

ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА НА ПРОДУКТЫ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ ПОРОШКОВ И КОАГУЛЯНТА

Введение

Получение высокодисперсных порошков, активного коагулянта и очистка сточных вод от тяжелых металлов и продуктов смазки и охлаждения в одностадийном процессе вызывает определенный интерес в механообрабатывающем производстве.

Постановка задачи

В проведенных ранее исследованиях [1 - 4] было зафиксировано, что под действием электрических импульсов искрового разряда в жидкости на микроучастках контактируемых поверхностей металлов возникает аномально высокая плотность тока (более $10^7 \dots 10^8 \text{ A/cm}^2$), в результате чего происходит локальный нагрев этих участков до высоких температур. Перегретый материал выбрасывается в виде пара или расплавленных микрочастиц, движущихся с высокими скоростями $(1 \div 2) \cdot 10^3 \text{ м/с}$ при энергии разряда $W = (0,009 \dots 0,05) \text{ Дж}$, что соответствует плотности теплового потока от $10 \cdot 10^6$ до $60 \cdot 10^6 \text{ Вт/см}^2$. В зависимости от того, имеет ли место химическое взаимодействие сконденсированного пара и микрочастицы с жидкостью, получается либо порошок чистого металла, либо продукты взаимодействия металла с жидкостью (образование оксидов и гидроксидов).

Основные результаты

Охлаждение частиц металла происходит как в режиме пленочного, так и в режиме пузырькового кипения, что в определенной степени влияет на дисперсность и форму частиц получаемых порошков.

Зависимости для коэффициентов теплоотдачи при контакте охлаждаемых капель с жидкой средой для капель размером $(10 \dots 100) \cdot 10^{-6} \text{ м}$ при указанных скоростях их разлета и давлениях на переднем фронте $\sim (20 \dots 500) \text{ МПа}$ были получены в работах [5 - 7]:

- для режима пузырькового кипения (в тыльной части капли)

$$\alpha_n = q^{2/3} \frac{3,4P^{0,18}}{1 - 0,0045P} \quad (1)$$

- для режима пленочного кипения (на переднем фронте капли)

$$\alpha_{пл} = \left[\frac{\lambda_n \cdot \beta_{H_2O} \cdot \rho_n \cdot V_{H_2O} \cdot \varphi}{(T_{Me} - T_n) d_r} \right]^{0,5} \quad (2)$$

где

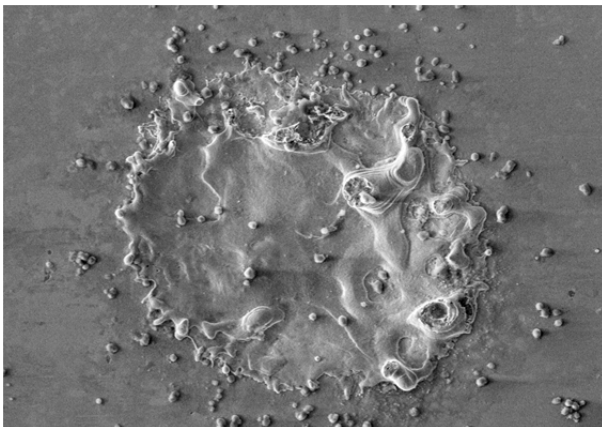
$$\varphi = 1 + \frac{C_n (T_{Me} - T_n)}{2\beta_{H_2O}}$$

Скорость охлаждения капель можно оценить по формуле [8]

