

УДК 621.762

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ И УСЛОВИЙ ПРОЦЕССА ДИФФУЗИОННОЙ СВАРКИ НА ПРОЧНОСТЬ СОЕДИНЕНИЯ «ТВЕРДЫЙ СПЛАВ-СТАЛЬ»

Саид Г.М., Мамедов А.Т., Мусса И.С. (АзТУ, г.Баку, Азербайджан)

E-mail: ariff-1947@mail.ru

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследований диффузионной сварки рабочих элементов штампов, изготавливаемых из пары «твердый сплав-сталь». Установлено, что для получения прочного соединения необходимо выбрать компенсационную прокладку типа «пермаллой». Исследованы режимы диффузионной сварки, температура и продолжительность процесса. Выбраны их оптимальные значения.

**Ключевые слова:** диффузионная сварка, твердый сплав, сталь, соединение, пермаллой.

**Актуальность.** Необходимость соединения твердых сплавов и твердых сплавов с металлами возникает в инструментальной промышленности при изготовлении и ремонте штампов и режущих инструментов, армированных твердом сплавом [1,2].

При механическом креплении твердосплавных элементов увеличивается расход дефицитных твердых сплавов и трудоемкость изготовления штампов и инструмента. Применение пайки высокотемпературными припоями позволяет сократить расход твердых сплавов и трудоемкость изготовления инструмента, однако надежность соединения в этом случае (особенно с учетом ударного нагружения штампов) недостаточно из-за напряжений, возникающих в процессе пайки вследствие значительной разности в коэффициентах температурного расширения сплава и стали.

Наличие жидкой фазы (расплавленного припоя) приводит к проникновению припоя в зародышевые трещины и другие дефекты по границам зерен. Происходит охрупчивание зоны соединения, резко падает пластичность и динамическая прочность стыка. Наличие жидкой фазы зачастую приводит к появлению интерметаллидов в паяном соединении в результате взаимной диффузии компонентов припоя и основного металла в соответствии с диаграммами состояния. При увеличенных зазорах припой в шве находится в литом состоянии, и, следовательно, прочность соединения определяется прочностью припоя. При слишком малых зазорах может отсутствовать затекание припоя, в результате чего нарушается сплошность шва и снижаются механические свойства паяного соединения. Оптимальный зазор, как правило, выдержать практически не всегда удается.

В процессе пайки наблюдается окисление и обезуглероживание поверхностного слоя металла, перегрев и пережог металла, местный перегрев и возникновение трещин в твердых сплавах. После пайки необходима трудоемкая операция очистки инструмента от шлака.

Диффузионная сварка позволяет предотвратить или полностью устранить указанные выше недостатки, присущие пайке [3-7].

Возникающие в процессе диффузионной сварки термические напряжения можно устранить подбором оптимального термического цикла сварки и снизить до неопасного уровня путем применения нерасплавляемых промежуточных прослоек. При этом определяющее значение имеют способ нанесения, толщина и релаксационная податливость материала прослойки, его способность образовывать общие связи с соединяемыми материалами. работоспособность соединений во многом определяют и диффузионные процессы,

развивающиеся в ходе изотермической выдержки, структурные и фазовые превращения, протекающие в контакте [8,9].

Диффузионное соединение твердых сплавов между собой при температурах  $0,6-0,8T_{пл}$  практически невозможно из-за слабой диффузионной активности. Дальнейшие повышение температуры нагрева с целью активации диффузионных процессов приводит к пластической деформации нагреваемых твердых сплавов.

Для активации диффузионных процессов с целью получения сварных соединений с высокой прочностью применяют промежуточные технологические прокладки из различных материалов в компактном и порошкообразном состояниях. Такие промежуточные прокладки позволяют получить прочные соединения при более низкой температуре сварки, меньшем давлении и времени выдержки. Однако необходимо учитывать, что металл прокладок при прочих требованиях не должен образовывать с соединяющим материалом хрупких интерметаллических или химических соединений, а также стойких оксидов и других хрупких фаз.

В работе [5] для пары ВК8-40Х (в нашем случае ВК20-сталь45) рекомендуемые режимы с учетом прокладок не дали положительных результатов. При относительно низких температурах диффузионной сварки ( $1000-1050^{\circ}\text{C}$ ) были получены значения прочности соединения малыми и большими разбросами ( $100-200\text{МПа}$ ) при давлении сварки  $15-20\text{МПа}$ . При этом давлении повышение температуры приводило к значительной пластической деформации стальных оснований образцов. Для многих деталей штампов такая деформация не приемлемо, так как создает значительные трудности при их последующей размерной обработке.

Предварительные исследования, проведенные нами, показали, что оптимальная температура процесса не должна быть ниже  $1080^{\circ}\text{C}$ . в парах, исследуемых при менее низких температурах, диффузионный процесс не происходит полноценно. Кроме того, наблюдается падение значения прочности соединения твердого сплава со сталью при низких температурах.

