

Влияние состава электролита на теплообмен при анодной электролитно-плазменной обработке технического титана

А. В. Жиров, С. Ю. Шадрин, * П. Н. Белкин

*Костромской государственной университет,
ул. Дзержинского, 17, г. Кострома, 156005, Россия, *e-mail: belkinp@yandex.ru*

Рассмотрен теплообмен в трехфазной системе раствор электролита – парогазовая оболочка – титановый образец. Измерены температура образца, сила тока, тепловые потоки из оболочки в электролит и образец при использовании водных растворов хлорида аммония с добавками аммиака или глицерина. Установлено, что наличие аммиака или глицерина приводит к снижению силы тока, температуры нагрева, общего выделения энергии и потоков тепла в раствор и образец. Показано, что доли тепла, поступающего в электролит и образец, не зависят от концентраций аммиака и глицерина. Влияние аммиака и глицерина на теплообмен объясняется увеличением толщины парогазовой оболочки за счет дополнительного испарения указанных компонентов.

Ключевые слова: электролитно-плазменная обработка, тепловые потоки, парогазовая оболочка.

DOI: 10.5281/zenodo.1051274

УДК 621.785.53

ВВЕДЕНИЕ

Электролитно-плазменная обработка (ЭПО) осуществляется в трехфазной системе раствор электролита – парогазовая оболочка (ПГО) – металлическая деталь, в которой центральным элементом является оболочка, представляющая собой нагревающую и насыщающую среду. Именно в ПГО выделяется энергия источника питания, поступающая далее в обрабатываемое изделие, электролит и затем за счет испарения последнего в окружающую среду. Важнейшими параметрами ЭПО являются температура детали и скорость ее разогрева, которые определяются многими факторами. К ним относятся напряжение, размеры детали, состав электролита, его температура и гидродинамические условия в рабочей камере. В большинстве случаев эти факторы (режимы обработки) найдены эмпирически для достижения каких-либо свойств, например поверхностной твердости, износостойкости или коррозионной стойкости. Первостепенным фактором является напряжение, определяющее основные параметры теплообмена и состояние ПГО. Для катодного варианта ЭПО величина напряжения существенно влияет на типы электрических разрядов [1]. В этом случае есть опасность возникновения дугового разряда, поэтому во избежание оплавления детали рекомендуется двухступенчатый нагрев [2]. При анодной ЭПО такой опасности нет, так как имеется интервал напряжений, в котором температура детали регулируется от 400 до 1000°C [3].

В любом варианте теплообмен при ЭПО обеспечивает высокие скорости нагрева и

сокращение продолжительности технологического цикла. Одноступенчатый нагрев позволяет разогревать детали со скоростью до 150 град/с [4]. Близкие результаты получены при анодной ЭПО среднеуглеродистой стали [5], несколько меньшие скорости при нагреве пористого железуглеродистого графита [6]. Регулирование скорости нагрева может эффективно осуществляться применением импульсных источников питания. Показана возможность снижения продолжительности нагрева до 4–10 с и расхода энергии применением импульсного тока с периодом 1 с и коэффициентом заполнения 90% для проведения поверхностной закалки среднеуглеродистой стали на глубину до 2 мм [7]. Также определены режимы импульсного нагрева низколегированной стали 42CrMo4 [8] и чугуна [9]. Варьирование длительности паузы при прохождении тока позволяет управлять вводом энергии в ПГО и плотностью теплового потока в деталь.

Возможности управления теплообменом при ЭПО использованы при закалке сталей с использованием термоциклирования [10]. Установлено, что при подаче напряжения 320 В стальная поверхность образца начинает нагреваться вплоть до плавления. При напряжении 200 В обрабатываемая поверхность не нагревается в течение многих секунд. Периодическое переключение напряжения с первого на второе позволяет увеличивать и уменьшать скорость нагрева. При такой методике можно получать закаленные слои толщиной до 10 мм. Важно отметить, что при термоциклировании повышается доля энергии, поступающей из ПГО в

деталь, и уменьшается поток тепла в электролит, что характерно для нестационарных условий нагрева.

