



DOI 10.5862/JEST.254.15

УДК 621.78

*А.И. Попов, М.И. Тюхтяев, М.М. Радкевич, В.И. Новиков*

## **АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ СТРУЙНОЙ ФОКУСИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ**

*A.I. Popov, M.I. Tyukhtyaev, M.M. Radkevich, V.I. Novikov*

### **THE ANALYSIS OF THERMAL PHENOMENA OCCURING UNDER JET FOCUSED ELECTROLYTIC PLASMA PROCESSING**

Исследованы нагрев активного расходимого анода и распределения тепловых потоков в процессе струйной фокусированной электролитно-плазменной обработки. Проведена оценка распределения температур на поверхности анода методами измерения искусственной термопарой и плавкими индикаторами. Замерена температура основных элементов системы анода, катода, электролита в момент стекания с образца, электролита в приемной ванне, парогазовой среды в уловителе пара, в корпусе рабочей камеры. Установлено, что в случае локализованного фокусированного пучка на поверхности анода, значительно превышающей площадь катода, в условиях малых скоростей струи электролита имеет место низкотемпературная обработка поверхностного слоя материала, обеспечивающая полирование сталей без прохождения фазовых превращений. Проанализировано распределение тепловых потоков в процессе струйной фокусированной электролитно-плазменной обработки.

СТРУЙНАЯ, ФОКУСИРОВАННАЯ, ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА; АКТИВНЫЙ РАСХОДУЕМЫЙ АНОД; НАГРЕВ; ТЕПЛОВОЙ ПОТОК; УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА; МАРТЕНСИТНО-ФЕРРИТНАЯ СТАЛЬ.

The paper has studied the phenomena of heating of the active sacrificial anode and the distribution of heat flow under jet focused electrolytic-plasma treatment. We have assessed the temperature distribution on the anode surface using measurements by an artificial thermocouple and by fuse indicators. We have measured the temperature of the basic elements of the system consisting of the anode, the cathode, the electrolyte (under drainage from the sample and in the receiving tank), and the vapor-gas medium (in the vapor trap and in the working chamber housing). It was found that if the localized beam was focused on the anode surface area substantially greater than that of the cathode, occurs low-temperature processing of the surface layer of the material occurred in a low-velocity electrolyte jet, which provides polishing of the steels without undergoing phase transformations. The distribution of heat flows under jet focused electrolytic-plasma treatment was analyzed.

JET; FOCUSED; ELECTROLYTIC PLASMA PROCESSING; ACTIVE SACRIFICIAL ANODE; HEATING; THERMAL STREAM; EQUATION OF THERMAL BALANCE; MARTENSITE FERRITE STEEL.

#### **Введение**

Практическое использование известных электрохимических процессов с целью управления шероховатостью поверхности детали невоз-

можно без оценки тепловых явлений, происходящих в рабочей зоне «материал — инструмент» и сильно сказывающихся на конечном результате обработки.

Тепло, выделяющееся в локальной зоне обработки, приводит к нагреву материала, а охлаждение его электролитом может привести к фазовым превращениям, изменяющим структуру, что, в конечном счете, отрицательно скажется на работоспособности изделия. Во многом это касается электролитно-плазменной обработки при полировании ответственных деталей. Результаты исследований авторов [1, 2] показали, что при обработке в ванне погружением изделия в электролит или в потоке электролита в трубе температура обработки для катодного и анодного процессов электролиза составляет от 400 до 1100 °С. В отдельных случаях [1] может иметь место температура процесса, сопоставимая с температурой плавления обрабатываемого материала. При обработке в струйных течениях электролита [3] на активном расходуемом аноде большой площади также фиксируются значительные температуры, способные привести к фазовым превращениям в материале детали. В процессе капельно-струйных режимов обработки поверхности с электролитическим катодом [4] формируется плазменный

столб с температурой в интервале 1000–5000 К [4]. Известные результаты требуют установления данных о температурах, возникающих в процессе фокусированной электролитно-плазменной обработки. Фокусирование плазменного столба магнитными системами также влияет на температуру процесса.

### Цель работы

Цель нашей работы – анализ тепловых явлений, возникающих в области активного расходуемого анода большой площади при капельно-струйной фокусированной электролитно-плазменной обработке.

Анализ литературных данных [1–5] показывает, что температура анода зависит от нескольких основных параметров процесса: соотношения площадей активного и пассивного электродов, формы, состава, концентрации, объема, скорости потока электролита; глубины погружения электрода в электролит; точки замера температуры по глубине; расстояния между электродами.