Диффузионную сварку пары «твердый сплав ВК-20-сталь» проводили при температуре  $1100^{\circ}\text{C}$ . Результаты влияния температуры процесса и режимов усилия сжатия на прочность соединения представлены в таблице 1.

**Методика.** Для проведения экспериментальных исследований были спрессованы в стальной пресс-форме образцы размером  $10 \times 10 \times 55\text{мм}$  и биметаллические пуансоны размером  $10 \times 10 \times 10\text{мм}$ . Из твердого сплава ВК20. Образцы предварительно были спечены в водородной печи при температуре  $1100^{\circ}\text{C}$  в течение 1,5 часа. Затем проводилось окончательное спекание в печи ОКБ8086 в среде водорода при температуре  $1360^{\circ}\text{C}$  с изотермической выдержкой 1,0 час.

Диффузионную сварку твердого сплава стальному основанию проводили на установке УДС-3 при температуре  $1100^{\circ}\text{C}$ , давлении  $7\text{МПа}$ , времени выдержки 12 мин. И степени разрушения  $10^{-4}\text{мм.рт.ст.}$  прочность сварного соединения при растяжении изучали на разрывной машине модели Р10.

Из таблицы 1 видно, что при температуре нагрева  $1100^{\circ}\text{C}$  и времени выдержки 12 мин. оптимальное сжимающее давление имеет значение  $7-9\text{МПа}$ . Более низкое сжимающее давление не обеспечивает необходимый контакт (пластическую деформацию шероховатостей) по всему сечению свариваемых элементов. При более высо-

ких значениях сжимающего давления наблюдается значительная пластическая деформация и искажения формы стальной части соединяемой пары.

Таблица 1. Влияние давления сжатия при температуре процесса 1100°C и времени выдержки 12 мин на прочность диффузионного соединения

№ п/п	Давление сжатия, МПа	Прочность при отрыве, МПа	Характер разрушения	Прочность при срезе, МПа	Характер разрушения
1	3,5	160	ВК-20 в контакте пермаллоя	200	по ВК-20, частично по пермаллою
2	5,0	230	то же	280	то же
3	7,0	360	По ВК-20	400	По пермаллою
4	8,5	380	то же	370	то же
5	10,0	360	по ВК-20, частично по пермаллою	400	то же
6	12,0	375	то же	380	то же

Хорошее количественное соотношение результатов испытания на срез и отрыв представляет определенный интерес. Однако в обоих способах испытания характер разрушения различен. При испытании на срез разрушение идет по пермаллою и обладает достаточно стабильным значением порядка 350-400МПа, которое соответствует прочности при срезе нагартованного пермаллоя. Это очень высокий показатель, если учесть, что для пары ВК8-40Х по результатам работы [8-10] прочность при срезе не превышала 260МПа, а прочность при срезе паяной пары в лучшем случае имеет показатель 160МПа.

Таблица 2. Влияние условия соединения на получаемую прочность

№ п/п	Режим соединения	Условия соединения	Прочность при отрыве, МПа	Характер разрушения	Прочность при срезе, МПа	Характер разрушения
1	1100°C, 12мин., 7МПа	Медленный нагрев вместе с прокладкой, умеренное охлаждение	370	по ВК20	400	по пермаллою
2	то же	Нагрев вместо с прокладкой и охлаждение по специальному режиму	480	по пермаллою, частично по ВК-20	400	то же
3	то же	Быстрые нагрев и охлаждение вместе с прокладкой	180	по ВК20	300	по ВК20
4	то же	Умеренные нагрев и охлаждение без прокладки	140	то же	280	то же.

Разрушение при отрыве соединения, как правило, идет по твердому сплаву. Поэтому показатель прочности при отрыве менее стабилен. В исследуемых сериях он обладает показателем 320-430 МПа, то есть достигает до прочности пермаллоя при отрыве (близок к 500 МПа).

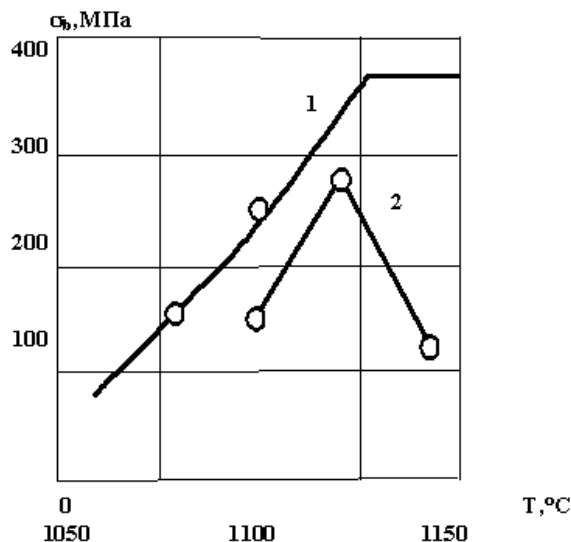


Рис. 1. Влияние температуры диффузионного процесса на прочность соединения: 1-соединение через прокладку; 2-без прокладки