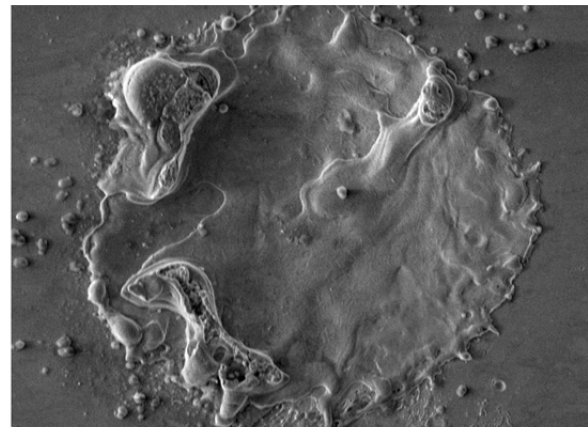
$$V_{охл} = 6d_r \frac{T_{Me} - T_{H_2O}}{C_{Me} d_k \rho_{Me}} \quad (3)$$

Для режима пузырькового кипения скорость охлаждения капель диаметром $d_{cp} = (5...60) \cdot 10^{-6}$ м при стальной загрузке составляет $6,7 \cdot 10^6 \dots 8 \cdot 10^7$ К/с, а для режима пленочного кипения — $9 \cdot 10^5 \dots 4,5 \cdot 10^6$ К/с.

Таким образом, на границе раздела фронтов пленочного и капельного теплообмена в материале возникает градиент температур, который может привести к разрыву крупных капель размером более $50 \cdot 10^{-6}$ м с образованием остроугольных осколков, которые видны на микрофотографиях (рис. 1, а), в то время как при $W = 0,009$ Дж продукты эрозии имеют четко выраженный сферический характер (рис. 1, б).



а



б

Рисунок 1 – Микрофотографии эрозионных лунок

Поскольку интегральная величина сорбции микрочастиц возрастает с увеличением их активной адсорбирующей поверхности, то представляет интерес в выявлении характеристик искрового разряда, приводящих к увеличению степени дисперсности порошков.

Проведенными исследованиями [3,4] было установлено, что уменьшение плотности теплового потока до некоторой критической величины, имеющей характерную величину для различных металлов засыпки реактора, дисперсность продуктов эрозии повышается.

Численное моделирование процесса эрозии и экспериментальные исследования дают следующую зависимость для объема материала, прогретого до $T_{пл}$:

$$V = k_e \cdot r_{пл}^{0,958} \cdot a^{0,589} \cdot T_{пл}^{0,776} \cdot W \quad (4)$$

где W – вкладываемая в разряд энергия; $r_{пл}$ – скрытая теплота плавления; a – температуропроводность материала; k_e – коэффициент выброса.

Количественные характеристики удельных показателей диспергирования материалов засыпки (сталь 20, Д16) приведены в табл. 1.

Таблица 1 - Количественные характеристики удельных показателей диспергирования материалов засыпки

$q, 10^6,$ Вт/см ²	$d_{ср}, 10^{-4}$ см	$S_1, 10^{-4},$ см ²	$n_1, 10^6,$ 1/г	$S, \text{см}^2/\text{г}$	$V_l, 10^{-9}$ см ³	$N_n \cdot 10^6$	$S_n, 10^4$ см ²	$M_{ок}, \text{г}$
Сталь								
63,7	15,6	7,46	6,35	486	1,4	1272	9,72	139,8
31,8	7,02	1,54	71	1090	0,127	14200	21,8	141,36
11,46	5,44	0,93	151	1460	0,059	30200	29,2	141
Д16								
63,7	19,3	11,5	10,8	1242	2,65	2160	24,8	143,1
31,8	10,1	3,2	75	2400	1,588	15000	48	142,1
11,46	6,9	1,49	232	3480	0,121	46400	69,6	140,36

В таблице: $d_{ср}$ – средний размер частиц; S_1 – поверхность 1-й частицы; n_1 – удельное число частиц (число частиц в 1 г диспергированного материала); S – суммарная удельная поверхность частиц в 1 г материала; V_l – объем единичной лунки материала, прогретого до $T_{пл}$.

