

ВЛИЯНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОЛИТА НА ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ НАГРЕВАЕМОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ДЕТАЛИ

А.О. Комаров, Т.Л. Мухачева, И.Г. Дьяков, П.Н. Белкин

*Костромской государственной университет им. Н.А. Некрасова,
ул. 1 Мая, 14, г. Кострома, 156961, Россия, belkinp@yandex.ru*

Измерены распределения температуры по оси цилиндрических стальных образцов, нагреваемых в различных гидродинамических условиях. Показано, что сосредоточенное продольное обтекание обрабатываемых изделий приводит к вертикальному градиенту температуры нагрева, который зависит от величины температуры, размеров детали и скорости течения электролита. Предложены методы распределенного обтекания деталей с помощью радиальных или продольных потоков, позволяющих снизить градиент температуры по вертикали до 0,8–3°C/мм.

УДК 621.785.53; 621.3.035.183

ВВЕДЕНИЕ

Промышленная реализация электрохимико-термического упрочнения металлов и сплавов требует создания условий стабильного нагрева с управляемым распределением температуры по поверхности изделия. При исследовании возможностей катодного или анодного нагрева в водных электролитах этим вопросам часто не уделяется должного внимания. Электрохимическая модификация материалов изучается на небольших образцах в виде дисков, пластин или стержней в различных гидродинамических условиях. Например, для измерения вольт-амперных характеристик процесса использовалась ячейка Н-типа с разделенными катодными и анодными пространствами без циркуляции электролита и без его охлаждения [1]. Катодное азотирование чугуна или сталей также проводилось в электрохимической ячейке без указаний на стабилизацию температуры электролита [2, 3]. Такая методика дает основания для сомнений по поводу необходимой стабилизации температуры электролита и требуемой повторяемости измерений. Лучшие условия создает перемешивание электролита в рабочей камере, охлаждаемой снаружи водопроводной водой [4, 5], что позволяет стабилизировать температуру, но только для образцов ограниченного размера [6]. Контролируемая гидродинамика, например продольное обтекание детали электролитом, создает более стабильные условия и по этой причине применяется для химико-термического насыщения при стационарном нагреве [7, 8]. Исключение составляет электролитно-плазменное насыщение в нестационарных условиях, при которых отдельные участки изделия нагреваются до высоких температур на доли секунды и тут же охлаждаются электролитом. Такая технология позволяет проводить быстрый отжиг наклепанной стали [9], нитроцементацию [10] или очистку стальной поверхности с последующим осаждением цинкового или алюминиево-цинкового покрытия [11]. Однако и здесь авторы отмечают необходимость стабилизации температуры электролита в заданном диапазоне. Отметим еще два важных преимущества обработки в проточном электролите: возможность увеличения объема для повышения его работоспособности и удобство корректировки состава, включая фильтрацию.

Переход от небольших образцов к относительно протяженным деталям требует учета влияния их формы и размеров на режимы обработки и получаемые результаты. Наличие такого влияния усложняет проектирование режимов обработки (напряжения или температуры нагрева, продолжительности насыщения и др.), а также ограничивает класс обрабатываемых деталей. Например, во многих приложениях требуется достаточно равномерное распределение твердости или иных свойств по рабочей поверхности или объему изделия. Для этого необходимо создать относительно равномерное распределение температуры, от которой зависят едва ли не все параметры и результаты химико-термического насыщения.

Между тем распределение температуры по поверхности нагреваемой детали, как правило, не является однородным. Уже визуальные наблюдения в ранних публикациях позволили обнаружить, что наиболее высокая температура в условиях неконтролируемой гидродинамики достигается в нижней части нагреваемого изделия [12]. Измерения вертикального градиента температуры по поверхности цилиндра дали 20°C/мм для катодного процесса [13] и 5–15°C/мм для анодного [14, 15]. Очевид-

ной причиной неоднородного распределения температуры по вертикали является неодинаковое по высоте выделение энергии из-за расширения парогазовой оболочки. Кроме того, имеет место утечка тепла в выступающую из электролита часть нагреваемого электрода. Градиент температуры в радиальном направлении оказался незначительным как по теоретическим оценкам [14], так и согласно экспериментальным данным [16].

