

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-6-443-450>

УДК 621.785

Распределение температурных зон при электролитно-плазменном нагреве титановых сплавов

Чл.-кор. НАН Беларуси, докт. физ.-мат. наук, проф., В. М. Асташинский¹⁾,
канд. техн. наук, доц. А. Ю. Королёв²⁾, асп. А. И. Иванов²⁾, канд. техн. наук В. С. Нисс²⁾,
докт. техн. наук, проф. А. С. Калинин³⁾

¹⁾ГНУ «Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси»
(Минск, Республика Беларусь),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

³⁾Белорусский государственный технологический университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Электролитно-плазменная обработка (ЭПО) является перспективным методом повышения эксплуатационных характеристик металлических материалов. Разновидностью ЭПО является анодное электролитно-плазменное упрочнение. Данная технология позволяет насыщать поверхность обрабатываемых деталей атомами легких неметаллических элементов, входящих в состав используемого электролита. Ограничения к широкому применению электролитно-плазменного упрочнения в промышленности связаны с рядом особенностей процесса, выраженных в неравномерности нагрева обрабатываемых деталей, а также с необходимостью их медленного погружения в электролит для избежания срыва процесса нагрева. В работе представлены результаты исследования влияния рабочего напряжения на максимальную температуру нагрева и распределение температурных зон в процессе электролитно-плазменного нагрева образцов цилиндрической формы из титанового сплава ВТ6. Установлено, что электролитно-плазменная обработка в растворе хлорида аммония при величине рабочего напряжения от 200 до 260 В обеспечивает нагрев образцов до температуры 1200 °С. Наибольшая температура нагрева наблюдается при напряжении 260 В, а наименьшая – при 200 В. При этом для образцов, подвергающихся обработке, характерно наличие градиента температур по высоте (максимальный нагрев наблюдается в наиболее погруженной части образца). В процессе ЭПО выделяются до шести ярко выраженных температурных зон, однако одновременно существует не более пяти таких зон. Уменьшение длины и диаметра образцов приводит к их более равномерному нагреву. При этом происходит увеличение размеров наиболее высокотемпературных зон за счет уменьшения или исчезновения наименее низкотемпературных зон. При увеличении длины образцов наблюдается обратная закономерность.

Ключевые слова: электролитно-плазменный нагрев, анодный процесс, температура, рабочее напряжение, неоднородность нагрева, температурный градиент

Для цитирования: Распределение температурных зон при электролитно-плазменном нагреве титановых сплавов / В. М. Асташинский [и др.] // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 6. С. 443–450. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-6-443-450>

Адрес для переписки

Иванов Алексей Игоревич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 24,
220013, Минск, Республика Беларусь
тел. +375 (17) 374-25-98
ivanou_ai@park.bntu.by

Address for correspondence

Ivanov Aleksei I.
Belarusian National Technical University
24, Ya. Kolas str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
тел. +375 (17) 374-25-98
ivanou_ai@park.bntu.by

Distribution of Temperature Zones during Electrolytic Plasma Heating of Titanium Alloys

V. M. Astashinskiy¹⁾, A. Yu. Korolyov²⁾, A. I. Ivanov²⁾, V. S. Niss²⁾, A. S. Kalinichenko³⁾

¹⁾A. V. Lykov Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

³⁾Belarusian State Technological University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Electrolytic-plasma treatment (EPT) is a promising method for improving the operating characteristics of metal materials. Anodic electrolytic-plasma hardening is a variation of EPT. This technology makes it possible to saturate the surface of the processed parts with atoms of light non-metallic elements, included in the composition of the electrolyte used. Limitations to the widespread use of electrolytic-plasma hardening in industry are associated with a number of process features, expressed in the uneven heating of the workpieces, as well as the need for them to be slowly immersed into the electrolyte to avoid disruption of the heating process. The paper presents the results of a study of the influence of operating voltage on the maximum heating temperature and the distribution of temperature zones during electrolytic-plasma heating of cylindrical samples made of VT6 titanium alloy. It has been established that electrolytic-plasma treatment in an ammonium chloride solution at an operating voltage of 200 to 260 V ensures heating of samples to a temperature of 1200 °C. The highest heating temperature is observed at a voltage of 260 V, and the lowest at 200 V. At the same time, samples undergoing processing are characterized by the presence of a temperature gradient along the height (maximum heating is observed in the most submerged part of the sample). During the EPT process, up to six distinct temperature zones are identified, but no more than five such zones exist simultaneously. Reducing the length and diameter of the samples leads to their more uniform heating. In this case, the size of the zones with the highest temperature increases due to the reduction or disappearance of the least low temperature zones. The opposite pattern is observed with increasing sample length.