Следовательно, все факторы, снижающие прочность твердого сплава приводит к снижению прочности всего соединения при отрыве. В таблице 2 приведены сведения испытаний, показывающие как изменяются прочность соединения при отрыве от условий сварки. Результаты показывают, что влияние условия соединения (технологические условия) на прочность при отрыве получаемого соединения о изу-тимое. При ухудшении условия, то есть в том случае, когда образование значительных внутренних напряжений и снижение прочности твердого сплава возможны, тогда происходит резкое снижение прочности соединения при отрыве. Прочность соединения при срезе от условия соединения так сильно не зависит.

На рис. 1 и 2 представлены результаты исследований влияния температуры и времени выдержки диффузионной сварки на прочность получаемого соединения при отрыве (каждая точка получена как среднее значение трех испытаний).

Характер полученных зависимостей подтверждают известные законы диффузии. С увеличением температуры и времени выдержки повышается прочность соединения. Од-

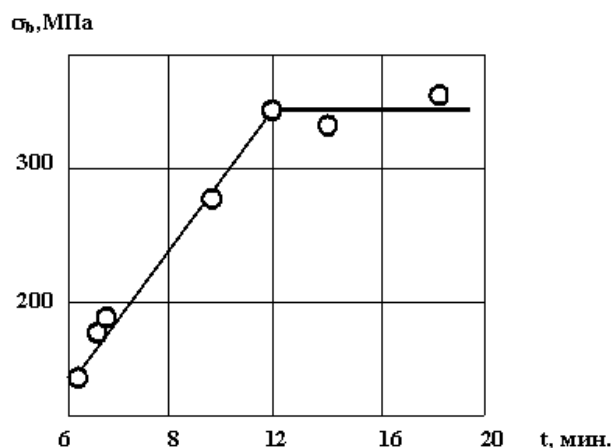


Рис. 2. Влияние продолжительности процесса на прочность соединения

нако повышение прочности наблюдается до определенного показателя и после этого показателя он практически остается постоянной. При росте показателя прочности разрушение соединения происходит по контакту «твердый сплав-пермаллой» (поверхность раздела). Это свидетельствует о том, что при образовании соединения определяющим процессом является диффузия, протекающая по этой поверхности раздела. Предположительно, что диффузия через границу раздела «пермаллой-сталь» протекает более интенсивно и поэтому там образование диффузионной связи протекает значительно быстрее.

Следовательно, выбор компенси-

рующей прокладки необходимо рассматривать только с точки зрения его высоких релаксационных свойств, однако надо учитывать также ее диффузионную способность, в первую очередь по отношению к твердому сплаву.

«При постоянной стадии прочности» в том случае, когда по всей контактной поверхности твердый сплав-пермаллой образована прочная диффузионная связь, разрушение при срезе идет по пермаллою, а при отрыве и при других жестких способах и условиях нагружения только по твердому сплаву.

Не достижение до максимума прочности на рис. 1 отмечанные при диффузионном соединении металлических сплавов большого количества свидетельствует о том, что при необходимом условии (при исследованных параметрах) не происходит значительные структурные превращения, снижающие прочность соединения.

Исключительным случаем является отсутствие компенсирующих пермаллоидных прокладок (кривая 2). При этом отсутствие релаксационной способности стали 45 препятствует образованию прочной связи между твердым сплавом и им, в результате чего возникают значительные внутренние напряжения и, как следствие, обуславливает падение прочности.

Проведенные исследования показывают, что при отрыве в обычных условиях нагружения, при изгибе и сжатии, то есть в том случае, когда нормальные напряжения преобладают над другими, прочность диффузионного соединения пары «ВК 20-сталь 45» определяется в значительной степени прочностью твердого сплава. Поэтому при разработке технологии соединения для штамповых деталей надо дать преимущество испытаниям на отрыв и изгиб.

### **Выводы.**

1. Исследованием возможностей, режимов и условий получения диффузионной сварки пары ВК20+сталь 45 установлено, что формирование прочной диффузионной связи между ВК20 компенсационной прокладкой и стали 45 определяется диффузионной способностью материала прокладки по отношению к твердому сплаву.

2. Разработанный оптимальный режим диффузионной сварки позволяет получить прочность соединения при срезе порядка 400 МПа для пары ВК20+сталь 45.

3. Установлено, что прочность диффузионного соединения в относительно жестких условиях, например при отрыве, изгибе и наличии внутренних напряжений определяется прочностью твердого сплава и зависит от условий соединения пары.