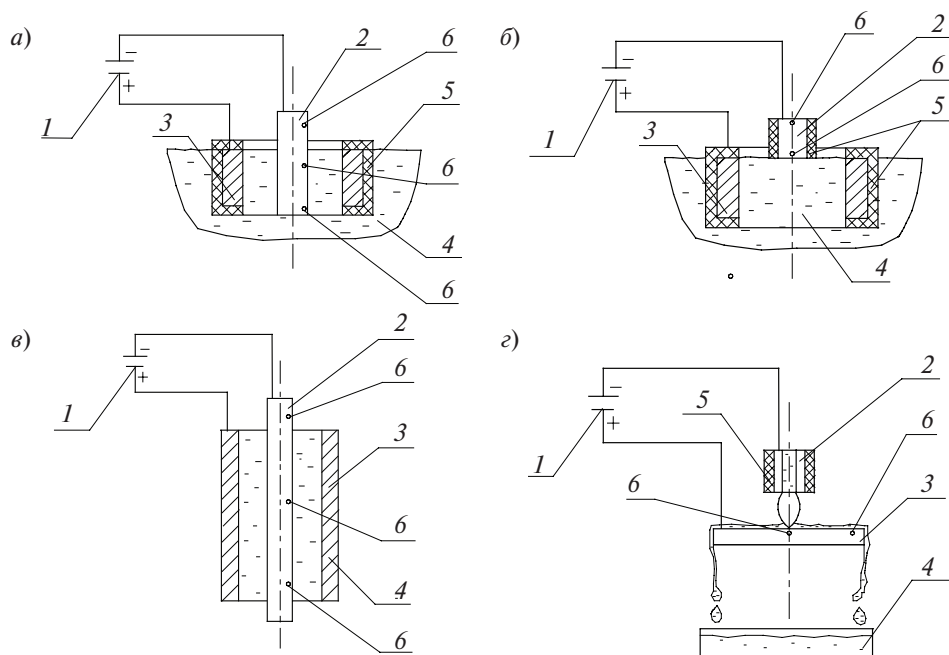


Рис. 1. Схемы определения температуры анода в электролитной плазме:

- (а – погружением цилиндрического анода в неподвижный электролит;
- б – погружением торцевой части анода в неподвижный электролит;
- в – погружением цилиндрического анода в проточный электролит) и
- положение катода над поверхностью анода (г) (1 – источник питания;
- 2 – катод; 3 – анод; 4 – электролит; 5 – изолятор; 6 – место замера температуры)

Известны следующие схемы измерения температуры анода при электролитно-плазменной обработке (рис. 1).

В соответствии со схемами (рис. 1, а, б, в) фиксировалась температура на активном аноде. В данных работах использовались неподвижные электролиты значительного объема или электролиты со скоростями потока от 1,2 до 8 л/мин и высокой плотностью тока (от 0,15 до 7,0 А/см<sup>2</sup>) [6], что определяет температуру, при которой могут происходить не только фазовые превращения, но и оплавление материала анода. Авторами [3] были проведены исследования температуры анода по схеме (рис. 1, г) при условии активного катода и струйных течений электролита. При этом температура анода достигала до 400 °С. Принимая во внимание тот факт, что наблюдается значительный разброс температур на поверхности анода, требуется установить режимы струйной фокусированной электролитно-плазменной обработки, которые бы обеспечивали низкую температуру поверхности изделия, исключаящую фазовые переходы.

### Материал и методика работы

Для изучения тепловых явлений использовался источник питания, собранный по схеме Ларионова [7]. В качестве электролита использовали водный раствор соли Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> с весовым содержанием 14,2 г/л. Электролит пропусклся через отверстие в катодном модуле в капельно-струйном режиме [4,10] с объемным расходом 0,02–0,28 л/мин при формировании фокусированного столба электролитной плазмы между срезом катодного модуля и обрабатываемой поверхностью в режиме активного катода.

При этом мы определяли температуры основных элементов системы: анода, катода, электролита в момент стекания с образца, электролита в приемной ванне, парогазовой среды в уловителе пара, в корпусе рабочей камеры.

Для повышения достоверности результатов измерение температур процесса проводилось двумя способами: методом искусственной термодуши и методом плавких индикаторов. Использовались три хромель-алюмелевые термодуши: одна – соединенная с аналоговым прибором, две – с цифровыми. Погрешность измерения, °С,

составляла соответственно 0,1; 0,1 и 0,01. Фиксирование температуры проводили при установившемся тепловом потоке с интервалом замеров не менее 7 минут, с шагом напряжения между электродами – 20 вольт.

В качестве плавкого индикатора выполняющего роль анода использовали олово в виде тонкой пластины толщиной 0,5 мм.

### Экспериментальное исследование

Нами проведен сравнительный анализ температурных зависимостей, полученных разными авторами [1-3, 8, 9] для анодного нагрева.

Зависимость, полученная авторами [2, 8] (рис. 2, кривая 1) характеризует изменение температуры при погружении образца в электролит. Отмечено, что совпадение по температуре двух процессов идет в интервале напряжений, описываемых законами Фарадея (участок АВ). На остальных участках при исследуемых температурах анода наблюдается значительное различие. Участок ВС кривой 1 характеризует нестабильный режим коммутации [9] и резкий скачок температуры. При этом на участке CD отмечено увеличение температуры более 800 °С. Участок DE характеризует резкое падение температуры, что соответствует процессу разбрызгивания электролита.