Keywords: electrolytic-plasma heating, anodic process, temperature, operating voltage, inhomogeneous heating, temperature gradient

For citation: Astashinskiy V. M., Korolyov A. Yu., Ivanov A. I., Niss V. S., Kalinichenko A. S. (2024) Distribution of Temperature Zones during Electrolytic Plasma Heating of Titanium Alloys. *Science and Technique*. 23 (6), 443–450. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-6-443-450> (in Russian)

Введение

В настоящее время титановые сплавы широко применяются в авиа- и судостроении, химической промышленности, медицине и многих других отраслях. Фактором, в значительной степени ограничивающим применение сплавов на основе титана, является низкий уровень триботехнических свойств, обусловленный низкой твердостью и склонностью титана к схватыванию при работе в парах трения [1]. Для решения этой проблемы разрабатывают различные методы модифицирования свойств титановых сплавов (в первую очередь, поверхности). Классические методы диффузионного насыщения поверхности, как, например, химико-термическая обработка в различных средах, имеют ряд недостатков, среди которых одними из самых существенных являются длительное время технологического процесса, а также вероятность возникновения внутренних напряжений в диффузионном слое [2]. По этим

причинам особый интерес представляют высокоэнергетические методы упрочнения поверхности титановых сплавов, такие как лазерное и ионно-плазменное упрочнение, электронно-лучевая поверхностная обработка, воздействие на поверхность компрессионным плазменным потоком, а также электролитно-плазменная обработка (ЭПО). Данные методы позволяют существенно сократить время обработки поверхности сталей и сплавов и при этом значительно повысить их механические и триботехнические свойства [3].

При ЭПО на деталь (анод) подают напряжение определенной величины, после чего ее плавно погружают в раствор электролита. Под воздействием напряжения происходит вскипание электролита вблизи поверхности анода, в результате чего образуется парогазовая оболочка, которая оттесняет электролит от поверхности детали. Парогазовая оболочка имеет наибольшее сопротивление в электрохимической системе, что обуславливает выделение

теплоты [4, 5]. Направленные тепловые потоки из нее на электрод и в раствор способствуют скоростному разогреву анода с последующим самоподдержанием парогазовой оболочки. Таким образом возникает многофазная система «металл – плазма – парогазовая оболочка – электролит», в которой носителями зарядов служат как электроны, так и ионы, входящие в состав электролита [4, 6, 7].

Основным применением ЭПО является финишная полировка поверхностей электропроводящих материалов [8–12]. Данный метод применяется для снижения шероховатости и очистки поверхностей различных изделий. Однако в зависимости от режима нагрева, состава электролита и конструктивных параметров оборудования можно производить закалку, химико-термическую и термоциклическую обработку материалов и, в частности, титановых сплавов [13]. В результате такой обработки на поверхности образуется упрочненный слой толщиной более 100 мкм за время обработки от 5 до 10 мин, что позволяет значительно повысить ее механические и триботехнические свойства. Недостатком практического применения такой технологии является неравномерность нагрева различных поверхностей упрочняемого изделия. В результате изделия могут иметь неодинаковые физико-механические свойства. Прежде всего эти различия проявляются по их высоте.

Температура анода, измеряемая термопарой в какой-либо точке образца, достаточно полно характеризует процесс только в случае однородного нагрева. Такая ситуация реализуется при обработке достаточно малых деталей либо достигается применением специальных средств. При нагреве более крупных образцов наблюдается неравномерность распределения температурных зон по высоте погружаемого образца. Одной из причин неоднородного распределения температуры является неодинаковое выделение энергии по высоте из-за убывания локальной плотности тока в вертикальном направлении, связанное с расширением вверх парогазовой оболочки.

Целью работы являлось установление влияния напряжения на максимальную температуру нагрева и распределение температурных зон в процессе электролитно-плазменного нагрева

образцов цилиндрической формы из титанового сплава ВТ6.

Оборудование для выполнения экспериментов и описание проводимых исследований

Исследования проводились на установке для электролитно-плазменной обработки, принципиальная схема которой представлена на рис. 1.