Теплообмен при закалке детали в том же электролите зависит от времени существования ПГО после отключения напряжения. При надлежащих гидродинамических условиях в электролизере ПГО конденсируется через доли секунды, поэтому скорость охлаждения электролитом достаточна для закалки стальных деталей. Однако имеются редкие случаи, при которых охлаждение осуществляется в течение нескольких секунд или десятков секунд, что исключает мартенситное превращение [11].

Влияние условий ЭПО на температуру детали принято описывать вольт-амперными (ВАХ) и вольт-температурными (ВТХ) характеристиками, которые позволяют выбирать требуемые режимы и дают информацию о механизме процесса. В частности, установлено, что падающий характер ВАХ при анодном нагреве объясняется ростом толщины ПГО при увеличении напряжения или температуры электролита [12]. Теоретическое описание теплообмена при анодной ЭПО соответствует этим выводам, а также позволяет рассчитать удельную электропроводность ПГО [13] и выявить роль теплопроводности материала нагреваемого образца на примере технического титана [14].

Указанные закономерности обнаружены для простых однокомпонентных растворов карбоната натрия или хлорида аммония. Между тем очевидно, что состав электролита существенно влияет практически на все аспекты теплообмена в рассматриваемой системе. Для снижения напряжения начала катодного нагрева рекомендуется добавлять в электролит ацетон [15]. Для анодной цементации в растворе соляной кислоты и ацетона предлагаются разнообразные органические компоненты (оксид этилена, оксанол и др.), снижающие энергоёмкость процесса [16, 17]. Рекомендации основаны на экспериментальных данных без выявления механизма влияния состава электролита на затраты энергии.

Имеется гипотеза о механизме влияния изоамилового спирта, добавляемого в раствор хлорида аммония с глицерином, на характеристики нагрева стального образца [18]. Снижение удельной электропроводности ПГО при повышении концентрации спирта или глицерина объясняется уменьшением эмиссии анионов электролита в ПГО. Кроме того, предполагается, что повышение вязкости раствора при наличии глицерина приводит к росту толщины пограничного слоя и снижению плотности теплового потока из ПГО в электролит.

Большинство электролитов для диффузионного электролитно-плазменного насыщения являются многокомпонентными, поэтому влияние их состава на закономерности теплообмена существенно не только для оптимизации режимов обработки, но и позволяет получить новые сведения о механизме явления. Цель данной работы – изучение теплофизических характеристик анодной обработки в двухкомпонентных электролитах для азотирования или цементации. Исследуются тепловые потоки из ПГО в электролит и титановый образец, температура последнего и затраты энергии при различных концентрациях аммиака или глицерина.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Нагреванию подвергались цилиндрические образцы с полусферическим торцом диаметром 20 мм и длиной 85 мм из технического титана ВТ 1-0. Перед обработкой образцы зачищались наждачной бумагой до поверхностной шероховатости $R_a \sim 1,0$ мкм и очищались ацетоном в ультразвуковой ванне. Измерения проводились в водном растворе хлорида аммония (10–15%) с добавлением аммиака или глицерина, здесь и далее указаны массовые проценты. Обработка выполнялась в цилиндрическом электролизере с внутренним диаметром 110 мм и высотой 235 мм [14]. Электролизер с насосом размещался в рабочей камере, представляющей собой пластмассовый сосуд диаметром 250 мм и высотой 250 мм. Там же располагался теплообменник, выполненный из четырехметровой гофрированной нержавеющей трубы диаметром 16 мм. Охлаждение электролита в рабочей камере осуществлялось протекающей в змеевике водопроводной водой, скорость которой регулировалась и фиксировалась с помощью ротаметра РМФ–0,4 ЖУЗ (точность $\pm 2,5\%$). Температура воды до и после теплообменника измерялась цифровым термометром MS–6501 с термопарой (точность 2%). Температура раствора контролировалась термопарой, помещенной на дне камеры и поддерживалась равной $24 \pm 1^\circ\text{C}$.

Электролизер подключался к отрицательному полюсу источника питания мощностью 15 кВт, обеспечивающему постоянное напряжение до 300 В при максимальном токе 40 А. Напряжение измерялось вольтметром ЛМ–1 (точность 0,5%). Ток в цепи определялся измерением напряжения на малоиндуктивном резисторе сопротивлением 0,22 Ом ($L = 20$ мкГн). Напряжение регистрировалось цифровым осциллографом АК ИП 4109/2 в режиме самописца и мультиметром MS 8221 С (точность $\pm 2\%$).