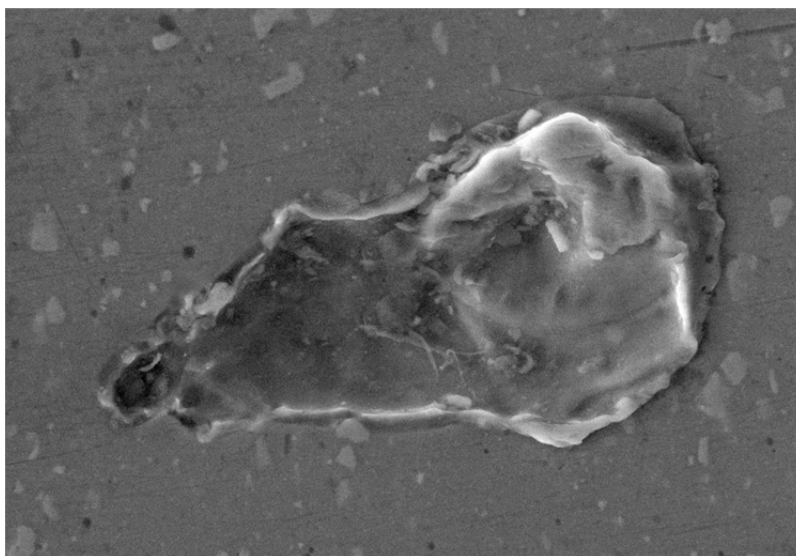
Из расчетов видно, что уменьшение вкладываемой в разряд энергии приводит к уменьшению производительности электроразрядного реактора. В то же время характеристики дисперсности материала $d_{ср}$, n_1 , S_1 улучшаются. Так при уменьшении плотности теплового потока в 5,6 раза средний диаметр частицы (сталь 20) уменьшается в 2,9 раза, число диспергированных частиц возрастает в 23,8 раз, а удельная адсорбирующая поверхность S возрастает в 3 раза. Аналогичные результаты получены и для алюминиевой засыпки реактора.

В этой же таблице приведены расчетные результаты для 200 г засыпки реактора при полной эрозии материала засыпки: N_n – полное число диспергированных частиц; S_n – полная адсорбирующая поверхность и полная масса коагулянта $M_{ок}$ при допущении, что за

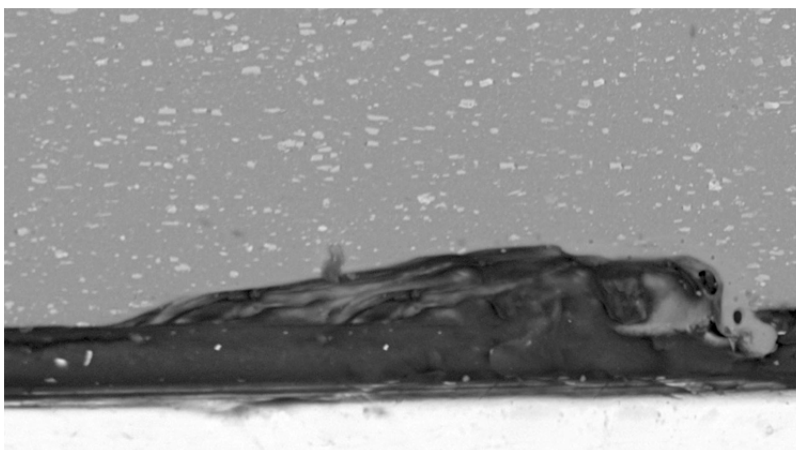
время остывания парообразных и расплавленных частиц успевает окислиться слой материала $\sim 1/3 r_{cp}$.

Эти результаты показывают, что при сохранении общей эрозионной массы металла при постоянном значении вводимой энергии уменьшение плотности теплового потока существенно улучшает дисперсный состав продуктов эрозии и их адгезионные свойства.

Изучение микрофотографий эрозионных лунок показывает, что в отдельных случаях лунки имеют вытянутую форму. На рис. 2 приведены микрофотографии лунки на поверхности стального электрода (рис 2, а) и её продольный разрез при $W = 0,005$ Дж (рис. 2, б), $r = 25 \cdot 10^{-6}$ м, $\tau = 40 \cdot 10^{-8}$ с.