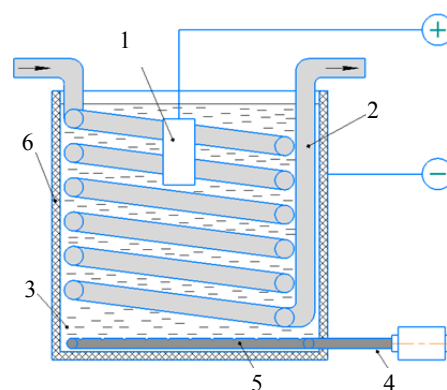


Рис. 1. Принципиальная схема установки для электролитно-плазменной обработки (анодный процесс): 1 – образец (анод); 2 – теплообменник (катод); 3 – электролит; 4 – насос; 5 – барботер; 6 – рабочая ванна

Fig. 1. Schematic diagram of the installation for electrolytic-plasma treatment (anodic process): 1 – sample (anode); 2 – heat exchanger (cathode); 3 – electrolyte; 4 – pump; 5 – bubbler; 6 – working bath

Рабочая ванна установки выполнена из диэлектрического материала. Внутри нее располагаются теплообменник и барботер, а ее внутренний объем заполнен электролитом. Образец подключался к положительному полюсу источника питания, а теплообменник – к отрицательному, таким образом осуществлялся анодный электролитно-плазменный нагрев (ЭПН). Регулировка напряжения выполнялась при помощи трехфазного ЛАТРа. Контроль величины рабочего напряжения осуществлялся при помощи цифрового осциллографа OWON XDS3102A, а измерение силы тока – при помощи этого же осциллографа и токоизмерительного шунта. Стабилизация температуры электролита выполнялась при помощи системы охлаждения, состоящей из теплообменника, чиллера и барботера. В качестве охлаждающей

жидкости в теплообменнике использовалась вода, температура которой поддерживалась на заданном уровне при помощи чиллера.

Измерения температуры образцов, погруженных в электролит, проводились при различных значениях рабочего напряжения. Параллельно с этим оценивались размеры возникающих в процессе ЭПН температурных зон по длине образцов. В качестве электролита использовался однокомпонентный раствор, представляющий собой водный раствор хлорида аммония (10 %). Хлорид аммония добавляется в качестве компонента, обеспечивающего электропроводность раствора. Температура электролита поддерживалась на уровне 30 ± 2 °C на протяжении всего процесса ЭПН.

Исследования проводили на цилиндрических образцах из титанового сплава ВТ6 длиной 20 мм и диаметром 8 мм с осевым глухим отверстием диаметром 2 мм длиной 10 мм, в которое помещалась изолированная термопара ТР-01Е (рис. 2). Образцы полностью погружались в электролит, скорость погружения составляла $v = 0,5\text{--}1,5$ мм/с. Измерение температуры нагрева образцов в ходе ЭПН при различных значениях рабочего напряжения осуществлялось после их полного погружения.

Температурные зоны, образующиеся на титановых образцах цилиндрической формы различных размеров, определялись по фотоснимкам, полученным после их выдержки в электролите в течение 10 с при различных значениях рабочего напряжения. Время выдержки выбиралось исходя из того факта, что ско-

рость нагрева образцов при ЭПН составляет $100\text{--}150$ °C/с [4].

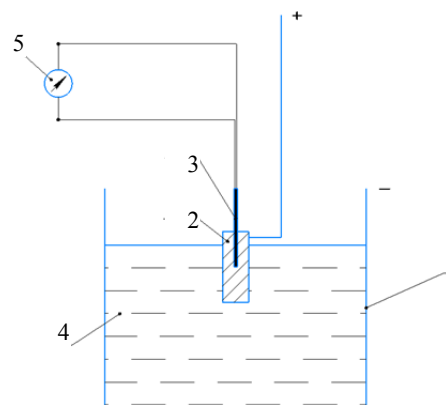


Рис. 2. Схема измерения температуры:
1 – катод (теплообменник); 2 – анод (образец);
3 – термопара; 4 – электролит;
5 – измерительный прибор

Fig. 2. Scheme of the temperature measurement process:
1 – cathode (heat exchanger); 2 – anode (sample);
3 – thermocouple; 4 – electrolyte; 5 – measuring device

По истечении данного времени образцы извлекались из электролита и осуществлялась их фотосъемка. Примеры полученных фотографий представлены на рис. 3.

По полученным фотографиям при помощи таблицы цветов каления для сплавов титана [14] оценивалось распределение температурных зон в процессе ЭПО исследуемых образцов. На основе полученных экспериментальных данных были построены диаграммы распределения температуры по длине образцов.