Нагревание образцов осуществлялось следующим образом. Сначала включался насос, затем после наступления стабильной циркуляции электролита на образцы, расположенные над поверхностью электролита, подавалось положительное напряжение в интервале 180–200 В для образования ПГО вокруг образца. Далее образцы плавно погружались в электролит на заданную глубину 15 мм. После окончания погружения устанавливалась заданная величина напряжения.

Плотность теплового потока из ПГО в образец определялась по результатам измерений температуры в различных точках образца с полусферическим торцом согласно методике [19]. На оси образца имелось глухое отверстие диаметром 4,5 мм, в котором размещались пять термопар с шагом 10 мм для измерения распределения температуры. Самая первая термопара находилась на расстоянии 10 мм от нижней точки образца. Температура образцов измерялась цифровым мультиметром АРРА 109N (средняя точность $\pm 0,5\%$).

Плотность теплового потока из ПГО в электролит определялась измерением разности температур охлаждающей воды на входе и выходе из теплообменника и скорости ее течения. При фиксированном напряжении нагрев образца производился в течение 30–40 минут, при этом каждые 10 минут измерялись напряжение и сила тока в системе, а также температура образца и воды на входе и на выходе из рабочей камеры.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Мощность, выделяемая в ПГО

Все ВАХ, полученные при нагреве титановых образцов, падающие, что отражает общую закономерность снижения тока при повышении напряжения из-за утолщения ПГО. При прочих равных условиях ток через ПГО уменьшается пропорционально концентрации аммиака или глицерина в электролите. В аммиачном растворе этот эффект гораздо сильнее, при 240 В ток снижается от $9,7 \pm 0,2$ А в растворе чистого хлорида аммония до $4,3 \pm 0,1$ А в растворе с 10% аммиака. В меньшей степени влияет глицерин, при 240 В ток убывает от $7,9 \pm 0,2$ А в однокомпонентном растворе хлорида аммония до $7,2 \pm 0,2$ А при содержании глицерина 15%. Возможные причины снижения тока при изменении состава электролита будут обсуждаться ниже.

На рис. 1 и 2 показано влияние напряжения на величину мощности, выделяемой в ПГО. Возрастающие зависимости подтверждают, что ток при

расширении оболочки убывает менее интенсивно, чем по линейному закону, как это следует из теоретического описания теплообмена [13]. Отмеченное выше убывание тока при наличии в растворе аммиака или глицерина приводит к уменьшению выделяемой в оболочке мощности. Отметим, что эта мощность падает более чем вдвое при наличии аммиака и примерно на 11% в растворе с глицерином в изученных пределах.

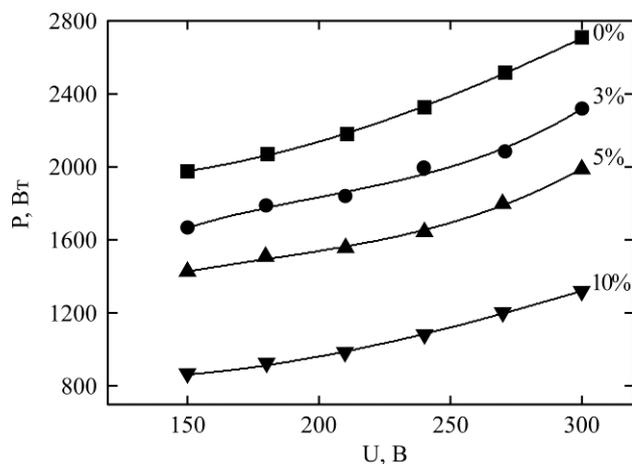


Рис. 1. Влияние напряжения на мощность, выделяемую в оболочке, образующейся при нагреве титана в 15% водном растворе хлорида аммония и аммиака. Цифры у кривых показывают содержание аммиака в процентах.