а



б

Рисунок 2 - Микрофотографии лунки на поверхности стального электрода и её продольный разрез

Полученная геометрия лунок позволяет предположить: процесс непрерывного перемещения лунки связан с возникновением электромагнитной силы, которая вызвала это явление и привела к уменьшению зоны прогрева материала за пределами $T_{пл}$.

Следовательно, наблюдается повышение эффективности эрозии материала.

Основываясь на этих результатах, был проведен численный расчет, при котором решалась пространственная задача распространения тепла и анализировались закономерности эрозии металла при перемещающемся источнике тепла [8]. Были учтены процессы плавления, испарения и перемещения фронта этих процессов в глубь металла. Для численного моделирования использовалась нестационарное уравнение теплопроводности в виде

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \rho c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = 0, \quad (5)$$

где $T(x, y, z)$ – температура; t – время; $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ – коэффициенты теплопроводности вдоль осей x, y, z ; $\rho c(T)$ – удельная объемная теплопроводность материала.

В качестве граничных условий, связанных с определением размеров эрозии, принимались:

- баланс тепловых потоков на границе жидкой и твердой фаз

$$\lambda_{ж} \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{F_n(x,y,z)}^{y=y_{ж}-0} + \lambda_{т} \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{F_n(x,y,z)}^{y=y_{ж}+0} = Q_{пл} \cdot \rho \frac{\partial \xi}{\partial n}$$

- баланс тепловых потоков на границе паровой и жидкой фаз

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=\eta_{исп}} + q_{исп}(T|_{y=\eta_{исп}}) = q_e$$

- уравнение, описывающее движение границы пар - жидкий металл

$$\rho \frac{\partial \eta}{\partial t} = \left(A - \frac{B}{T|_{y=\eta_{исп}}} \right) \sqrt{\frac{M}{2RT|_{y=\eta_{исп}}}};$$

- в плоскости $x = 0$ принимались условия теплоизоляции (тепловой поток $q=0$),

- в плоскости $y = 0$ $q = 63,7 \cdot 10^6$ Вт/см².

На рис. 3 приведена форма кратера с изотермами, соответствующими температуре плавления $T_{пл}$ (2) и температуре испарения $T_{исп}$ (3) стального электрода. Анализ изотерм при $T < T_{пл}$ показывает, что температура материала быстро уменьшается по мере удаления от кратера, т. е. металл не успевает прогреваться за время действия разряда. Так как теплоемкость материалов в зоне фазовых превращений гораздо выше, можно считать, что основная часть тепла идет на формирование кратера (плавление и испарение материала).

Эта тенденция увеличивается с ростом скорости перемещения пятна подвода тепла вдоль поверхности электрода.