Для управления распределением температуры по поверхности детали необходимо воздействовать на парогазовую оболочку, поскольку именно она представляет собой специфический нагревательный элемент в системе. В качестве одного из средств управления температурой рекомендовались разнообразные экраны, окружающие нагреваемую деталь [17]. Их действие основано на компенсации токов путем введения в цепь дополнительного сопротивления. Кроме того, экраны изменяют поле скоростей в электролите, а значит, и распределение температур в нем. Недостатком метода являются дополнительные потери энергии, поэтому более эффективным представляется гидродинамическое воздействие на парогазовую оболочку.

Увеличение скорости продольного обтекания детали в изученных пределах позволило снизить ее вертикальный градиент температуры примерно в 2 раза: от 8–11 до 4–5°C/мм. Такой результат получен при нагревании образцов с размерами 10×10×70 мм из стали 3 кп или железного графита ЖГр1Д2 в растворе для цементации, содержащем хлорид аммония и глицерин [18]. Для менее теплопроводного пористого железного графита характерны более высокие значения градиента температуры при нагреве.

На температуру вертикально ориентированной нагреваемой цилиндрической детали влияют горизонтальные (радиальные) потоки раствора, направленные перпендикулярно боковой поверхности детали. Для управления распределением температуры детали предложено использовать сосредоточенную подачу электролита на ее отдельный участок [19]. Подача струи на верхнюю часть электрода диаметром 10 мм и высотой 20 мм, то есть у поверхности электролита, позволила повысить температуру этого участка и тем самым снизить градиент температур по вертикали. Локальное повышение температуры тем выше, чем больше скорость затопленной струи. Сосредоточенная подача радиальных потоков, безусловно, приводит к локальному сжатию парогазовой оболочки, следствием чего является возрастание плотности тока и выделяемой мощности на данном участке анода. С одной стороны, радиальная струя осуществляет механическое воздействие на оболочку, вызывающее ее сжатие под действием дополнительного давления; с другой – подачу охлажденного раствора в зону нагрева, где электролит уже перегрет. Поэтому локальное охлаждение раствора должно способствовать утонению оболочки с тем же результатом. Эта гипотеза получила экспериментальное подтверждение при нагреве образца диаметром 10 мм и длиной 20 мм в рабочей камере, где отток перегретого электролита осуществлялся не переливом через край камеры, а тороидальным формирователем, окружающим образец [20]. Оказалось, что температура образца увеличивается по мере роста скорости оттока электролита из прианодной области.

Установлено, что подача радиальных струй на верхние участки цилиндрического анода позволяет уменьшить разность температур на длине 70 мм от 200 до 50°C [21]. Такой результат получен при напряжении 160 В в растворах хлорида или нитрата аммония. Максимальная температура нагрева не превышала 700°C, что недостаточно для эффективного упрочнения большинства конструкционных сталей закалкой или цементацией с закалкой.

Возможно совмещение радиального и вертикального потоков. Для этого раствор после охлаждения в теплообменнике подавали не только в осевой патрубке, расположенный на дне нагревательного устройства, но и в патрубки, формирующие радиальные потоки. Такая схема позволила улучшить закалку цилиндрических образцов из стали 45 диаметром 10 мм и длиной 50 мм [8]. Твердость по длине образца изменялась от 50 до 60 HRC при скорости подачи электролита 2,0 л/мин с радиальными потоками. При обтекании только вертикальными потоками твердость изменялась от 20 до 60 HRC.

Полученные результаты указывают на перспективность выравнивания температуры с помощью контролируемой гидродинамики, в частности подачей сосредоточенных струй электролита. Однако для разработки конкретных рекомендаций по назначению режимов обработки и конструированию рабочих камер необходимы дальнейшие исследования, в том числе изучение возможности управления температурным полем с помощью распределенных потоков электролита. Поэтому цель данной работы – расширенное изучение температурного поля нагреваемых цилиндрических деталей при различных условиях обтекания распределенными радиальными и вертикальными потоками электролита.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Нагрев образцов проводился в цилиндрической рабочей камере с электролитом – 10% водным раствором хлорида аммония при температуре $26 \pm 5^\circ\text{C}$ на выходе из теплообменника. Раствор готовился на дистиллированной воде с использованием реактива технической чистоты 1-го сорта (ГОСТ 3773-72). Расход электролита, измеряемый ротаметром РМФ-0-16-ЖУЗ, изменялся краном на входе в рабочую камеру от 1,2 до 6,2 л/мин.