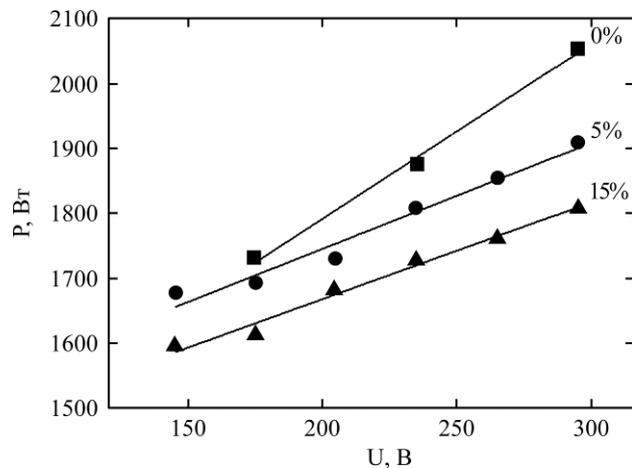


Рис. 2. Влияние напряжения на мощность, выделяемую в оболочке, образующейся при нагреве титана в 10% водном растворе хлорида аммония и глицерина. Цифры у кривых показывают содержание глицерина в процентах.

Ожидаемым следствием уменьшения мощности в ПГО является снижение температуры титанового образца. ВТХ нагрева титана в аммиачном электролите имеют характерный максимум при напряжениях 240–250 В, возможно, отражающий изменение механизма проводимости в анодной ПГО [3]. Существенно, что максимальные температуры в аммиачных электролитах составляют 700–780°C, что достаточно для азотирования технического титана. В глицериновом электролите достигаются температуры не менее 850°C даже при содержании

глицерина 15%, что позволяет проводить цементацию.

Теплообмен между ПГО и электролитом

На рис. 3 и 4 представлены зависимости теплового потока из оболочки в электролит от напряжения нагрева. Возрастающий характер зависимости соответствует ранее полученным данным при нагреве стальных образцов в различных электролитах и объясняется ростом энергии в ПГО при повышении напряжения. Изменение концентраций аммиака или глицерина существенно влияет на тепловой поток в электролит, но доля этого тепла от общего выделения энергии не зависит от состава электролита и составляет $(83 \pm 4)\%$ для аммиачного раствора и $(88,0 \pm 0,4)\%$ для электролита с глицерином. Отметим, что воспроизводимость результатов измерений отличается на порядок. Возможно, что повышенная летучесть аммиака увеличивает погрешность измерений, отрицательно влияя на выработку электролита в процессе измерений.

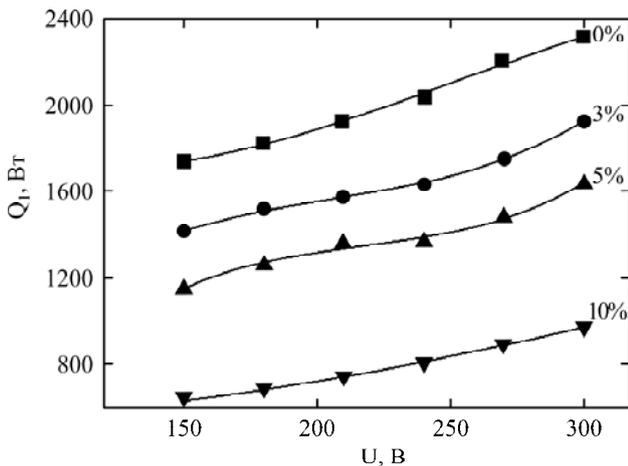


Рис. 3. Влияние напряжения на поток тепла из оболочки в электролит при нагреве титана в 15% водном растворе хлорида аммония и аммиака. Цифры у кривых показывают содержание аммиака в процентах.

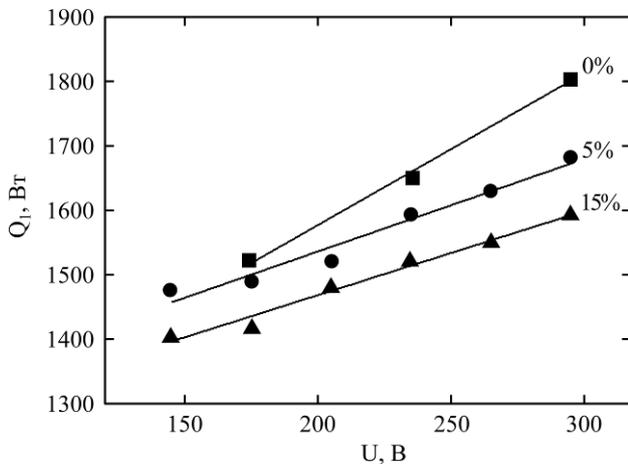


Рис. 4. Влияние напряжения на поток тепла из оболочки в электролит при нагреве титана в 10% водном растворе хлорида аммония и глицерина. Цифры у кривых показывают содержание глицерина в процентах.