Зависимость, полученная авторами [3] (рис. 2, кривая 2) характеризует изменение температуры при струйных течениях электролита на неактивном аноде.

Исследование, проведенное нами (рис. 2, кривая 3), характеризует изменение температуры при струйной фокусированной обработке на неактивном аноде. Зависимость рабочих температур анода при напряжениях в интервале от 0–500 В показывает, что температура анода не поднимается выше 110 °С (кривая 3 на рис. 2). При этом максимальная температура анода наблюдается при 180–220 В, что соответствует максимальной мощности, выделяемой на межэлектродном промежутке. Вместе с тем установлено, что в интервале напряжений 300–500 В наблюдается резкое снижение температуры, что, по-видимому, связано с режимом коммутации, резким падением мощности и стабилизацией вольт-амперной характеристики по току.

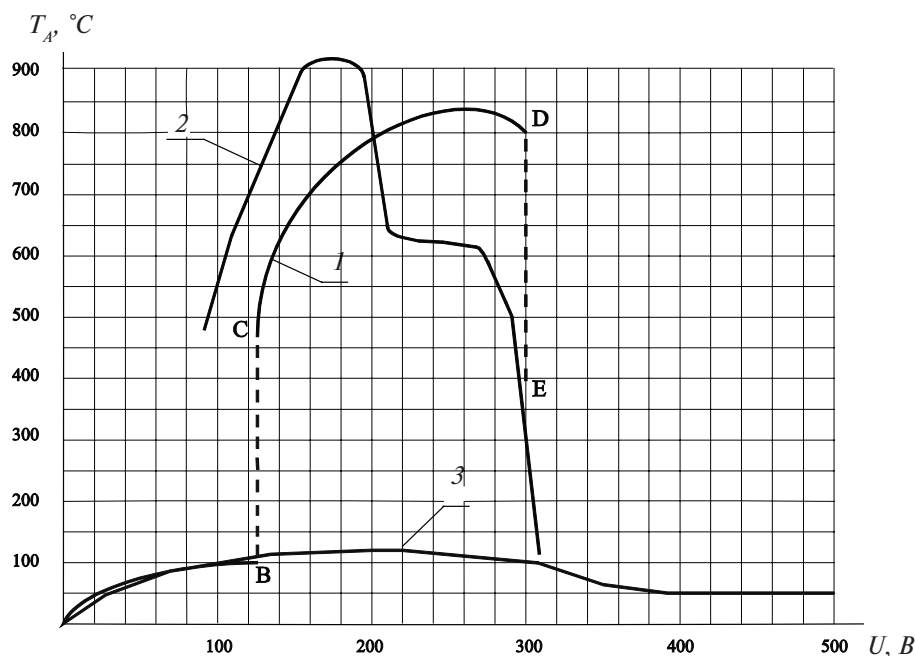


Рис. 2. Изменение температуры анода в зависимости от напряжения между электродами: 1 – температура на активном аноде при погружении образца в электролит [2, 8] (участок АВ – режим электролиза; ВС – нестабильный режим коммутации; CD – участок максимальных температур; DE – неустойчивый режим разбрызгивания электролита); 2 – температура на неактивном аноде при струйных течениях электролита [3]; 3 – температура на неактивном аноде при струйной фокусированной обработке

Оценка температуры методом плавких индикаторов позволила подтвердить фактические температуры на поверхности изделия.

Для стали 20Х13 после закалки (980–1030 °С) и отпуска (670–720 °С) [11] характерны рабочие температуры до 600 °С, связанные с плавным нагревом и охлаждением, однако резкий нагрев и охлаждение в интервале 250–350 °С приводит к повторной закалочной структуре этой стали.

Наличие оплавления или проплавления на пластине из олова ( $T_{пл} = 231,9$  °С) подтвердило бы факт достижения в рабочей зоне обработки температур, которые соответствуют температуре фазового превращения.

Исследования показали, что во всем диапазоне 0–500 В режимов струйной фокусированной электролитно-плазменной обработки на пластине из олова не наблюдалось блестящих зон оплавления, локальных мест проплавления или расплавления кромок в зоне разряда и местах стекания электролита. Этот факт подтверж-

дает: при обработке в капельно-струйном режиме при объемном расходе 0,02–0,28 л/мин отсутствуют температуры, превышающие  $T_{пл} = 231,9$  °С в поверхностном слое детали, что обеспечивает отсутствие фазовых превращений при обработке стали 20Х13.

Таким образом в процессе струйной фокусированной электролитно-плазменной обработки с малыми скоростями потока электролита наблюдается значительно меньшая температура по сравнению со струйной электролитно-плазменной обработкой при высоких скоростях протекания электролита или с электролитно-плазменной обработкой погружением в ванну.