Нагрев образцов осуществлялся тремя способами. Первый способ предусматривал погружение в указанную рабочую камеру без дополнительных приспособлений, то есть с подачей охлажденного электролита через патрубок на оси камеры. Температура нагрева измерялась хромель-алюмелевыми термопарами, сигнал которых подавался на мультиметры Mastech MY-64, сила тока – мультиметром Mastech MS2101 и напряжение – вольтметром ЛМ-1 (класс точности 0,5).

Нагрев выполнялся следующим образом. Образец под напряжением 200 В погружался в электролит со скоростью 1 мм/с на заданную глубину. После погружения устанавливалось заданное напряжение, и через 5 мин измерялись сила тока и распределение температуры перемещением термопары по осевому отверстию образца. Кроме того, измерялась температура электролита на входе и выходе из теплообменника.

При нагреве вторым способом в камере формировались радиальные потоки с помощью распределительного кольца диаметром 70 мм, в котором были просверлены 16 отверстий диаметром 1 мм каждое для подачи охлажденного электролита в прианодную зону (4 ряда по 4 отверстия) насосом WILO PM-030PE (рис. 1). Отвод электролита осуществлялся через два патрубка в основании рабочей камеры.

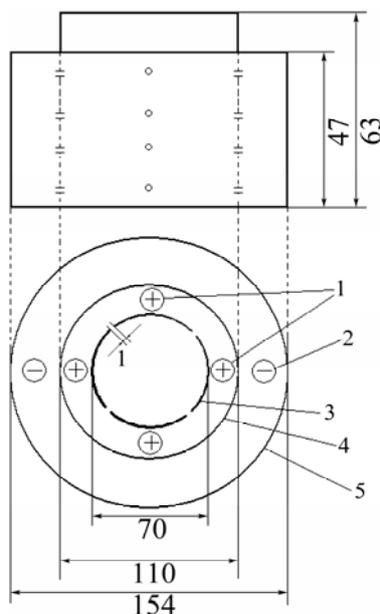


Рис. 1. Схема устройства подачи радиальных потоков. 1 – входные отверстия; 2 – сливные отверстия; 3 – кольцо-катод; 4 – граница внутренней части камеры; 5 – внешняя граница рабочей камеры

Третий способ предусматривал распределенное продольное обтекание несколькими струями, удаленными от оси образца. Нагрев проводился в рабочей камере с переливом электролита через край и дальнейшей подачей в теплообменник [22].

Нагреванию подвергались цилиндрические образцы из сталей 50, У8 и 12Х18Н10Т диаметром от 6 до 20 мм и длиной от 30 до 60 мм, вертикально погружаемые в электролит на 20–50 мм. Производитель сталей – ОАО «Металлургический завод им. А. К. Серова». Перед нагревом образцы зачищались наждачной бумагой и обезжиривались.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Приведем результаты измерений распределения температуры по оси образца, нагреваемого без дополнительных воздействий по первому способу, как это реализуется в опытно-промышленных установках анодного нагрева типа «УХТО». На рис. 2 и 3 представлены распределения температур для образцов различной длины, где координата z отсчитывается от основания образца вверх. Градиент температуры в вертикальном направлении зависит от скорости течения электролита. Увеличение рас-

хода электролита позволяет повысить среднюю температуру нагрева образцов, погруженных на 60 мм, от 820 до 870°C. Для более коротких образцов эффект примерно тот же (табл. 1). Кроме того, более интенсивная подача электролита способствует снижению вертикального градиента температуры и среднеквадратичного отклонения температуры. Там же показано, что при увеличении диаметра образцов снижаются их средняя температура, ее среднеквадратичное отклонение и градиент при прочих равных условиях.

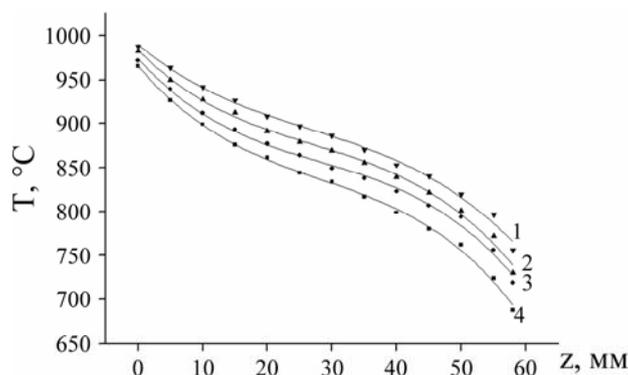


Рис. 2. Зависимость осевой температуры образца от вертикальной координаты точки измерения. Напряжение – 200 В. Сосредоточенное продольное обтекание. Расход электролита, л/мин: 1 – 6,4; 2 – 5,0; 3 – 3,9; 4 – 2,8. Диаметр образца – 10 мм, длина – 70 мм, глубина погружения – 60 мм