Полученные результаты позволяют отвергнуть гипотезу о влиянии концентрации глицерина на механизм теплообмена между ПГО и электролитом. Предполагаемое изменение эмиссионной способности раствора или толщины пограничного слоя при различной вязкости состава не оказались значимыми, поскольку доля тепла, поступающего из ПГО в электролит, не зависит от его состава в изученных пределах.

Теплообмен между ПГО и титановым образцом

Потоки тепла из ПГО в образец также увеличиваются по мере роста напряжения (рис. 5 и 6), что связано с увеличением температуры образца. Отметим, что энергия, переходящая из оболочки в образец, поступающая в его часть, расположенную над электролитом, откуда рассеивается в окружающую среду. В свою очередь, этот отвод тепла пропорционален средней температуре части образца, выступающей из электролита (рис. 7).

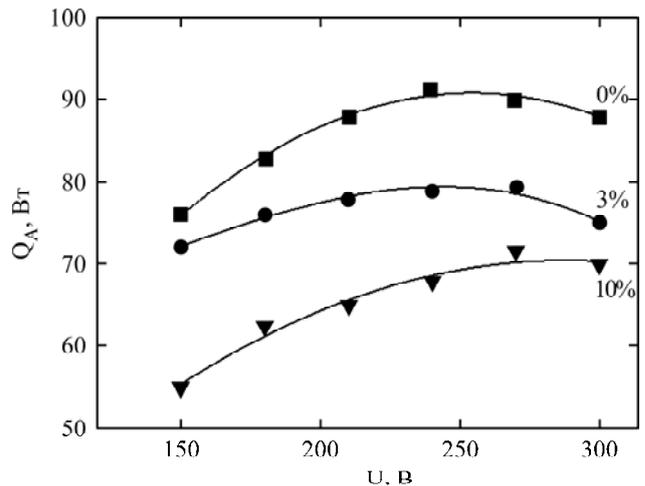


Рис. 5. Влияние напряжения на поток тепла из оболочки в титановый образец при нагреве титана в 15% водном растворе хлорида аммония и аммиака. Цифры у кривых показывают содержание аммиака в процентах.

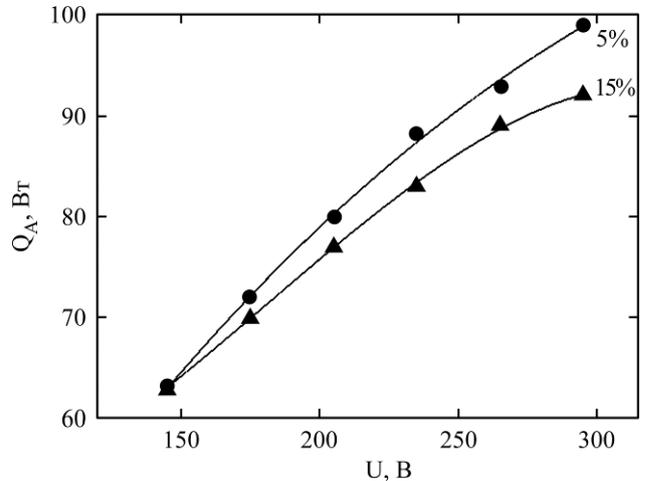


Рис. 6. Влияние напряжения на поток тепла из оболочки в титановый образец при нагреве титана в 10% водном растворе хлорида аммония и глицерина. Цифры у кривых показывают содержание глицерина в процентах.