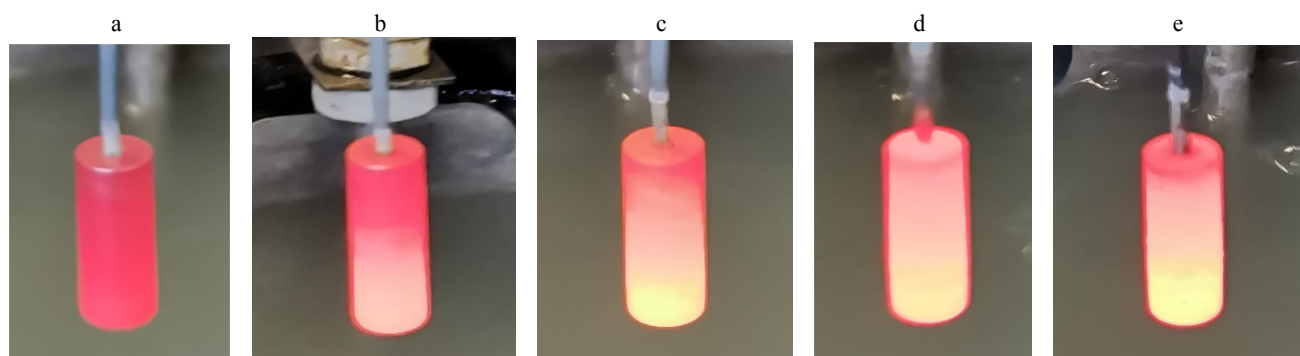


Рис. 3. Примеры полученных фотографий для образца длиной 20 мм и диаметром 8 мм при величине рабочего напряжения: 200 В (a); 220 В (b); 240 В (c); 260 В (d); 280 В (e)

Fig. 3. Examples of photographs obtained for a sample with a length of 20 mm and a diameter of 8 mm at an operating voltage of: 200 V (a); 220 V (b); 240 V (v); 260 V (d); 280 V (e)

Результаты и их обсуждение

Процесс электролитно-плазменного нагрева возникает при величине рабочего напряжения в диапазоне 200–280 В. Выход за пределы этого диапазона приводит к нарушению сплошности парогазовой оболочки и в результате к срыву процесса ЭПН. Большая часть выделяющейся в оболочке энергии расходуется на нагрев электролита. Тепловой поток в анод обычно не превышает 15 % [15], однако выделившегося количество теплоты вполне достаточно для разогрева детали до температуры 700–1200 °С в зависимости от установленной величины рабочего напряжения и размеров самого нагреваемого изделия.

На рис. 4 представлены результаты измерения температуры цилиндрического образца из титанового сплава ВТ6 в зависимости от величины рабочего напряжения, полученные в ходе его нагрева в водном растворе хлорида аммония (10 %).

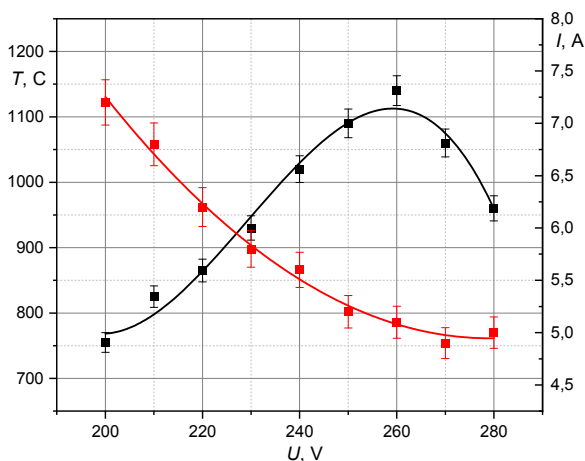


Рис. 4. Влияние рабочего напряжения (U) на изменение температуры образца (T) и силы тока (I):

— $T(U)$; — $I(U)$

Fig. 4. Impact of operating voltage (U) on changes of temperature (T) and amperage (I) in sample

— $T(U)$; — $I(U)$

При величине рабочего напряжения 240–270 В наблюдается нагрев образцов выше 1000 °С. При этом максимальная температура достигается при обработке образцов с величиной рабочего напряжения 260 В. Увеличение температуры при повышении рабочего напряжения от 200 до 260 В связано с возрастанием мощности, рассеиваемой в парогазовой оболочке [15, 16]. При дальнейшем повышении

напряжения происходит снижение температуры образца. В работе [16] показано, что данное явление может быть следствием появления импульсных разрядов, что в свою очередь приводит к распылению электролита и последующему охлаждению нагреваемого образца. Снижение величины тока при повышении напряжения (рис. 4) объясняется увеличением толщины парогазовой оболочки, что вызывает рост ее сопротивления [5, 16].