Для оценки температурных полей анода, электролита, стекающего с образца, электролита в приемной ванне, парогазовой среды в уловителе пара, в корпусе рабочей камеры, мы измеряли температуры основных элементов системы в зоне обработки при фокусированной электролитно-плазменной обработке. Результаты измерения температур, °С, следующие:

Анод.....	(24–110) ± 5
Приемная ванна с электролитом...	(24–87) ± 5
Корпус рабочей камеры.....	(24–100) ± 5
Сток электролита с анода.....	(24–90) ± 5
Приемная ванна.....	(24–64) ± 5
Уловитель пара.....	(24–110) ± 5

Источником теплоты является зона разряда фокусированного пятна электролитной плазмы с поверхностью. В этой области происходит максимальное выделение тепла, величина которого изменяется в зависимости от разности приложенных потенциалов.

### Расчетное исследование

Нами рассмотрена область, характеризующая максимальную плотность теплового потока, формируемую в объеме  $V = U \cdot 1 \text{ см}^2$  [5] за счет выделяемой мощности, которую можно оценить так:

$$q\Sigma = \frac{I}{S} U,$$

где  $U$  – величина напряжения между поверхностью изделия и срезом катодного модуля,

соответствующая максимальной силе тока;  $U = 220 \text{ В}$ ;  $I$  – максимальная сила тока,  $I = 5,5 \text{ А}$ ;  $S$  – площадь поверхности контакта электролитной плазмы и анода.

Тогда выделяемая на поверхности детали мощность составляет

$$q\Sigma = \frac{I}{S} U = \frac{5,5}{\pi r^2} 220 = 1528 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}.$$

Соотношение, связывающее выделение и расход теплоты в процессе струйной фокусированной электролитно-плазменной обработки, отражает баланс теплоты, который можно записать так:

$$Q_{\text{тока}} + Q_{\text{окис}} = Q_A + Q_K + Q_{\Sigma} + Q_{\text{ок ср пар}} + Q_{\text{ок ср изл}}.$$

Здесь левая часть уравнения соответствует количеству теплоты, выделяемой в процессе полирования;  $Q_{\text{тока}}$  – количество теплоты, выделяющееся при прохождении электрического тока;  $Q_{\text{окис}}$  – количество теплоты, выделяющееся при окислении железа.

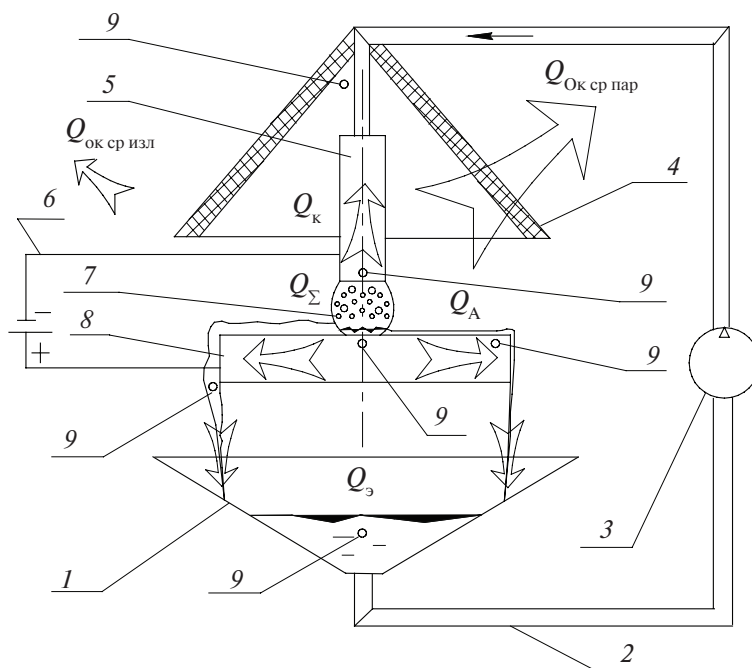


Рис. 3. Схема тепловых потоков при струйной фокусированной электролитно-плазменной обработке:  
1 – приемная ванна с электролитом; 2 – трубопровод; 3 – насос;  
4 – уловитель пара; 5 – катодный модуль; 6 – источник питания;  
7 – область фокусированного электролитно-плазменного разряда; 8 – анод; 9 – место замера температуры

Правая часть уравнения соответствует распределению тепловой энергии в процессе полирования;  $Q_A$  – тепловой поток, направленный в анод (обрабатываемый материал);  $Q_K$  – тепловой поток, направленный в катод;  $Q_3$  – тепловой поток, направленный в стекающий электролит;  $Q_{ок\text{ ср}}$  – тепловой поток, направленный в окружающую среду в виде пара;  $Q_{ок\text{ ср изл}}$  – тепловой поток, направленный в окружающую среду в виде излучения.

При проведении расчетов мы использовали методики, предложенные в работах [12–13].

