб. для вузов. В.Н. Волченко, В.М. Ямпольский, В.А. Винокуров Под ред. В.В. Фролова. – М.: Высшая школа, 1988. – 559 с.

8. Свенчанский А.Д., Жердев И.Т., Кручинин А.М. Электрические промышленные печи: дуговые печи и установки специального нагрева. Учебник. / Под ред. А.Д. Свенчанского. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 296 с
9. Теория сварочных процессов. Багрянский К.В., Добротина З.А., Хренов К.К., Выща школа, 1976, 424с.
10. Б.М. Яворский, А.А. Детлаф Справочник по физике, для инженеров и студентов вузов. М.: Наука., 1971 – 940 с.
11. Тутык В.А. Очистка поверхности нержавеющей труб для энергетического машиностроения пароплазменным разрядом // Тутык В.А., Динник Ю.А., Сафьян П.П. // Теория и практика металлургии. – 2009. - №5-6 (72-73). – с. 71-74
12. Cserfalvi T, Mezei P. Fresenius // J. Anal. Chem. 1996. Vol. 355, P.813-819.
13. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.