Неоднородность нагрева наблюдается и при обработке ранее рассмотренных образцов длиной 20 мм и диаметром 8 мм (рис. 5а). При 200 В по длине образца наблюдается наличие двух температурных зон, соответствующих температуре 600–750 °С (длиной 17,6 мм) и температуре менее 600 °С (длиной 2,4 мм). Более высокая температура наблюдается в нижней части образца (т.е. в той части, которая первой погружается в электролит), что, как уже было отмечено выше, объясняется увеличением толщины образующейся парогазовой оболочки по высоте образца. При повышении рабочего напряжения происходит постепенный рост температуры поверхности образцов. Как результат, возникают новые более высокотемпературные зоны, а низкотемпературные исчезают или уменьшаются в размерах. Так, при напряжении 220 В также наблюдаются две температурные зоны длиной 11 и 9 мм, которые соответствуют температуре 750–900 °С и 600–750 °С. Начиная с напряжения 240 В в нижней части образца образуется зона ярко-желтого цвета, которая соответствует температуре 1150–1200 °С. Кроме нее можно также выделить еще четыре температурные зоны, которые показывают, что при данном напряжении температура поверхности образца по его длине изменяется от 1150–1200 °С до 600–750 °С. Дальнейшее увеличение величины рабочего напряжения до 260 В приводит к максимальной температуре нагрева образца и, таким образом, к максимальной длине наиболее высокотемпературных зон. Так, длина зоны, соответствующей температуре 1150–1200 °С, составляет 6 мм, зоны 1050–1150 °С – 1,5 мм, зоны 900–1050 °С – 1,5 мм, а зоны 750–900 °С – 11 мм. При напряжении выше 260 В происходит уменьшение длины наиболее высокотемпературных зон и снова возникают более низкотемпературные зоны, соответствующие температуре 600–750 °С.

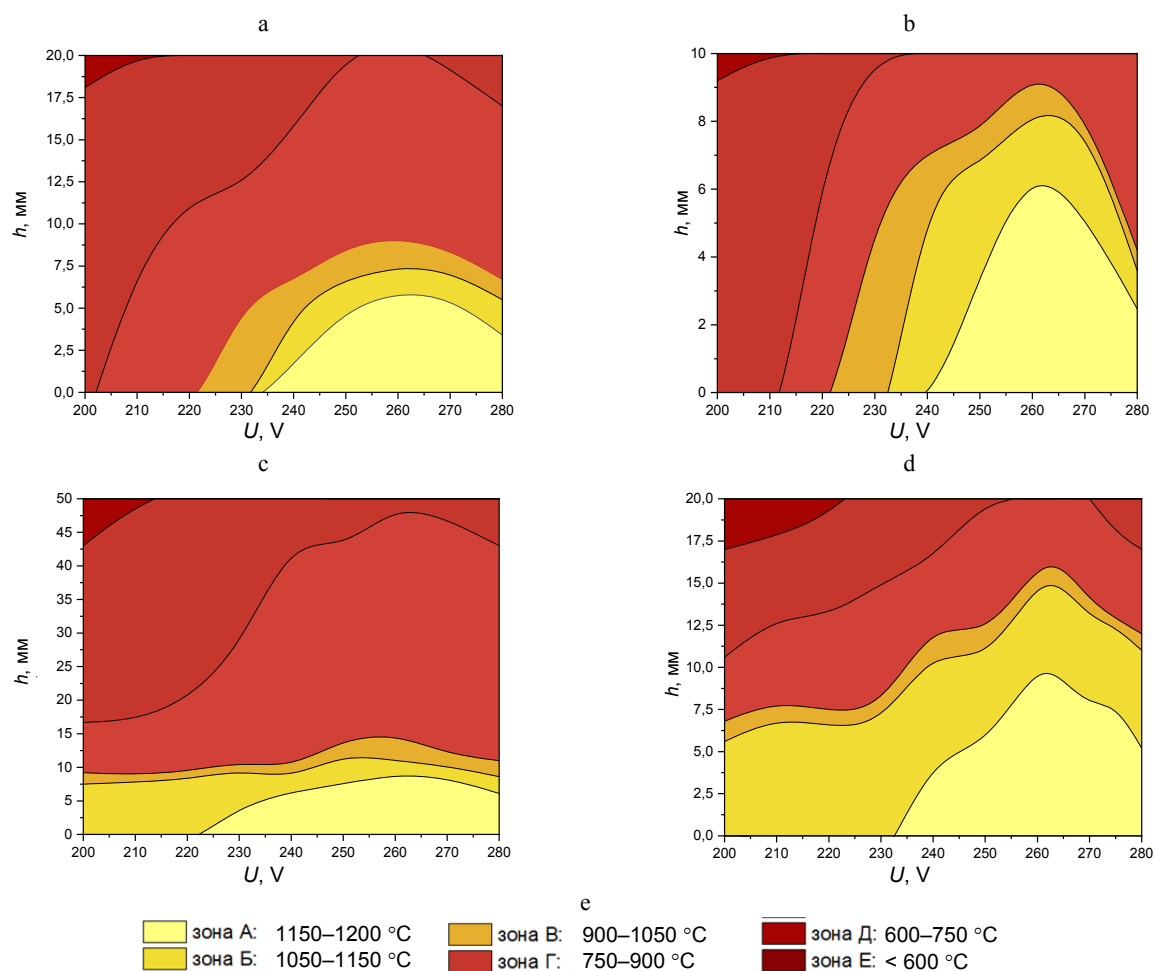


Рис. 5. Распределение температуры по длине образцов диаметром 8 мм (а–с) и 4 мм (д) с указанием соответствия цвета зоны нагрева образца и его температуры