*Количество теплоты  $Q_{тока}$ , выделяющееся при прохождении электрического тока, в соответствии с законом Джоуля–Ленца:*

$$Q_{тока} = U I t,$$

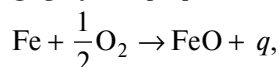
где  $t$  – время процесса соответствующее достижению полированной поверхности;  $t = 30$  с. Откуда

$$Q_{тока} = 220 \cdot 5,5 \cdot 30 = 36300 \text{ Вт.}$$

*Количество теплоты  $Q_{окис}$ , выделяющееся при окислении железа:*

$$Q_{окис} = \frac{q V}{t},$$

где  $q$  – теплота реакции окисления железа в соответствии с формулой [14]



где  $q = 822 \text{ кДж/моль}$ ;  $V$  – количество железа, удаленного с поверхностного слоя в процессе обработки, моль,

$$V = m_1 / M;$$

$m_1$  – масса железа удаленного с поверхностного слоя в процессе обработки, кг;

$$\begin{aligned} m_1 &= p_1 V = p_1 \pi R^2 L = \\ &= 7800 \cdot 3,14 \cdot 0,00003 \cdot 0,01 = 0,0024 \text{ кг,} \end{aligned}$$

где  $p_1 = 7800 \text{ кг/м}^3$  – плотность железа;  $V$  – объем материала удаленного полировкой.

Таким образом,

$$V = \frac{m_1}{M} = \frac{0,0024}{0,056} = 0,0429 \frac{\text{кг} \cdot \text{моль}}{\text{кг}} = 0,0429 \text{ моль,}$$

где  $M = 0,056 \text{ кг/моль}$ .

Тогда

$$\begin{aligned} Q_{окис} &= \frac{q \cdot V}{t} = \frac{822,0 \cdot 10^3 \cdot 0,0429}{30} = \\ &= 392 \frac{\text{Дж} \cdot \text{моль}}{\text{моль} \cdot \text{с}} = 1175 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

где  $t$  – время полировки поверхности;  $t = 30$  сек.

*Количество теплоты  $Q_{эл}$ , поглощенное электролитом:*

$$Q_3 = C m \Delta T,$$

где  $C$  – массовая теплоемкость электролита; поскольку основной составляющей электролита является вода, принимаем  $C = 4200 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$ ;

$m$  – масса нагреваемого электролита,

$$m = p V;$$

$p$  – плотность электролита  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ;  $p = 1070 \text{ кг/м}^3$ ;  $V$  – объем электролита, в нашем случае замерен мерной посудой и составил  $V = 0,0001375 \text{ м}^3$  за время обработки, равное  $t = 30$  сек.

Из формулы

$$V = \pi \frac{d^2}{4} v t,$$

где  $d$  – внутренний диаметр трубки подачи электролита,  $d = 0,003 \text{ м}$ ;  $v$  – скорость течения электролита,  $\frac{\text{м}}{\text{с}}$ ,  $t$  – время полировки поверхности,  $t = 30$  сек; рассчитаем скорость течения электролита:

$$v = \frac{V 4}{\pi d^2 t} = \frac{0,0001375 \cdot 4}{3,14 \cdot 0,003^2 \cdot 30} = 0,65 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

$\Delta T$  – допустимое изменение температуры, в нашем случае  $\Delta T = 30^\circ \text{C}$ .

Вычислим количество теплоты, направленное в электролит:

$$\begin{aligned} Q_3 &= C m \Delta T = \\ &= 4200 \cdot (1070 \cdot 0,00012375) \cdot 30 = 18538 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

*Количество теплоты  $Q_A$ , направленное в анод (обрабатываемый материал):*

Рассмотрим количество теплоты, поступающее в обрабатываемый материал при электролитно-плазменном полировании площади  $S = 3,14 \text{ см}^2$  на образце из стали 20Х13.

Уточним, что сопротивление разряда электролитно-плазменного полирования складывается из трех частей:

$$R_{\text{разряда}} = R_{\Sigma} - R_{\text{пр}} - R_{\text{э}},$$

где  $R_{\Sigma}$  – общее сопротивление цепи;  $R_{\text{пр}}$  – сопротивление на проводах, принято  $R_{\text{пр}} = 5$  Ом;  $R_{\text{э}}$  – сопротивление электролита. Тогда суммарное сопротивление найдем из закона Ома:

$$R_{\Sigma} = \frac{U}{I} = \frac{U}{(J \cdot S)} = \frac{220}{1,75 \cdot 3,14} = 40 \text{ Ом}.$$

Рассмотрим сопротивление электролита

$$R_{\text{э}} = k l,$$

где  $k$  – удельная электропроводность, вычисляемая по следующей формуле:

$$k = k_{18} (1 + \beta (t_{\text{э}} - 18));$$

$k_{18}$  – электропроводность, Ом/м, электролита при температуре 18 °С;  $\beta$  – температурный коэффициент;  $t_{\text{э}}$  – температура электролита, °С.