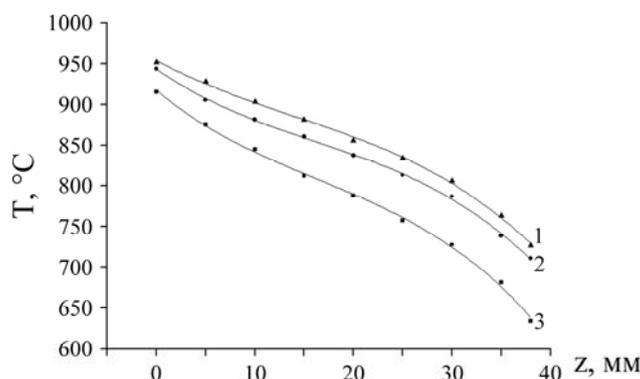


Рис. 3. Зависимость осевой температуры образца от вертикальной координаты точки измерения. Напряжение – 200 В. Сосредоточенное продольное обтекание. Расход электролита, л/мин: 1 – 6,5; 2 – 4,6; 3 – 2,3. Диаметр образца – 20 мм, длина – 50 мм, глубина погружения – 40 мм

Таблица 1. Характеристики распределения температуры по оси цилиндрических образцов длиной 40 мм. Напряжение 200 В

Диаметр, мм	10	10	10	20	30
Расход электролита, л/мин	2,8	4,6	6,5	6,4	6,4
Средняя температура, °С	894	942	970	857	784
Среднее квадратичное отклонение от средней температуры, °С	91	86	78	59	56
Средний градиент, °С/мм	11	10	9	5,9	5,7

Увеличение напряжения до 260 В приводит к ожидаемому повышению средней температуры, но существенно не изменяет характер ее распределения вдоль оси образца [23]. Кроме того, повышение температуры образца сопровождается ростом ее среднеквадратичного отклонения и вертикального градиента температуры (табл. 2).

Таблица 2. Характеристики распределения температуры по оси цилиндрического образца диаметром 10 и длиной 40 мм. Расход электролита – 6,4 л/мин

Напряжение, В	130	150	170	200	260	300
Средняя температура, °С	792	829	894	970	1054	1006
Среднее квадратичное отклонение от средней температуры, °С	57	56	71	78	83	67
Средний градиент, °С/мм	6,4	6,5	8,4	8,9	9,6	7,7

Второй способ нагрева с применением радиальных распределенных потоков позволяет снизить градиент температуры. На рис. 4 представлено распределение температуры по высоте образца. Средняя температура нагрева растет при увеличении напряжения до 260 В, далее снижается, что соответствует всем результатам, полученным в растворе хлорида аммония различными авторами [8].

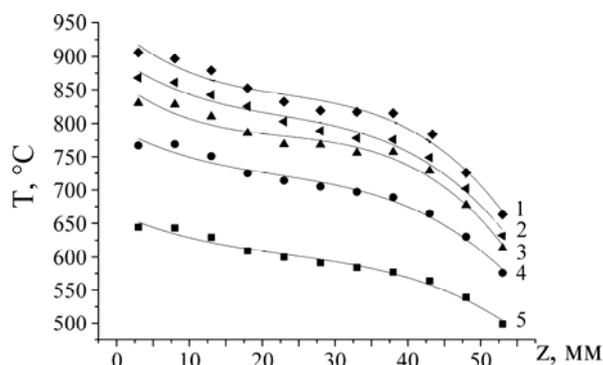


Рис. 4. Распределение температуры по высоте образца диаметром 14 мм и длиной 60 мм, погруженного в электролит на 50 мм. Напряжение, В: 1 – 260; 2 – 300; 3 – 180; 4 – 140; 5 – 100

Радиальное обтекание позволяет снизить градиент температуры на большей части длины образца (40 мм) приблизительно до 2 град/мм. Однако по всей длине нагреваемого участка градиент достигает 2,5–4 град/мм за счет падения температуры в верхней части образца вблизи поверхности электролита. Этот факт подчеркивает роль расширения оболочки, максимального в верхней части, и, возможно, отвода тепла в выступающую часть образца вместе с системой крепления и токоподвода. Следует учесть, что из-за особенностей конструкции радиальные струи не подавались на верхние 20 мм образца. Для образцов меньшего диаметра характерны в среднем более высокие значения градиента температуры (табл. 3).