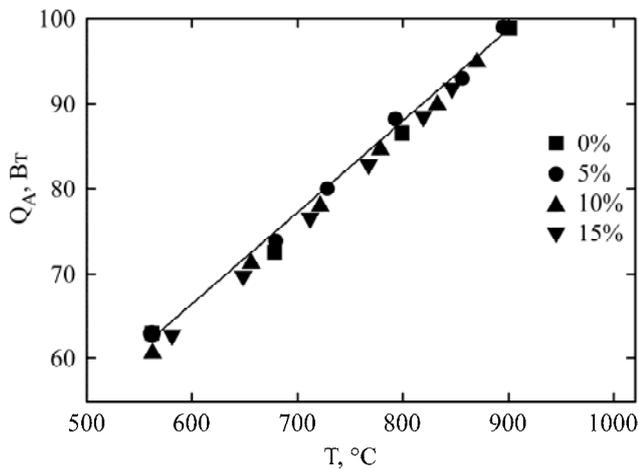


Рис. 7. Тепловой поток из оболочки в титановый образец при различных температурах нагрева в 10% водном растворе хлорида аммония с различными концентрациями глицерина.

Тепловой поток в образец при увеличении концентрации аммиака в растворе снижается от 87,5 Вт до 68 Вт при 240 В, что также связано с уменьшением общего ввода энергии. Доля теплового потока в образец от общего выделения энергии составляет 3,7%; 3,85%; 4,4% и 6,3% для концентраций аммиака 0%; 3%; 5% и 10% соответственно. Анализ результатов показывает, что при достигнутой точности измерений зависимость доли энергии от содержания аммиака надежно не выявлена. Средняя доля тепла, поступающая из оболочки в титановый образец при нагреве в аммиачном электролите, составляет $(4,6 \pm 0,9)\%$. Аналогичный результат $(4,3 \pm 0,2)\%$ получен для глицериновых растворов.

Возможными причинами повышения электрического сопротивления анодной ПГО при наличии в растворе насыщающих компонентов, в частности аммиака или глицерина, могут быть увеличение толщины оболочки либо снижение ее удельной электропроводности. Известно, что парогазовая оболочка при использовании глицеринового электролита содержит формальдегид, ацетальдегид, ацетон, метанол и этанол [20], которые представляют собой более крупные молекулы, нежели аммиак. При упругом столкновении анионов с молекулами среды меньшее рассеивание энергии носителей зарядов должно наблюдаться в глицериновой оболочке с более массивными молекулами.

Для качественной оценки справедливости высказанной гипотезы вычислим на основе простейших допущений подвижность анионов, обеспечивающих прохождение электрического тока через ПГО. Состав оболочки определяется процессами кипения электролита, а также химическими и электрохимическими реакциями в объеме ПГО и на поверхности образца-

электрода. Будем считать, что при столкновениях анионов с нейтральными молекулами преобладают поляризационные силы, поэтому транспортное сечение соответствует поляризационному сечению и эффективная частота столкновений не зависит от относительной скорости движения иона и молекул. Тогда подвижность носителя заряда не зависит от напряженности электрического поля и равна [21]:

$$\mu_i = \frac{36\sqrt{1+M/M_i}}{\sqrt{(\alpha/a_0^3)Ap}},$$

где M – масса нейтральной молекулы парогазовой среды; M_i – масса аниона; α – поляризуемость молекулы среды, $a_0 = 0,529 \cdot 10^{-8}$ см – борковский радиус; A – молекулярная масса газа; p – приведенное давление. В таблице приводятся численные значения для расчета подвижности ионов в среде, содержащей пары воды, аммиак и ацетальдегид.

Поляризуемости молекул в основном состоянии

Молекула	$\alpha/(a_0)^3$	M , г/моль
H ₂ O (данные [21])	9,8	18,015
NH ₃ (данные [21])	15,4	17,03
CH ₃ CHO (данные [22])	43,2	44,0526

В используемом электролите электропроводящим компонентом является хлорид аммония, а ионом, преимущественно обеспечивающим электрический ток через парогазовую оболочку, – ион хлора Cl⁻, если пренебречь вкладом OH⁻. В однокомпонентном растворе хлорида аммония без насыщающих компонентов нейтральными молекулами в парогазовой оболочке будут молекулы воды, в этом случае подвижность иона хлора $\mu(\text{Cl}^-)$ составляет $7,3 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ при средней температуре в ПГО 600 К. В электролите для азотирования, содержащем аммиак, в составе ПГО будут не только молекулы воды, но и самого аммиака. Достоверных данных по концентрации аммиака в ПГО нами не обнаружено, поэтому для оценки подвижности ионов хлора в среде для азотирования рассмотрим гипотетический предельный случай чисто аммиачной среды. Численные оценки дают величину $5,9 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ при той же самой средней температуре ПГО. Полученные значения отличаются не слишком сильно, тем более что в реальных условиях подвижность ионов хлора будет иметь какое-то среднее значение между двумя оценочными величинами. Следовательно, такое изменение удельной электропроводности ПГО не может объяснить