Рассчитаем удельную электропроводность электролита:

$$k = 2,03 \cdot (1 + 0,0022 \cdot (90 - 18)) = 5,25 \frac{\text{Ом}}{\text{м}}.$$

С учетом расстояния между катодом и анодом  $l = 0,6$  см.

$$R_{\text{э}} = k l = 5,25 \cdot 0,006 = 0,0315 \text{ Ом}.$$

Сопротивление разряда с учетом потерь на проводах и электролите

$$R_{\text{разр}} = R_{\Sigma} - R_{\text{пр}} - R_{\text{э}} = 40 - 5 - 0,0315 = 34,97 \text{ Ом}.$$

Отсюда количество теплоты  $Q_{\text{А}}$ , направленное в анод, равно

$$Q_{\text{А}} = R_{\text{разр}} I^2 = 34,97 \cdot 5,5^2 = 1058 \text{ Вт}.$$

Количество теплоты  $Q_{\text{ок ср}}$ , направленное в окружающую среду в виде пара. Плотность теплового потока при пленочном кипении можно оценить по формуле

$$Q_{\text{ок ср-пар}} = \alpha (t_{\text{п}} - t_{\text{ж}}),$$

где  $t_{\text{п}}$  – температура пара, °С;  $t_{\text{ж}}$  – температура жидкости, °С;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м<sup>2</sup> · °С).

Тогда коэффициент теплоотдачи «жидкость – окружающая среда» равен

$$\alpha = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_{\text{ж}}}{X},$$

где Nu – число Нуссельта;  $X = 0,01$  – характеристическая длина анода, м.

Число Нуссельта при пленочном кипении

$$\text{Nu} = 0,25 \left[ \frac{(X^3 \rho_{\text{пар}} (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{пар}}) g C_{\text{р пар}})}{\mu_{\text{пар}} \lambda_{\text{пар}}} \right]^{\frac{1}{3}},$$

где  $\rho_{\text{пар}} = 0,5863$  – плотность пара, кг/м<sup>3</sup>;  $g = 9,8$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\rho_{\text{ж}} = 1070$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $C_{\text{р пар}} = 2060$  – удельная теплоемкость пара, Дж/(кг · °С);  $\mu_{\text{пар}} = 1,27 \cdot 10^{-5}$  – динамическая вязкость пара, Н · с/м<sup>2</sup>;  $\lambda_{\text{пар}} = 0,0246$  – коэффициент теплопроводности пара, Вт/(м · °С).

Тогда число Нуссельта

$$\text{Nu} = 0,25 \left[ \frac{(0,01^3 \cdot 0,5863 (1070 - 0,5863) \cdot 9,8 \cdot 2060)}{1,27 \cdot 10^{-5} \cdot 0,0246} \right]^{\frac{1}{3}} = 249,3.$$

Коэффициент теплоотдачи конвекцией находим так:

$$\alpha = \frac{249,3 \cdot 0,68}{0,01} = 5652 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}}.$$

Плотность теплового потока:

$$q_{\text{ок ср}} = 5652 (110 - 90) = 113040 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Тепловой поток от жидкости в окружающую среду в виде пара:

$$Q_{\text{ок ср}} = q_{\text{ок ср}} S = 113040 \cdot 0,0314 = 3549 \text{ Вт}.$$

где  $S = 0,0314$  площадь заготовки, м<sup>2</sup>.

Количество теплоты  $Q_{\text{изл}}$ , направленное в окружающую среду в виде излучения. Дополнительно к этому составляющей теплового потока является излучение формирующееся в области исследуемых напряжений (280–500 В). Однако по литературным данным [1] вклад его в общий тепловой поток незначителен – не превышает 5 %.

Количество теплоты  $Q_{\text{к}}$ , направленное в катод. Запишем полученное уравнение общего теплового баланса:

$$Q_{\text{тока}} + Q_{\text{окис}} = Q_{\text{А}} + Q_{\text{к}} + Q_{\text{э}} + Q_{\text{ок ср пар}} + Q_{\text{ок ср изл}} = 1175 + 36300 = 1058 + Q_{\text{к}} + 18538 + 3549 + 1835.$$

Отсюда

$$Q_{\text{к}} = 37475 - 25025 = 12450 \text{ Вт}.$$

## Обсуждение результатов

Расчет показывает, что значительная часть теплового потока идет на нагрев катодного модуля. Это в определенной мере подтверждается поведением материалов, используемых в качестве материала катода. Поверхность алюминия в процессе работы покрывается белым окислом, а поверхность меди приобретает темно-красный оттенок как в процессе отжига.

В целом распределение теплового потока от общего источника тепла в виде струи фокусированной электролитной плазмы при капельно-струйной подаче электролита представлено на рис. 4.

Процентное распределение тепловых потоков на входе процесса:

тепловой поток, формирующийся при прохождении электрического тока, составляет 95–99 %;

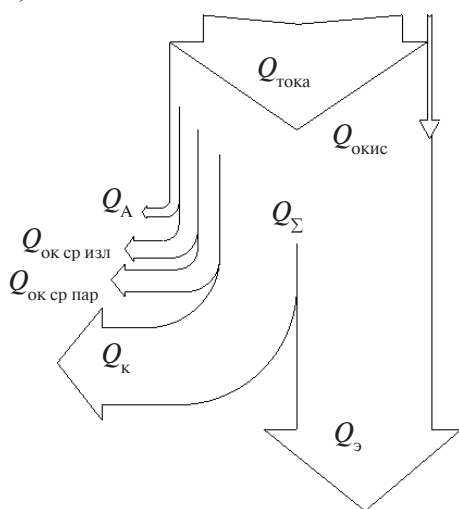


Рис. 4. Распределение тепловых потоков при струйной фокусированной электролитно-плазменной обработке

тепловой поток, формирующийся при окислении железа, составляет 1–5 %.