**Список литературы:** 1. Мамедов А.Т. Тагиев Э.А. Изготовление твердосплавных заготовок штампов для вырубки листов магнитопроводов.-Передовой опыт применения порошковой металлургии в машиностроении (рекомендации), АЗНТО, Баку, с.9-15, 1974 г. 2. Биметаллические соединения. М., «Металлургия», 1990, 280с. Авт.: К.Е.Чарухина, С.А.Голованенко, В.А.Мастеров, Н.Ф.Казаков. 3. Zhihong Zhonga<sup>a</sup>, Tatsuya Hinokib<sup>b,\*</sup>, Takashi Nozawac<sup>c</sup>, Yi-Hyun Parkb<sup>b</sup>, Akira Kohyama<sup>b,1</sup>. Microstructure and mechanical properties of diffusion bonded joints between tungsten and F82H steel using a titanium interlayer. 4. B.A. Kalin, V.T. Fedotov, O.N. Sevrjukov, A.N. Kalashnikova, A.N. Suchkova, A.Moeslang, M. Rohde, J. Nucl. Mater. 367–370 (2007) 1218–1222. 5. H. Greuner, H. Bolt, B. Böswirth, S. Lindig, W. Kühnlein, T. Huber, K. Sato, S.Suzuki, Fusion Eng. Des. 75–79 (2005) 333–338. 6. T. Hirose, K. Shiba, M. Ando, M. Enoda, M. Akiba, Fusion Eng. Des. 81 (2006) 645–651. 7. Z.H. Zhong, T. Hinoki, A. Kohyama, Mater. Sci. Eng. A (2009), doi:10.1016/j.msea.2009.04.043. 8.

Елютен В.П., Павлов Ю.А. Высокотемпературные материалы. М.: «Металлургия», 1972, 264с. **9.** Диффузионная сварка в вакууме металлов, сплавов и неметаллических материалов: Сб. Науч. тр. VII Всесоюз. науч.-теорет. конф./Под. ред. Н.Ф.Казакова. М.: Моск. Технол. инс-т мясной и молочной промышленности, 1983, 259с. **10.** Мяммядов А.Т. вя б. Штампларын истещсалында истифады олунан бярк хялитя пятащларынын щазырланмасынын технолоъи хцсусийятляри, Техн. ики тярягги уърунда, 1974. №5, с.28-31.

***EFFECT OF PROCESS CONDITIONS AND DIFFUSION BONDING ON THE STRENGTH OF CONNECTIONS "HARD ALLOY-STEEL"***

***Saied H.M., Mamedov A.T. and Mosa E.S. (AzTU, Baku, Azerbaijan)***

*E-mail: ariff-1947@mail.ru*

***Abstract:*** The article presents the results of diffusion welding work items stamps, produced a pair of "hard alloy-steel." Established that for a lasting connection, you need to choose the compensation shim type "Permalloy." Investigated modes of diffusion bonding, temperature and duration of the process. Selected by their optimal values.

***Key words:*** diffusion bonding, hard alloy, steel, compound, permalloy.

Надійшла до редколегії 28.12.2010.

**УДК 621.923.7**

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ПРОХОЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА ЧЕРЕЗ ПАРОГАЗОВУЮ ОБОЛОЧКУ ПРИ АНОДНОМ ПРОЦЕССЕ**

**Синькевич Ю.В., Янковский И.Н. (БНТУ, г. Минск, Беларусь)**

*Факс: + 375 (17) 2090576; E-mail: [2707110@list.ru](mailto:2707110@list.ru)*

***Аннотация.*** В статье приведены результаты осциллографических и спектральных исследований электрического тока, протекающего в системе металлический анод – парогазовая оболочка – электролитный катод для трех режимов анодного процесса в водных электролитах – анодного электролитного нагрева, электрогидродинамического и электролитно-разрядного. Предложена физическая модель прохождения электрического тока через парогазовую оболочку.

***Ключевые слова:*** электролит, парогазовая оболочка, электрический ток.

**1. Введение.** Наличие сплошной динамически устойчивой парогазовой оболочки, отделяющей поверхность анода от электролита, характерно для трех режимов анодного процесса в водных электролитах – анодного электролитного нагрева, электрогидродинамического и электролитно-разрядного. Характер проводимости парогазовой оболочки предопределяет основные физико-химические закономерности процессов, протекающих на поверхности анода и в электролите, и их технологическое применение. В связи со сложностью физико-химических явлений, протекающих в парогазовой оболочке, физический механизм прохождения через нее электрического тока с регистрируемой в экспериментах плотностью до настоящего времени однозначно не установлен.