Таблица 3. Средние значения градиента температуры при обтекании образцов распределенными радиальными потоками электролита. Длина образцов – 70 мм, глубина погружения – 60 мм

Диаметр образца, мм	Напряжение, В										
	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300
Градиент температуры, °C/мм											
6	6,33	5,57	6,63	8,37	8,00	7,63	7,57	7,03	8,87	8,30	6,23
8	4,10	4,00	4,83	5,90	6,30	6,23	6,27	6,17	6,80	6,83	6,07
10	4,97	6,43	7,17	7,30	7,83	8,37	9,13	9,10	9,53	9,57	9,10
12	4,60	4,83	5,47	6,27	6,17	6,37	7,10	6,27	6,67	7,20	7,13

Увеличение глубины погружения образца при прочих равных условиях приводит к снижению градиента температуры (рис. 5). По нашему мнению, этот факт объясняется скорее отводом тепла в выступающую часть образца, нежели расширением парогазовой оболочки. Экспериментальные данные по профилю оболочки на сегодняшний день отсутствуют, известные теоретические модели предсказывают ее расширение в вертикальном направлении по различным степенным законам [8]. Роль неравномерного по высоте выделения энергии по мере удлинения образца будет повышаться, если толщина оболочки будет расти при увеличении вертикальной координаты быстрее, чем по линейному закону. Но для такой гипотезы нет никаких оснований. С другой стороны, доля тепла, отводимого из погруженной части образца в выступающую из электролита, должна расти при увеличении глубины его погружения. Тепло из оболочки поступает в образец через поверхность их контакта, пропорциональную глубине погружения. Это же тепло уходит в выступающую из электролита часть образца через его поперечное сечение. Чем меньше глубина погружения, тем меньше размер теплоотдающей поверхности (площади контакта образца с оболочкой) при той же самой площади поперечного сечения образца, через которую уходит тепло в его выступающую часть.

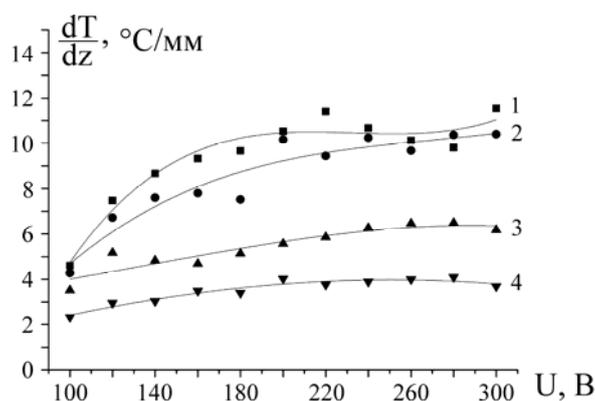


Рис. 5. Зависимость среднего градиента температуры от напряжения при распределенном радиальном обтекании образцов (диаметр – 14 мм, длина – 60 мм). Глубина погружения, мм: 1 – 20; 2 – 30; 3 – 40; 4 – 50

Эта закономерность имеет практическое значение. В ряде случаев, например при необходимости локальной обработки детали, в электролит погружается ее относительно небольшая часть. Здесь неизбежен достаточно высокий градиент температуры на обрабатываемом участке, который при необходимости может быть снижен теплоизоляцией поверхности детали, выступающей над электролитом, или ее дополнительным нагревом какими-либо средствами.