наблюдаемого снижения тока и выделения энергии в ПГО.

При добавлении в состав электролита глицерина, как отмечалось выше, в ПГО присутствует сложная смесь молекул формальдегида, ацетальдегида, ацетона и т.д. Эти молекулы тормозят движение ионов хлора в большей степени, например, подвижность рассматриваемых ионов в среде из молекул только ацетальдегида $\mu(\text{Cl}^-)$ составляет $2,7 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Но здесь следует учесть довольно высокую долговечность глицериновых электролитов, что в значительной степени объясняет их распространение среди растворов для электролитно-плазменной цементации. Выработка глицеринового электролита, в частности, скорость уменьшения концентрации глицерина не превышает $0,5\%/ч$ при его начальной концентрации 10% [23]. Следовательно, на протяжении выполняемых в данной статье измерений содержание глицерина в электролите может снизиться не более чем до $9,5\%$. Это означает, что молекулы глицерина расходуются примерно в той же мере, что и молекулы воды, испаряющиеся в процессе эксплуатации электролита. В таком случае можно считать, что содержание продуктов разложения глицерина в ПГО значимо не превысит его содержание в растворе, то есть составит примерно 10% . Тогда учет наличия углеродсодержащих соединений в ПГО даст оценку эффективной подвижности ионов хлора величиной $6,8 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, что также мало отличается от подвижности в парах воды.

Поэтому основной причиной снижения тока при анодном нагреве в растворах с аммиаком и глицерином следует считать утолщение ПГО вследствие дополнительного испарения компонентов электролита. Большее влияние аммиака на электрическое сопротивление ПГО по сравнению с глицерином связано с его повышенной летучестью, что приводит к утолщению оболочки в большей степени.

ВЫВОДЫ

1. Компоненты электролита, обеспечивающие насыщение титановых сплавов азотом и углеродом, способствуют увеличению электрического сопротивления парогазовой оболочки, прежде всего, за счет роста ее толщины. Повышение напряжения обработки приводит к росту температуры парогазовой среды и погруженного в нее образца, что влечет за собой увеличение количества пара, то есть толщины оболочки. Этот эффект усиливается при наличии в растворе летучих компонентов. Поэтому снижение силы тока в системе пропорционально концентрации аммиака в электролите. То же самое, но в меньшей степени наблюдается при наличии в

растворе глицерина, продукты разложения которого также поступают в парогазовую оболочку.

2. Добавление аммиака или глицерина к водному раствору хлорида аммония не только снижают силу тока, но и уменьшают вводимую в оболочку мощность и вследствие этого температуру оболочки и обрабатываемой детали.

3. Потоки тепла из оболочки в электролит и образец также снижаются, но их относительный вес от концентрации насыщающих компонентов электролита не зависит. Доля тепла, поступающего в электролит, в аммиачном электролите составляет $(83\pm 4)\%$, а в глицериновом $(88,0 \pm 0,4)\%$. Близкие значения этих величин не подтверждают гипотезу влияния вязкости электролита на теплообмен между оболочкой и электролитом. Отметим, что разброс результатов измерений в аммиачном электролите на порядок выше, чем при использовании глицерина, что, вероятно, связано с высокой скоростью испарения аммиака. Это предположение подтверждается гораздо меньшей выработкой глицеринового электролита по сравнению с аммиачным раствором, как было установлено ранее [23].