Механизм дискретной ионной проводимости парогазовой оболочки при анодном электролитном нагреве предложен авторами работы [1]. Опираясь на результаты экспери-

ментов, они предложили гипотезу, согласно которой эмиссия ионов в парогазовую оболочку происходит в местах наибольшего приближения к аноду колеблющейся поверхности электролита, поскольку именно там достигаются наиболее высокие напряженность электрического поля и концентрация избыточных ионов.

На основе обширного анализа в [2] показано, что при электролитно-разрядном режиме обработки механизм прохождения электрического тока через парогазовую оболочку соответствует тлеющему разряду. Следует отметить, что электрический ток имеет в своем составе как постоянную (низкочастотную), так и переменную высокочастотную составляющие. Согласно предложенной в работе [3] физической модели прианодной области постоянная составляющая электрического тока обусловлена ионно-электронной проводимостью парогазовой оболочки, а переменная – замыкающими парогазовую оболочку микроскопическими электролитными мостиками.

Целью настоящей работы является установление корреляционных связей режимов анодной электролитной обработки с характеристиками электрического тока, протекающего в парогазовой оболочке.

## 2. Основное содержание и результаты работы

Исследования выполнялись на экспериментальной установке, в состав которой входили регулируемый источник постоянного тока мощностью 15 кВт и электролитическая ячейка объемом 19 дм<sup>3</sup>, выполненная на базе термостата СЖМЛ – 19/2,5 – И1. Анод представлял собой экранированный фторопластом с двух торцов образец Ø 8×65 мм из стали 20Х13. Он размещался в электролите вертикально на оси симметрии ячейки на глубине 100 мм от зеркала электролита. В качестве электролита использовали 5%-ый водный раствор сульфата аммония. Температура электролита варьировалась в диапазоне 50...90 °С с шагом 10 °С и термостатировалась с точностью ±1 °С. С мало индуктивного шунта  $R=3,75 \cdot 10^{-3}$  Ом (75 ШС 20 А, 75 мВ, 0,5 ГОСТ 8042 – 81), включенного в катодную цепь в непосредственной близости от ячейки, сигнал подавался на вход запоминающего осциллографа С8-13. Оценка величины постоянной и амплитуды переменной составляющих электрического тока проводилась по экрану осциллографа с учетом вертикальной развертки осциллографа и сопротивления шунта.

На первом этапе исследовалось влияние температуры электролита на величину постоянной и амплитуду переменной составляющих тока разряда при напряжении 300 В и

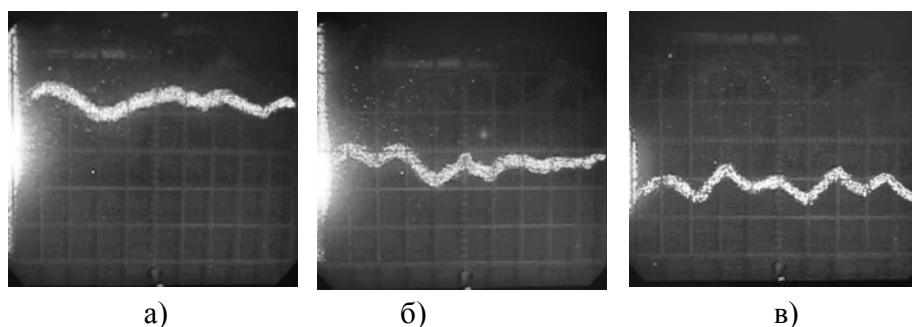


Рис. 1. Осциллограммы (0,2 мсек/дел; 5 мВ/дел) электрического тока при температуре электролита 60 °С (а), 70 °С (б) и 80 °С (в)

площади поверхности образца 7,5 см<sup>2</sup>. Анализ полученных результатов показал, что повышение температуры на каждые 10 °С приводит к уменьшению величины постоянной составляющей электрического тока в среднем на 1,4...2,0 А (рис. 1).

Обратно пропорциональное влияние температуры электролита на величину постоянной составляющей электрического тока связано с тем, что при повышении температуры

электролита существенно изменяются его физико-механические свойства, в частности кинематическая вязкость и поверхностное натяжение. Также снижается количество электрической энергии, расходуемой на нагрев электролита в прианодной области до температуры кипения и на образование парогазовой оболочки. В результате этого средняя толщина парогазовой оболочки увеличивается. Для исследованных режимов анодного процесса электрический ток в электролитической ячейке встречает наибольшее сопротивление в парогазовой оболочке [3]. Увеличение толщины парогазовой оболочки приводит к возрастанию ее электрического сопротивления и, как следствие, к снижению величины постоянной составляющей электрического тока.