Fig. 5. Temperature distribution along the length of samples with a diameter of 8 mm (a–c) and 4 mm (d) indicating the correspondence between the color of the heating zone of the sample and its temperature

Уменьшение длины образца в два раза (до 10 мм) приводит к более равномерному распределению температуры по длине образца (рис. 5b). Так, при 260 В наблюдаются четыре температурные зоны, однако в этом случае длина зоны, соответствующей температуре 1150–1200 °С, увеличивается до 60 % от общей длины образца (до 6 мм) по сравнению с 30 % при длине образца, равной 20 мм. Длина зоны, соответствующей 1050–1150 °С, составляет 2 мм, зоны 900–1050 °С – 1 мм, что также больше относительно длины образца, чем в предыдущем случае. Зона температур 750–900 °С, наоборот, уменьшается до 10 % длины образца, а ее длина составляет 1 мм.

Уменьшение диаметра образца в два раза (до 4 мм) при его длине 20 мм также обеспечивает более равномерный нагрев по длине (рис. 5d). В этом случае его нижний край нагревается до

температуры 1050–1150 °С при 200 В. Длина этой зоны составляет 5,5 мм (26 % длины образца). Кроме того, можно выделить еще четыре температурные зоны. Длина зоны 900–1050 °С составляет 2,5 мм (12,5 % длины образца), а длины трех остальных зон (600–750 °С, 750–900 °С и 1150–1200 °С) примерно одинаковы и равны 4 мм (20 % длины образца). До напряжения 230 В наблюдается рост высокотемпературных зон за счет уменьшения размеров менее высокотемпературных зон. Дальнейшее увеличение напряжения с 230 до 260 В приводит к возникновению новой высокотемпературной зоны, соответствующей температуре 1150–1200 °С. Максимальная температура нагрева наблюдается также при напряжении 260 В. В этом случае длина температурных зон составляет: для зоны 1150–1200 °С – 9,5 мм (47,5 % длины

образца), для зоны 1050–1150 °С – 5 мм (25 % длины образца), для зоны 750–900 °С – 1,5 мм (7,5 % длины образца), а для зоны 600–750 °С – 4 мм (20 % длины образца).

При увеличении длины обрабатываемого образца в 1,5 раза (до 50 мм) при величине его диаметра, равного 8 мм, наблюдается обратная картина (рис. 5с). Длина более низкотемпературных зон в этом случае больше, чем высокотемпературных. При величине рабочего напряжения 260 В по длине образца можно выделить пять зон, соответствующих температурам от 1150–1200 °С до 600–750 °С. Длина зоны 1150–1200 °С составляет 8,5 мм (17 % длины образца), зоны 1050–1150 °С – 2,5 мм (5 % длины образца), зоны 900–1050 °С – 3,5 мм (7 % длины образца), зоны 750–900 °С – 33,5 мм (67 % длины образца) и зоны 600–750 °С – 2 мм (4 % длины образца). Следует также отметить, что при вертикальном погружении образца в электролит его нижняя часть нагревается намного сильнее его верхней части. Причем температура 1050–1150 °С у нижнего края образца наблюдается уже начиная с напряжения 200 В, в то время как температура в верхней части образца в данном случае все еще ниже 600 °С. Данное явление впоследствии может привести к перегреву и короблению обрабатываемых деталей такого типоразмера.

Анализируя полученные диаграммы, можно отметить, что для всех образцов характерно наличие градиента температур по высоте. Всего на обрабатываемых образцах можно выделить шесть ярко выраженных температурных зон, при этом одновременно существуют не более пяти (а в ряде случаев – не более четырех) таких зон. Максимальный нагрев наблюдается в наиболее погруженной части образца, а наименьший – соответственно в наименее погруженной части. При повышении рабочего напряжения степень нагрева образцов увеличивается. Максимальная степень нагрева и, как результат, наиболее длинные высокотемпературные зоны наблюдаются при напряжении 260 В. Уменьшение длины и диаметра образцов приводит к их более равномерному нагреву, что выражается в сокращении размеров наиболее низкотемпературных зон и, наоборот, увеличению размеров более высокотемпературных, а также возникновению наиболее высокотемпературных зон (1050–1150 °С и 1150–1200 °С) при меньших значениях рабочего напряжения. Увеличение длины образцов приводит к обратному эффекту, выражающе-

муся в большем количестве температурных зон, а также в большей длине менее высокотемпературных зон. Это является свидетельством менее равномерного нагрева по длине таких образцов по сравнению с более малоразмерными образцами схожего типоразмера. Также следует отметить, что наличие градиента температуры по длине в данном случае приводит к чрезмерному перегреву образцов в наиболее погруженной их части, что может стать причиной возникновения дефектов, в частности коробления и повышенной хрупкости.