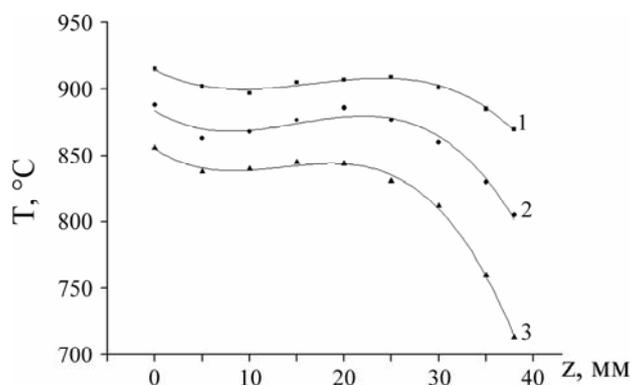


Рис. 6. Температурные поля образцов, нагреваемых при напряжении 200 В. Распределенное продольное обтекание. Расход электролита, л/мин: 1 – 6,1; 2 – 3,9; 3 – 2,5. Диаметр образца – 10 мм, длина – 50 мм, глубина погружения – 40 мм

Таблица 4. Характеристики распределения температуры по оси цилиндрического образца диаметром 10 и длиной 40 мм [22]. Напряжение – 200 В

	Сосредоточенное продольное обтекание	Распределенное продольное обтекание			
		10	13	16	19
Удаление продольных струй от оси камеры, мм	0	10	13	16	19
Средняя температура, °С	938	954	924	883	875
Среднее квадратичное отклонение от средней температуры, °С	41	20	6	14	41
Средний градиент, °С/мм	4,1	1,7	0,8	1,9	1,0
Средний квадратичный градиент, °С/мм	4,2	2,6	1,7	3,5	5,8

Теперь рассмотрим влияние распределенного продольного обтекания цилиндрического образца на его температурное поле при нагреве третьим способом. На рис. 6 представлены результаты измерений распределения температуры в образце с распределенным продольным обтеканием четырьмя струями, смещенными относительно оси камеры. Такая методика позволяет еще более снизить градиент температуры (табл. 4). Вероятно, для продольного обтекания характерно меньшее давление на парогазовую оболочку, но гораздо более эффективное удаление перегретого электролита из зоны нагрева. Оказалось, что именно этот вариант дает наименьшие значения градиента температуры.

В заключение приведем результаты измерения твердости образцов стали 50 диаметром 12 мм, которые закаливались в применяемом электролите (10% хлорида аммония) после нагрева в течение 1 мин при напряжении 260 В. Распределенное обтекание продольными струями позволило значительно снизить различие в твердости, которая изменялась от 67,5 HRC в нижней части образца до 63 HRC в верхней части. Изменение твердости по длине обрабатываемого участка снижено более чем вдвое по сравнению с примером, рассмотренным во введении, для совмещения сосредоточенных радиального и вертикального потоков.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что при сосредоточенном продольном обтекании нагреваемого цилиндрического образца вертикальный градиент его осевого распределения температуры уменьшается при увеличении диаметра образца или скорости течения электролита. Повышение температуры нагрева приводит к увеличению ее среднеквадратичного отклонения и вертикального градиента.

2. Показано влияние характера обтекания цилиндрической детали электролитом на распределение температуры по ее поверхности при анодном нагреве в водных растворах. Направление и скорости продольных и поперечных потоков электролита могут служить средством управления локальной температурой нагреваемой детали. Обнаруженные закономерности объясняются воздействием потоков электролита на толщину парогазовой оболочки, которая определяет локальную плотность тока и тепловые потоки в нагреваемую деталь.

3. Предложены методы выравнивания распределения температуры по поверхности нагрева цилиндрических деталей для повышения качества термической или химико-термической обработки в водных электролитах. Показана возможность снижения вертикального градиента температуры до 0,8 °С/мм с помощью распределенного продольного обтекания.

Работа выполнена по тематическим планам НИР при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ и Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ 09-08-99069-р_офи).