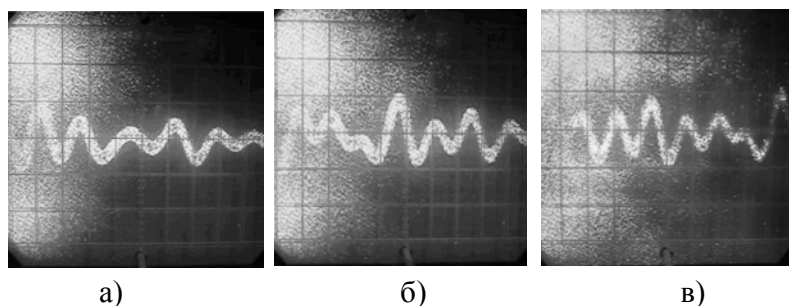


Рис. 2. Осциллограммы (0,2 мксек/дел; 5 мВ/дел) переменной составляющей электрического тока при температуре электролита 60 °C (а), 70 °C (б) и 80 °C (в)

переменной составляющей электрического тока. Это было бы справедливо в случае рассмотрения системы металлический анод – парогазовая оболочка – электролитный катод в виде стационарной геометрически правильной плоскопараллельной системы. В действительности эта система является динамической, в различных областях которой толщина парогазовой оболочки варьируется в определенных пределах. Повышение температуры электролита приводит к увеличению

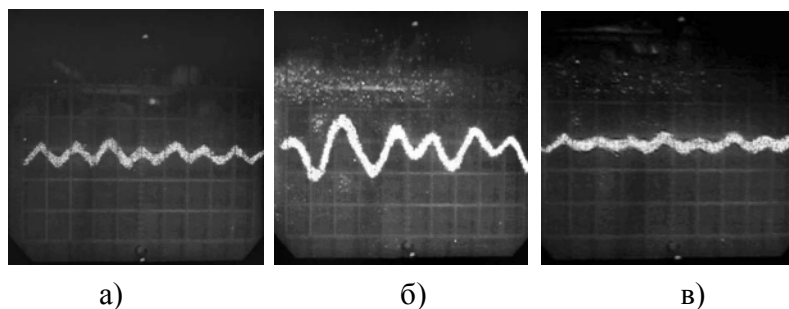


Рис. 3. Осциллограммы (0,2 мксек/дел; 5 мВ/дел) переменной составляющей электрического тока для режимов анодного электролитного нагрева (а), электрогидродинамического (б) и электролитно-разрядного (в)

обработки на амплитуду переменной составляющей электрического тока разряда при температуре электролита  $T^{\text{эл}}=80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Анализ полученных данных показал, что наличие пере-

При повышении температуры электролита в диапазоне 50...90 °C амплитуда и частота переменной составляющей остаются практически неизменными (рис. 2). Этот факт на первый взгляд вступает в противоречие с выводом о влиянии температуры электролита на толщину парогазовой оболочки, увеличение которой должно было бы повлиять на характер осциллограмм пере-

средней толщины парогазовой оболочки. Образование же микроскопических электролитных мостиков при напряженности электрического поля в оболочке порядка  $10^6 \dots 10^8\text{ В/м}$  имеет вероятностный стохастический характер и происходит на максимально приближенных к поверхности анода участках вне зависимости от средней толщины парогазовой оболочки.

На втором этапе исследования влияло напряжение



менной составляющей характерно для трех исследованных режимов анодного процесса (рис. 3).

Следует отметить, что в электрогидродинамическом режиме при повышении на-

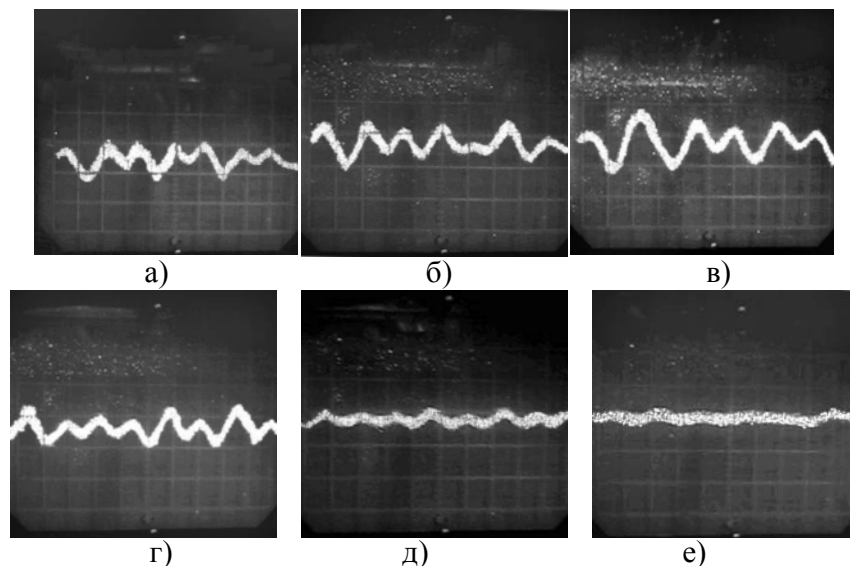


Рис. 4. Осциллограммы (0,2 мксек/дел, 5 мВ/дел) переменной составляющей электрического тока в электрогидродинамическом режиме при напряжениях 235 В (а), 275 В (б), 300 В (в), 350 В (г) и в электролитно-разрядном режиме при напряжениях 375 В (д), 400 В (е)