ВЫВОДЫ

1. Для обрабатываемых образцов характерно наличие градиента температур по высоте. При вертикальном погружении образца в электролит максимальный нагрев наблюдается в наиболее погруженной его части, а наименьший – в наименее погруженной. Всего можно выделить до шести ярко выраженных температурных зон, однако одновременно существует не более пяти таких зон.

2. Уменьшение длины или диаметра образцов способствует их более равномерному нагреву. В этом случае размеры наиболее низкотемпературных зон уменьшаются и в то же время происходит увеличение более высокотемпературных зон, которые соответствуют температурам 1050–1150 °С и 1150–1200 °С. Кроме того, в данном случае высокотемпературные зоны возникают при меньших значениях рабочего напряжения.

3. Увеличение длины образца приводит к повышению неравномерности его нагрева по высоте. При этом возможно возникновение перегрева в нижней части образца, поскольку градиент температур увеличивается и его нижний край интенсивно нагревается до температур 1050–1150 °С, в то время как температура в верхней части может не превышать 600–750 °С.

ЛИТЕРАТУРА

1. Belkin, P. N. Plasma Electrolytic Saturation of Titanium and Its Alloys with Light Elements / P. N. Belkin, A. M. Borisov, S. A. Kusmanov // Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2016. Vol. 10, No 3. P. 516–535. <https://doi.org/10.1134/s1027451016030058>.
2. Розенберг, С. Э. Дефекты структуры диффузионно-упрочненных изделий / С. Э. Розенберг, А. А. Сусин. Минск: Беларус. навука, 1997. 223 с.