Процентное распределение тепловых потоков на выходе процесса:

тепловой поток, направленный в анод, составляет 3–8 %;

тепловой поток, направленный в катод (катодный модуль), составляет 30–35 %;

тепловой поток, направленный в стекающий электролит, составляет 50–55 %;

тепловой поток, направленный в окружающую среду в виде пара, составляет 10–15 %;

тепловой поток, направленный в окружающую среду в виде инфракрасного излучения, составляет 1–5 %.

Таким образом, показано, что существует технологическая возможность применения струйной фокусированной обработки для полирования поверхности стали 20Х13 без изменения ее фазового состава в процессе обработки.

## Выводы

Выявлены отличия в температуре между формированием электролитной плазмы погружением, протоком и струйной фокусированной обработкой, показано существенное снижение температуры анода в процессе обработки.

Рассмотрены основные закономерности распределения температуры в зоне обработки.

Предложена физическая модель теплового процесса струйной фокусированной электролитно-плазменной обработки.

Показана технологическая возможность применения струйной фокусированной обработки для полирования поверхности изделий из стали 20Х13.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Словецкий Д.И., Терентьев С.Д. Параметры электрического разряда в электролитах и физико-химические процессы в электролитной плазме // Химия высоких энергий. 2003. Т. 37. № 5. С. 355–362.
2. Суминов И.В., Белкин П.Н., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Крит Б.Л., Борисов А.М. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. М.: Техносфера, 2011. 464 с.
3. Куликов И. С., Вашенко С. В., Каменев А. Я. Электролитно-плазменная обработка материалов. — Минск: Беларус. навука, 2010. 232 с. ISBN 978-985-08-1215-5.
4. Гайсин Ал.Ф., Гайсин А.Ф., Гайсин Ф.М. Многоканальный разряд между твердым и электролитическим электродами в процессах модификации материалов при атмосферном давлении // «Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий». Научно-техническая конференция с элементами школы: сборник статей / Казанский государственный технологический университет. Казань: Изд-во КГТУ, 2010. С. 9–20.

5. Григорьев А.И. О переносе энергии и формировании электрического тока в окрестности опущенного в электролит, сильно нагретого протекающим током электрода // Журнал технической физики. 2004. Т. 74. Вып. 5. С. 38–43.

6. Патент RU 2357019. Способ электролитно-плазменной обработки деталей.

7. Веселовский А.П., Ушомирская Л.А. Интенсификация технологических процессов изготовления деталей машин при использовании различных видов энергии // Металлообработка. 2010. № 2. С. 46–49. ISSN 1684–6702.

8. Плотников Н.В., Смыслов А.М., Таминдаров Д.Р. К вопросу о модели электролитно-плазменного полирования поверхности // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17. № 4 (57). Уфа: Изд-во УГАТУ, 2013. С. 90–95.

9. Дураджи В.Н., Капуткин Д.Е. Обработка алюминия в электролитной плазме при анодном процессе // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2015. Т. 3, № 3. С. 38–41.

10. Гайсин Ал.Ф., Сон Э.Е. Паровоздушные разряды между струйным электролитическим катодом и металлическим анодом при пониженных давлениях

// Теплофизика высоких температур. 2010. Т. 48. Вып. 3. С. 470–472.

11. Корнеев А.Е., Громов А.Ф., Кисилев А.М. Влияние  $\delta$ -феррита на свойства мартенситных сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. 2013. № 8. С. 46–50.

12. Шаталов В.К., Штокал А.О., Блатов А.А. Микроволновое оксидирование поверхностей изделий вне ванны // Наука и Образование. МГТУ имени Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 3. С.1–4.

13. Новиков В.И. Повышение эффективности изготовления сложно-профильных деталей из легированных сталей методом электролитно-плазменного полирования: Диссертация ... кандидата технических наук: 05.02.07 / Новиков В. И.: С.-Петерб. гос. политехн. ун-т. Санкт-Петербург, 2010. 177 с.

14. Ермолаев Г.В. Теоретическое и экспериментальное моделирование влияния окисления на эффективность кислородной газолазерной резки металла: Автореферат диссертации ... кандидата физико-математических наук: специальность 01.02.05 / Ермолаев Г.В.; Ин-т теорет. и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН. Новосибирск, 2010. 19 с.

## REFERENCES

1. Slovetsky D.I., Terentyev S.D. Parametry elektricheskogo razryada v electrolitakh I fiziko-khimicheskiye protsessy v electrolitnoy plasma. *Khimiya vysokikh energy*. 2003, T. 37, № 5. S. 355–362. (rus.)