4. Доля тепла, поступающего из оболочки в титановый образец, имеет некоторую тенденцию к росту при повышении концентрации аммиака, но эта закономерность не установлена надежно при достигнутой точности измерений. В среднем эта доля составляет $(4,6 \pm 0,9)\%$, что соответствует обычно наблюдаемым значениям. Аналогичный результат $(4,3 \pm 0,2)\%$ получен для глицеринового электролита.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 15-19-20027) Костромского государственного университета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yerokhin A.L., Nie X., Leyland A., Matthews A. and et al. *Surf Coat Technol.* 1999, **122**, 73–93.
2. Yasnogorodckii I. Z. *Automobile and Tractor Industry.* 1954, **6**, 21–24.
3. Belkin P.N., Yerokhin A.L., Kusmanov S.A. *Surf Coat Technol.* 2016, **307**, 1194–1218.
4. Ясногородский И.З. *Электрохимическая и электромеханическая обработка металлов.* Л.: Машиностроение, 1971. С. 117–168.
5. Дураджи В.Н. *ЭОМ.* 1975, (5), 44–47.
6. Белихов А.Б., Белкин П.Н. *ЭОМ.* 1998, (5–6), 23–31.
7. Luk S.F., Leung T.P., Miu W.S. and Pashby Ian. *J Mater Process Technol.* 1999, **91**, 245–249.
8. Altagoury Z., Abdu M.T., Adly M.A., Elhabak A. *IJAETCS.* 2014, **1**(1), 20–27.
9. Ayday A., Durman M. *Acta Physica Polonica.* 2013, **123**(2), 291–293.

10. Tyurin Yu.N., Pogrebnyak A.D. *Surf Coat Technol.* 2001, **142–144**, 293–299.
11. Wu J., Liu R., Xue W., Wang B. et al. *Appl Surf Sci.* 2014, **316**, 102–107.
12. Ганчар В.И., Дмитриев Э.Г. *ЭОМ.* 1989, (2), 23–25.
13. Shadrin S.Yu., Belkin P.N. *Int J Heat Mass Transfer.* 2012, **55**, 179–186.
14. Shadrin S.Yu., Zhirov A.V., Belkin P.N. *Int J Heat Mass Transfer.* 2017, **107**, 1104–1109.
15. Сарафанов И.С., Анагорский Л.А., Рабкин М.А. *Новое в электрофизической и электрохимической обработке материалов.* Л.: Машиностроение, 1972. С. 106–110.
16. Rössner E., Marx G., Wicht H., Suchotin A. et al. DDR Patent 0152 144. *Verfahren zum Aufkohlen von Stahl im anodischen Elektrolyteplasma.* 1981.
17. Реснер Э., Маркс Г., Зайцев В.А., Сухотин А.М. *ЭОМ.* 1983, (3), 59–61.
18. Комаров А.О., Belkin P.N. *Powder Metallurgy and Functional Coatings.* 2008, **2**, 46–49.
19. Жиров А.В., Смирнова Т.С., Шадрин С.Ю. *Вестник КГУ имени Н.А. Некрасова.* 2012, (5), 22–25.
20. Kusmanov S.A., Shadrin S.Yu., Belkin P.N. *Surf Coat Technol.* 2014, **258**, 727–733.
21. Райзер Ю.П. *Физика газового разряда.* М.: Наука, 1987. 97 с.
22. Путинцев Н.М., Степанова Н.В., Путинцев Д.Н., Зиновьева А.Б. *Журнал физической химии.* 2010, **84**(4), 794–796.
23. Кусманов С.А., Дьяков И.Г., Белкин П.Н. *Вопросы материаловедения.* 2009, (4), 7–14.

Поступила 16.02.17

После доработки 24.07.17

Summary

The study considers heat exchange in a three-phase system: an electrolyte solution – a vapor-gas envelope (VGE) – a titanium workpiece. The temperature of a workpiece, current intensity, heat fluxes from the envelope to the electrolyte and to the workpiece were measured in an aqueous solution of ammonium chloride with addition of ammonia and glycerol. Addition of ammonia and glycerol proved to decrease the current intensity, heating temperature, total energy liberation and heat fluxes to the solution and to the sample. Furthermore, it was found that heat levels passing to the electrolyte and to the workpiece are not affected by ammonia and glycerol concentrations. The addition of ammonia and glycerol affects heat exchange, increasing the VGE thickness due to intense evaporation of these elements.

Keywords: plasma electrolytic treatment, heat fluxes, vapour gaseous envelope.