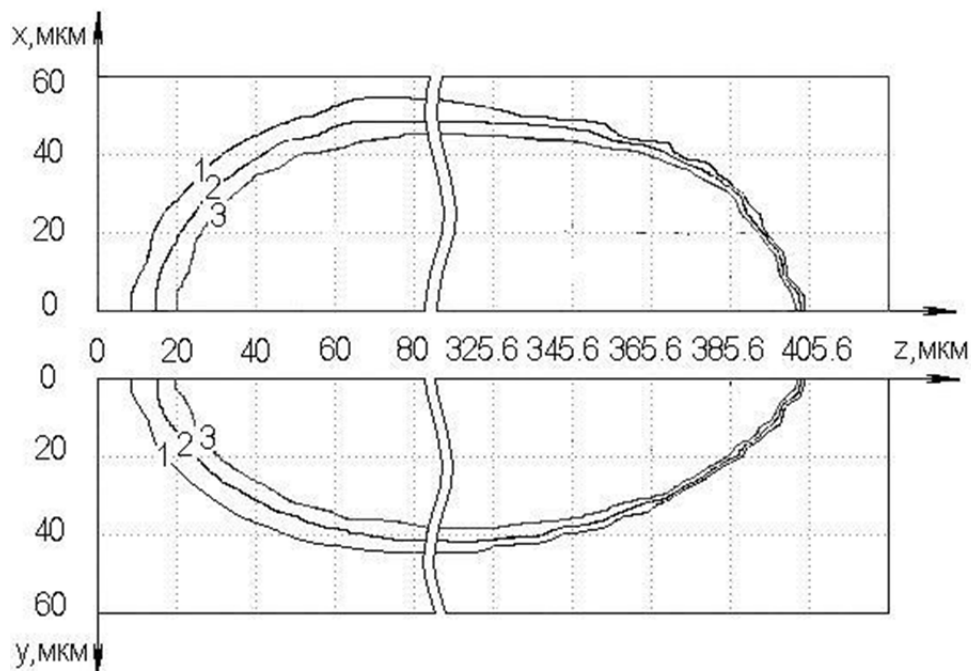


Рисунок 3 – Форма кратера при скорости пятна 8 м/с: изотерма 1 – 615°С; изотерма 2 – 1515°С; изотерма 1 – 3010°С

В табл. 2 приведены результаты численного моделирования тепловых процессов эрозии металлов (сталь 20, Д16) при изотропных показателях теплопроводности λ_x , λ_y , λ_z для стационарного $u = 0$ и движущегося (перемещающегося) разряда со скоростью $u = 2$ м/с, $u = 4$ м/с, $u = 8$ м/с в плоскости $X = 0$ на поверхности электродов.

Кроме объема разрядных лунок $V_{пл}$ и (массы расплавленного $M_{пл}$ и испаренного металла и $M_{исп}$), определяемых по эквипотенциалам тепловых полей кратеров по выражению

$$M = \rho(T) \cdot V = \sum_{i=1}^n \rho(T) \cdot S_i \cdot \delta x_i,$$

где $\rho(T)$ – плотность материала при соответствующей температуре;

S_i – площадь поперечного i -го сечения лунки; δx_i – расстояние между соседними сечениями; n – число расчетных сечений, в этой таблице приведены суммарные затраты энергии на разогрев, плавление, испарение металла из лунки и эффективность процесса диспергирования k как отношение энергии, затрачиваемой на плавление и испарение, ко всей введенной энергии в разряд. Численные расчеты проводились при энергии разряда $W = 0,05$ Дж, длительности разряда $\tau = 40 \cdot 10^{-6}$ с и начальном радиусе разрядного пятна $r = 25 \cdot 10^{-6}$ м. Исследование геометрических размеров и рельефа поверхности

микролунок проводилось сканированием в контактной моде сканирующим зондовым микроскопом Solver PRO NT-MDT. Расхождение результатов численного моделирования и экспериментальных измерений не превышает 10...15%. При постоянном значении подводимой в разряде энергии $W = 0,05$ Дж плотность теплового потока q изменяется в зависимости от изменения площади разрядного кратера при изменении скорости перемещения пятна подвода энергии.

Таблица 2 – Результаты численного моделирования тепловых процессов эрозии металлов

U , м/с	$q, 10^6$, Вт/см ²	$M_{пл.}$, 10 ⁻⁹ г	$M_{пл.}$, 10 ⁻⁹ г	$W_{р+пл.}$, Дж	$W_{р+исп.}$, Дж	$W_{расс.}$, Дж	W_{Σ} , Дж	k , %
Стальные электроды								
$U = 0$	63,7	3358	750	0,0081	0,0345	0,001	0,0484	96,8
$U = 2$	13,8	4022	863	0,0097	0,0397	0,0015	0,0494	98,8
$U = 4$	10,4	3896	831	0,0093	0,038	0,0015	0,0494	94,6
$U = 8$	6,7	3721	774	0,0089	0,0363	0,0017	0,0452	90,4
Алюминиевые электроды								
$U = 0$	63,7	6636	1932	0,0068	0,0409	0,0046	0,0477	95,4
$U = 2$	11,8	7126	1989	0,0073	0,0421	0,0059	0,0494	98,8
$U = 4$	9,4	6901	1837	0,0070	0,039	0,0051	0,046	92
$U = 8$	5,9	6376	1752	0,0067	0,037	0,0038	0,0438	87,6