2. Suminov I.V., Belkin P.N., Epelfeld A.V., Lyudin V.B., Crete B.L., Borisov A.M. Plazmenno-electroliticheskoye modifitsirovaniye poverkhnosti metallov I splavov. Moskva: Technosfera, 2011. 464 s. (rus.)

3. Kulikov I.S., Vashchenko S.V., Kamenev A.Y. Electrolitno-plazmennaya obrabotka materialov. Minsk, Belarus: Navuka, 2010. 232 s. (rus.)

4. Gysin Al.F., Gysin A.F., Gysin F.M. Mnogokanalnyy razryad mezhdym I elektroliticheskim elektrodami v protsessakh modifikatsii materialov pri atmosfernom davlenii. «Nizkotemperaturnaya plazma v protsessakh naneseniya funktsionalnykh pokrytiy». *Nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya s elementami shkoly: sbornik statey / Kazanskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskiiy universitet*. Kazan: Izd-vo KSTU, 2010. S. 9–20. (rus.)

5. Grigoriev A.I. O perenose energii I formirovaniye elekticheskogo toka v okrestnosti opushchennogo v elektrolit, silno nagretogo protekayushchim tokom elektroda. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2004. T. 74. Vyp.5. S. 38–43. (rus.)

6. Патент RU 2357019. Sposob electrolitno-plazmennoy obrabotki detaley [Patent RU 2357019 Method for electrolytic-plasma treatment of details]. (rus.)

7. Veselovsky A.P., Ushomirskaya L.A. Intensifikatsiya tekhnologicheskikh protsessov izgotovleniya detaley

machin pri ispolzovanii razlichnykh vidov energii. *Metalloobrabotka*. 2010. № 2. S. 46–49. (rus.) ISSN 1684–6702.

8. Plotnikov N.V., Smyslov A.M., Tamindarov D.R. K voprosu o modeli elektrolitno-plazmennogo polirovaniya poverkhnosti. *Vestnik UGATU*. T. 17. № 4 (57). Ufa: UGATU, 2013. S. 90–95. (rus.)

9. Duradzi V.N., Kaputkin D.E. Obrabotka alyuminiya v elektrolitnoy plazme pri anodnom protsesse. *Mashinostroyeniye: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*. 2015. T. 3. № 3. S. 38–41.

10. Gaysin Al.F., Son E.Ye. Parovozdushnyye razryady mezhdym struynym elektroliticheskim katodom I metallicheskim anodom pri ponizhennykh davleniyakh. *Teplofizika vysokikh temperatur*. 2010. T. 48. Vyp. 3. S. 470–472. (rus.)

11. Korneev A.E., Gromov A.F., Kiselev A.M. Vliyanie  $\delta$ -ferrita na svoistva martensitnykh stalei. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka stalii*. 2013. № 8. S. 46–50.

12. Shatalov V.K., Shtokalo A.O., Blatov A.A. Mikrodogovoie oksidizovanie poverkhnostey izdeliy vne vann. *Nauka i Obrazovaniye. MGTU im. N.E. Baumanf. Elektron. zhurn*. 2015. № 3. S. 1–4. (rus.)

13. Novikov V.I. Povysheniye effektivnosti izgotovleniya slozhno-profilnykh detaley iz legirovannykh staley metodom elektrolitno-plazmennogo polirovaniya: Dissertatsiya ... kandidata tekhnicheskikh nauk: 05.02.07 / Novikov V.I. St-Peterb. gos. politekhn. un-t. Sankt-Petersburg, 2010. 177 s. (rus.)

14. **Ermolaev G.V.** Theoreticheskoye I eksperimentalnoye modelirovaniye vliyaniya okisleniya na effektivnost kislородной газозазерной rezki metalla: Avtoreferat dissertatsii ... kandidata fiziko-matematicheskikh nauk:

spetsialnost 01.02.05. / Yermolaev G.V.; In-t teoret. i prikladnoy mekhaniki im. S.A. Khristianovicha SO RAN. Novosibirsk, 2010. 19 s. : Il.; 21 cm. (rus.).

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

**ПОПОВ Александр Иннокентьевич** — кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: profbaikl@yandex.ru

**POPOV ALEKSANDR I.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: profbaikl@yandex.ru

**ТЮХТЯЕВ Михаил Иванович** — кандидат технических наук заместитель технического директора ПАО “Силовые машины”.

195009, Санкт-Петербург, ул. Ватутина, 3А..

E-mail: Tyukhtyaev\_MI@lmz.power-m.ru

**TYUKHTYAEV Mikhail I.** — OJSC “Power Machines”.

3A, Vatutina str., St. Petersburg, Russia, 195009..

E-mail: Tyukhtyaev\_MI@lmz.power-m.ru

**РАДКЕВИЧ Михаил Михайлович** — доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: mmftkm@yandex.ru

**RADKEVICH Mikhail M.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: mmftkm@yandex.ru

**НОВИКОВ Виталий Иванович** — кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: novikov@yandex.ru

**NOVIKOV Vitalii I.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: novikov@yandex.ru