пряжения амплитуда переменной составляющей постепенно увеличивается, достигая максимального значения при 300 В (рис. 4). Дальнейшее повышение напряжения приводит к постепенному уменьшению амплитуды переменной составляющей тока и при переходе в электролитно-разрядный режим она имеет минимальное значение. Величина постоянной составляющей электрического тока при увеличении напряжения в исследованном диапазоне напряжений монотонно убывает. Это обусловлено тем, что с ростом напряжения, с одной сторо-

ны увеличивается средняя толщина парогазовой оболочки, а с другой – уменьшаются размеры микроскопических электролитных мостиков, замыкающих оболочку.

На третьем этапе исследовалось влияние площади образца (2,5; 5 и 7,5 см<sup>2</sup>) на вели-

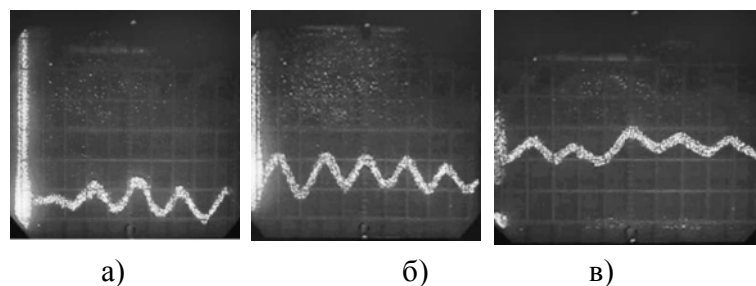


Рис. 5. Осциллограммы (0,2 мксек/дел; 5 мВ/дел) электрического тока в зависимости от площади обрабатываемого образца: 2,5 см<sup>2</sup> (а), 5 см<sup>2</sup> (б), 7,5 см<sup>2</sup> (в)

чину постоянной и амплитуду переменной составляющих электрического тока при температуре электролита 80 °С и напряжении 300 В. Увеличение обрабатываемой площади на каждые 2,5 см<sup>2</sup> приводит к пропорциональному росту постоянной составляющей в среднем на 1,2...1,4 А. Амплитуда переменной составляющей остается практически неизменной и в среднем составляет 1,3 А (рис. 5).

Исследование постоянной составляющей тока разряда проводилось путем снятия спектральных характеристик тока в низкочастотной области (0...14 кГц) при напряжении 300 и 375 В по методике, приведенной в [4]. В спектрах тока в области 400...700 Гц был обнаружен характерный резо-

нансный пик, амплитуда которого уменьшалась при снижении напряжения с 375 до 300 В в 5,5; 4 и 2 раза при температурах электролита 90, 70 и 50 °С соответственно. При напряжении 300 В частота и амплитуда характерного резонансного пика тока от температуры электролита практически не зависели. Наряду с резонансным пиком на спектрограммах наблюдаются гармоники тока разряда, кратные частоте сети. Характерная спектрограмма постоянной составляющей электрического тока, полученная при напряжении 300 В, температуре электролита 80 °С и площади поверхности образца 7,5 см<sup>2</sup>, приведена на рис. 6.

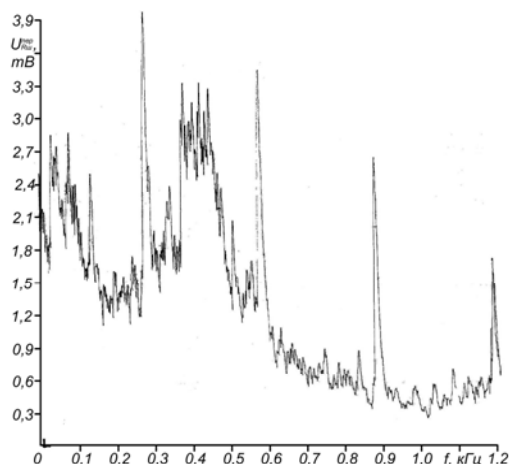


Рис. 6. Спектральная характеристика постоянной составляющей тока

Анализ полученных экспериментальных данных позволяет предложить качественную физическую модель прохождения электрического тока через парогазовую оболочку.