3. Торьянников, А. Ю. Сравнительный анализ высокоэнергетических методов поверхностного упрочнения стали / А. Ю. Торьянников, А. А. Барышников // Молодой ученый. 2021. № 19 (361). С. 45–49.
4. Plasma Electrolysis for Surface Engineering / A. L. Yerokhin [et al.] // Surface and Coating Technologies. 1999. Vol. 122, No 2–3. P. 73–93. [https://doi.org/10.1016/s0257-8972\(99\)00441-7](https://doi.org/10.1016/s0257-8972(99)00441-7).
5. Гончар, В. И. Образование паровой оболочки при прохождении тока через электролит / В. И. Гончар, А. К. Товарков // Электронная обработка материалов. 1991. № 1. С. 49–52.
6. Ширяева, С. О. О некоторых особенностях появления ионов вблизи заряженной поверхности интенсивно испаряющегося электролита / С. О. Ширяева, А. И. Григорьев, В. В. Морозов // Журнал технической физики. 2003. Т. 73. Вып. 7. С. 21–27.
7. Куликов, И. С. Электролитно-плазменная обработка материалов / И. С. Куликов, С. В. Васьченко, А. Я. Каменев. Минск: Беларус. навука, 2010. 232 с.
8. Electrolytic plasma polishing of NiTi alloy / A. Korolyov [et al.] // Mathematical models in engineering. 2021. Vol. 7, iss. 4. P. 70–80. <https://doi.org/10.21595/mme.2021.22351>.
9. Plasma Electrolyte Polishing of Titanium and Niobium Alloys in Low Concentrated Salt Solution Based Electrolyte / Y. Aliakseyeu [et al.] // Mechanics. 2021. Vol. 27, No 1. P. 88–93. <http://doi.org/10.5755/j02.mech.25044>.
10. Электролитно-плазменная обработка в управляемых импульсных режимах / А. Ю. Королев [и др.] // Наука и техника. 2021. Т. 20, № 4. С. 279–286. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-279-286>.
11. Особенности электролитно-плазменного нагрева при электрохимико-термической обработке стали / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Наука и техника. 2013. № 6. С. 20–23.
12. Belkin, P. N. Mechanism and Technological Opportunity of Plasma Electrolytic Polishing of Metals and Alloys / P. N. Belkin, S. A. Kusmanov, E. V. Parfenov // Applied Surface Science Advances. 2020, Vol. 1. Art. 100016. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2020.100016>.
13. Белкин, П. Н. Анодная электрохимико-термическая модификация металлов и сплавов / П. Н. Белкин // Электронная обработка материалов. 2010. № 6. С. 29–41.
14. Цветное литье: справ. / под общ. ред. Н. М. Галдина. М.: Машиностроение, 1989. 528 с.
15. Белкин, П. Н. Особенности распределения тепловых потоков в системе анод – парогазовая оболочка при анодном электролитном нагреве / П. Н. Белкин, Т. Л. Мухачева, И. Г. Дьяков // ИФЖ. 2008. Т. 71, № 6. С. 1027–1033.
16. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов: в 2 т. / И. В. Суминов [и др.]; под общ. ред. И. В. Суминова. М.: Техносфера, 2011. Т. I. 464 с.
2. Rosenberg S. E., Susin A. A. (1997) *Defects in the Structure of Diffusion-Strengthened Products*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ. 223 (in Russian).
3. Toryannikov A. Yu., Baryshnikov A. A. (2021) Comparative Analysis of High-Energy Methods for Surface Hardening of Steel. *Molodoy Uchonyi* [Young Scientist], (19), 45–49 (in Russian).
4. Yerokhin A. L., Nie X., Leyland A., Matthews A., Doney S. J. (1999) Plasma Electrolysis for Surface Engineering. *Surface and Coatings Technology*, 122 (2–3), 73–93. [https://doi.org/10.1016/s0257-8972\(99\)00441-7](https://doi.org/10.1016/s0257-8972(99)00441-7).
5. Gonchar V. I., Tovarkov A. K. (1991) Formation of A Vapor Shell When Current Passes through An Electrolyte. *Elektonnaya Obrabotka Materialov = Electronic Processing of Materials*, (1), 49–52 (in Russian).
6. Shiryayeva S. O., Grigoriev A. I., Morozov V. V. (2003) On the appearance of ions near the charged surface of an intensely evaporating electrolyte. *Technical Physics*, 48(7), 822–828. <https://doi.org/10.1134/1.1593186>.
7. Kulikov I. S., Vashchenko S. V., Kamenev A. Ya. (2010) *Electrolyte-Plasma Processing of Materials*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ. 232 (in Russian).
8. Korolyov A., Bubulis A., Vėžys J., Aliakseyeu Yu., Minchenya V., Niss V., Markin D. (2021) Electrolytic Plasma Polishing of NiTi Alloy. *Mathematical Models in Engineering*, 7 (4), 70–80. <https://doi.org/10.21595/mme.2021.22351>.
9. Aliakseyeu Y., Bubulis A., Korolyov A., Niss V. Kandrotaitė Janutienė R. (2021) Plasma Electrolyte Polishing of Titanium and Niobium Alloys in Low Concentrated Salt Solution Based Electrolyte, *Mechanics*, 27 (1), 88–93. <http://doi.org/10.5755/j02.mech.25044>.
10. Korolyov A. Yu., Aliakseyeu Yu. G., Niss V. S., Parshuto A. E. (2021) Electrolyte-Plasma Treatment in Controlled Pulse Modes. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 20 (4), 279–286. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-279-286>(in Russian).
11. Alekseev Yu. G., Niss V. S., Korolyov A. Yu., Parshuta A. E. (2013) Peculiar Features of Electrolytic-Plasma Heating during Electrochemical Heat-Treatment of Steel. *Nauka i Tehnika = Science and Technique*, (6), 20–23 (in Russian).
12. Belkin P. N., Kusmanov S. A., Parfenov E. V. (2020). Mechanism and Technological Opportunity of Plasma Electrolytic Polishing of Metals and Alloys Surfaces. *Applied Surface Science Advances*, 1, 100016. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2020.100016>.
13. Belkin P. N. (2010) Anodic Electrochemical-Thermal Modification of Metals and Alloys. *Elektonnaya Obrabotka Materialov = Electronic Processing of Materials*, (6), 29–41 (in Russian).
14. Galdin N. M., Chernega D. F., Ivanchuk D. F., Moiseyev Yu. V., Chistyakov V. V. (1989) *Non-Ferrous Casting*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 528 (in Russian).
15. Belkin P. N., Mukhacheva T. L., D'yakov I. G. (2008). Features of the Distribution of Heat Fluxes in the Anode – Vapor-Gas Sheath System in Anodic Electrolytic Heating. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 81 (6), 1069–1075. <https://doi.org/10.1007/s10891-009-0151-7>.
16. Suminov I. V., Belkin P. N., Epelfeld A. V., Lyudin V. B., Krit B. L., Borisov A. M. (2011) *Plasma-Electrolytic Modification of the Surface of Metals and Alloys. Vol. I*. Moscow, Tekhnosfera Publ. 464 (in Russian).

Received: 12.03.2024

Accepted: 21.05.2024

Published online: 29.11.2024

REFERENCES