ЛИТЕРАТУРА

1. Sengupta S.K., Singh O.P. Contact Glow Discharge Electrolysis: a Study of its Onset and Location. *J. Electroanal. Chem.* 1991, **301**, 189–197.
2. Nie X., Wang L., Yao Z.C., Zhang L., Cheng F. Sliding Wear Behaviour of Electrolytic Plasma Nitrided Cast Iron and Steel. *Surface and Coatings Technology.* 2005, **200**(5-6), 1745–1750.
3. Roy A. Aqueous Electrolyte Plasma Nitriding of Austenitic Stainless Steel, MT Thesis, Indian Institute of Technology, Kanpur, DC, 2006.
4. Mizuno T., Ohmori T., Akimoto T., Takahashi A. Production of Heat During Plasma Electrolysis in Liquid. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2000, **39**, P. 6055–6061.
5. Aliofkhaezrai M., Rouhaghdam A. Sabour. Fabrication of TiC/WC Ultra Hard Nanocomposite Layers by Plasma Electrolysis and Study of its Characteristics. *Surface and Coating Technology.* 2010, **205**, S51–S56.
6. Дьяков И.Г., Шадрин С.Ю., Белкин П.Н. Особенности анодного нагрева при движении электролита в режиме свободной конвекции. *Электронная обработка материалов.* 2004, (4), 9–13.
7. Tarakci M., Korkmaz K., Gencer Y., Usta M. Plasma Electrolytic Surface Carburized and Hardening of Pure Iron. *Surface and Coating Technology.* 2005, **199**(2–3), 205–212.
8. 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. Том I. М.: Техносфера, 2011. 464 с.
9. Liang J., Wang K.Y., Guo S.M., Wahab M.A. Influence of Electrolytic Plasma Process on Corrosion Property of Peened 304 Austenitic Stainless Steel. *Material Letters.* 2011, **65**, 510–513.
10. Shen D.J., Wang Y.L., Nash P., Xing G.Z. A Novel Method of Surface Modification for Steel by Plasma Electrolysis Carbonitriding. *Material Science and Engineering A.* 2007, **458**, 240–243.
11. Meletis E.I., Nie X., Wang F.L., Jiang J.C. Electrolytic Plasma Processing for Cleaning and Metal-coating of Steel Surface. *Surface and Coatings Technology.* 2002, **150**, 246–256.
12. Kellogg H.H. Anode Effect in the Aqueous Electrolyses. *J. Electrochem. Soc.* 1950, **97**(4), 133–142.
13. Weissgerber H., Bohme H., Bohme M. Electrolytische Wärmebehandlung von Stahl. *Technick.* 1969, (6), 413–417.
14. Белкин П.Н., Пасинковский Е.А., Факторович А.А. О распределении температуры в стальном аноде при его нагреве электролитной плазмой. *Известия АН МССР, сер. физ.-техн. и мат. наук.* 1977 (1), 82–84.

15. Дураджи В.Н., Брянцев И.В., Пасинковский Е.А. Цементация и нитроцементация стали при нагреве в электролитной плазме. *Электронная обработка материалов*. 1977, (2), 15–18.
16. Дураджи В.Н., Брянцев И.В. Распределение температуры при нагреве металлов электролитной плазмой. *Электронная обработка материалов*. 1978, (2), 53–56.
17. Ясногородский И.З. Проводимость электролитных ванн. *Автомобильная и тракторная промышленность*. 1954, (4), 19–24.
18. Белихов А.Б., Белкин П.Н. Особенности анодной цементации. *Электронная обработка материалов*. 1998, (5–6), 23–31.
19. Дураджи В.Н., Полотебнова Н.А., Товарков А.К. О регулировании распределения температуры образца при нагреве в электролитной плазме. *Электронная обработка материалов*. 1981, (4), 40–42.
20. Дьяков И.Г., Азарян Н.С., Мухачёва Т.Л. Влияние радиального обтекания анода электролитом на характеристики его нагрева. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2004, (7.4), 151–153.
21. Белкин П.Н., Ганчар В.И. Температурное поле анода в условиях обтекания радиальными потоками электролита. *Электронная обработка материалов*. 1985, (1), 24–26.
22. Комаров А.О., Мухачева Т.Л. Управление вертикальным градиентом температуры анодного нагрева с помощью продольного обтекания деталей электролитом. *Материалы II Международной научно-технической конференции «Современные методы в теоретической и экспериментальной электрохимии»*. Иваново, 2010, 161.
23. Комаров А.О., Белкин П.Н. Управление вертикальным градиентом температуры анодного нагрева упрочняемой детали с помощью продольного обтекания. *Труды 8-й Всероссийской с международным участием научно-технической конференции «Быстрозакаленные материалы и покрытия»*. М., 2009, 179–183.

Поступила 20.07.11

Summary

Temperature distributions along the central axis of the cylindrical samples are heating in different hydrodynamic conditions are measured. It is shown that concentrated axial flow around sample leads to vertical gradient of the heating temperature, which depends on the temperature value, sample size and electrolyte flow rate. It is proposed the method of the temperature gradient decreasing up to 0.8–3°C/mm by the distributed axial and radial flow around sample.