Учитывая внешний вид осциллограмм переменной составляющей электрического тока, на которых отсутствуют резкие падения напряжения, можно предположить, что замыкание паро-

газовой оболочки микроскопическими электролитными мостиками происходит в несколько этапов. Возникающая в системе электролитный катод – парогазовая оболочка – анод электростатическая пондеромоторная сила втягивает электролит в парогазовую оболочку в области случайных неоднородностей электрического поля, образуя микроскопические электролитные мостики. В парогазовой оболочке в большом количестве присутствуют возбужденные и заряженные кластеры и частицы – анионы и катионы электролита, ионы  $H^+$ ,  $OH^-$ ,  $H_2O^+$  и другие. Постепенное проникновение электролитного мостика в парогазовую оболочку сопровождается уменьшением сопротивления между поверхностью анода и вершиной мостика. В результате происходит увеличение силы тока, что соответствует участку подъема осциллограммы единичного разряда. Мостик достигает поверхности анода за время порядка 0,2 мсек. Физическое состояние мостика определяется инерцией и электрическим полем. По мере подвода тепла в соответствии с законом Джоуля – Ленца температура электролита в области контакта мостика с поверхностью анода достигает точки кипения. Поскольку температура продолжает расти, то условия не соответствуют равновесному кипению и имеет место локальный перегрев микроскопической области электролитного мостика. В конечном итоге подведенной энергии оказывается достаточно для преодоления фазового барьера – мостик взрывается и в парогазовую оболочку попадают заряженные частицы. В результате микровзрыва возникает ударная волна, распространяющаяся по направлению к электролитному катоду. Это приводит к локальному расширению парогазовой оболочки, а наличие в ней заряженных частиц – к постепенному уменьшению силы тока единичного разряда, что соответствует падающей ветви осциллограммы единичного разряда. Некоторая часть электролитных мостиков может взрываться, не достигнув поверхности анода. Это объясняет наличие на некоторых осциллограммах плавного перехода между ростом и падением напряжения (рис. 2 б, в).

Аналогичным механизмом можно объяснить постоянную составляющую электрического тока с той лишь разницей, что в этом случае размеры электролитных мостиков и

временные интервалы единичного разряда будут значительно больше, а на проникновение электролитного мостика в парогазовую оболочку дополнительное и более существенное влияние оказывают гидродинамические потоки в электролите и параметры электрической цепи. При этом постоянная составляющая тока оказывается суммой перекрывающихся во времени импульсов от отдельных мостиков.

**3. Заключение.** Таким образом, основной вклад в суммарный электрический ток, протекающий в системе электролитный катод – парогазовая оболочка – анод, обеспечивается за счет пробоя парогазовой оболочки электролитными мостиками различной величины и лишь незначительную долю в суммарном токе разряда составляет ионно-электронная проводимость парогазовой оболочки.

**Список литературы:** 1. Белкин П.Н., Белихов А.Б. Стационарная температура анода, нагреваемого в водных электролитах // Инженерно-физический журнал. – 2002. – Т. 75. – № 6. – С. 19–24. ISSN 0021-0285/ 2. Баковец В.В., Поляков О.В., Долговесова И.П. Плазменно-электролитическая анодная обработка металлов. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд., 1991. – 168 с. ISBN 5-02-029248-6. 3. Синькевич Ю.В., Янковский И.Н. Физико-математическая модель процесса электроимпульсного полирования // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2006. – Вып. 32. – С. 206–212. ISBN 966-7907-21-X. 4. Здор Г.Н., Тимошевич В.Б., Синькевич Ю.В., Янковский И.Н. Собственные радиоизлучение и ток электрического разряда как инструмент контроля и управления процессом электроимпульсного полирования // Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2009. – № 2. – С. 111–119. ISSN 0002-3566.

#### **RESEARCH OF THE MECHANISM OF PASSAGE ELECTRIC CURRENT THROUGH THE STEAM- GAS SHELL AT ANODIC PROCESS**

**Sinkevitch J. V., Jankovskij I. N.** (BNTU, Minsk, Belarus)

**Abstract:** In article results oscillographic and spectral researches of the electric current proceeding in system the metal anode – the steam-gas shell – electrolytic the cathode for three regimes of anodic process in water electrolytes - anodic electrolytic heating, electrohydrodynamic and electrolytic-digit are resulted. The physical model of passage of an electric current through the steam-gas shell is offered.

**Key words:** an electrolyte, the steam-gas shell, an electric current.

#### **ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМУ ПРОХОДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ ЧЕРЕЗ ОБОЛОНКУ ПАРОГАЗОВУЮ ПРИ АНОДНОМУ ПРОЦЕСІ**

**Синькевич Ю.В., Янковський І.Н.** (БНТУ, м. Мінськ, Білорусь)

**Анотація:** У статті приведені результати осцилографічних і спектральних досліджень електричного струму, що протікає в системі металевий анод – парогазова оболонка, – електролітний катод для трьох режимів анодного процесу у водних електролітах – анодного електролітного нагріву, електрогідродинамічного і електролітно-розрядного. Запропонована фізична модель проходження електричного струму через парогазову оболонку.

**Ключеві слова:** електроліт, парогазовая оболонка, електричний струм.

Надійшла до редколегії 28.01.2011.