Сопоставление этих результатов с приведенным выше влиянием величины теплового потока на изменение продуктов эрозии и их свойств, а также с наблюдаемыми в экспериментах изменениями характеристик эрозионных лунок при движении пятна разряда приводит к выводу о необходимости изменения конструкции электроразрядного реактора в целях получения такого процесса разряда, чтобы можно было использовать разрядный ток для создания собственного магнитного поля, вызывающего перемещение разрядного пятна на поверхности электродов [9].

Выводы

1. Уменьшение плотности теплового потока приводит к повышению дисперсности продуктов эрозии, увеличению массы коагулянта и площади адсорбционной поверхности.
2. Наблюдаются оптимальные значения плотности теплового потока по коэффициенту эффективности получения продуктов эрозии.
3. Уменьшения плотности теплового потока можно добиться путем перемещения разрядного пятна по поверхности металла.
4. Перемещение разрядного пятна уменьшает зону перегрева испаренного материала, что приводит к улучшению процесса выброса материала и делает структуру продуктов дисперсии более равномерной.

5. Перемещения разрядного пятна можно добиться изменением конструкции реактора в целях создания собственного магнитного поля и вызванного им движения разрядных токов на поверхности электродов.

Список использованных источников

1. Наугольных, К.А. Электрические разряды в воде / К.А. Наугольных, Н.А. Рой. – М. : Наука, 1971. – 153 с.

2. Золотых, Б.Н. Основные вопросы теории электрической эрозии в импульсном разряде в жидкой диэлектрической среде: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: спец. 200 «Машиностроение и оборудование электронной техники» / Б.Н. Золотых; М., 1968. – 51 с.

3. Кручина, В.В. Диспергирование металла из единичных лунок в электроразрядном реакторе / В.В. Кручина // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 5 (56). – Х., 2008. – С. 126 – 132.

4. Кручина, В.В. Анализ технологических характеристик при электроимпульсной утилизации отходов / В.В. Кручина, В.Ф. Гайдуков // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 2 (78). – Х., 2014. – С. 119 – 125.

5. Теплопередача при конденсации и кипении / С.С. Кутателадзе. М.: Машгиз, 1952. – 231 с.

6. Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М. : Энергия, 1973. – 486 с.

7. Терновой Ю. Ф., Кудиевский С. С., Пашетнева Н. Н. Инженерные расчеты процессов распыления расплавленных металлов / Ю. Ф. Терновой, С. С. Кудиевский, Н. Н. Пашетнева. – Запорожье: Изд-во Запорож. гос. инж. акад., 2005. – 149 с.

8. Гонторовский, П.П. Компьютерное моделирование нестационарных тепловых процессов в металлических электродах при воздействии перемещающегося электрического разряда / В.В. Кручина, П.П. Гонторовский // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 2 (53). – Х., 2008. – С. 105 – 112.

9. Пат. 94911 Україна МПК (2014.01) B01F 3/00. Реактор електроерозійного диспергування матеріалів / В.Ф. Гайдуков, В.В. Кручина, Х.Ю. Синозацька, Д.В. Кручина; власник Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАИ». – № у 2014 05334; заявл. 19.05.2014; опубл. 10.12.2014, Бюлл. № 23 – 5 с.

Поступила в редакцію 10.03.2015.

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.В. Гайдачук,
Національний аерокосмічний університет
ім. Н.Е. Жуковського «ХАИ», г. Харків.*