

DOI: 10.18721/JEST.240109
УДК 621.762

С.А. Котов, Л.П. Батурова, А.Н. Бурлова, Е.Д. Зверева

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

ВЛИЯНИЕ МЕТОДА МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ НА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТИТАНА

Титан обладает уникальным сочетанием высокой коррозионной стойкости и высокой удельной прочности, благодаря чему нашел широкое применение в областях, где требуется долговечность и надежность оборудования. Однако во многих условиях эксплуатации ему требуется защита от коррозии в агрессивных средах. Для этого применяют различные методы модификации поверхности титана и его сплавов. В работе сравнивались два метода модификации: анодное оксидирование и лазерная обработка. С помощью оксидирования на поверхности титана формируется инертное покрытие, снижающее выход легирующих компонентов. При лазерной обработке получается развитый рельеф поверхности, повышается микротвердость и образуется защитный оксидный слой. Показано, что лазерная обработка эффективнее повышает коррозионную стойкость титана и его сплавов в агрессивных средах.

КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ТИТАНА; МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ; ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА; АНОДНОЕ ОКСИДИРОВАНИЕ; ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ТИТАНА В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ.

Ссылка при цитировании:

С.А. Котов, Л.П. Батурова, А.Н. Бурлова, Е.Д. Зверева. Влияние метода модификации поверхности на электрохимические свойства титана // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 1. С. 95–104.
DOI: 10.18721/JEST.240109.

S.A. Kotov, L.P. Batureva, A.N. Burlova, E.D. Zvereva

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

INFLUENCE OF THE METHOD OF SURFACE MODIFICATION ON THE ELECTROCHEMICAL PROPERTIES OF TITANIUM

Titanium possess a unique combination of high resistance to corrosion and high specific strength, which is why it has found wide application in fields where durability and reliability of equipment is required. However, in many operating conditions, it requires corrosion protection in aggressive substances. Various methods of modifying the surface of titanium and its alloys are employed for this purpose. The paper compares two methods of modification: anode oxidation and laser treatment. Oxidation forms inert coating, which reduces the output of alloying components, on the surface of titanium. Laser treatment produces a developed surface relief, increases microhardness and forms a protective oxide layer. We have found that laser treatment is more effective in increasing the corrosion resistance of titanium and its alloys.

RESISTANCE TO CORROSION OF TITANIUM; SURFACE MODIFICATION; LASER PROCESSING; ANODIC OXIDATION; ELECTROCHEMICAL BEHAVIOR OF TITANIUM IN VARIOUS SUBSTANCES.

Citation:

С.А. Котов, Л.П. Батурова, А.Н. Бурлова, Е.Д. Зверева. Influence of the method of surface modification on the electrochemical properties of titanium, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(01)(2018) 95–104, DOI: 10.18721/JEST.240109.

Широкое промышленное применение титана и его сплавов определяется как уникальными физико-химическими свойствами, так и технологичностью обработки. Благодаря своим свойствам титан применяется в военной промышленности, ракетостроении и космической технике, судостроении. Титан и его сплавы находят все большее применение и в других областях: машиностроении, химической и пищевой промышленности, медицине. Однако основные перспективы применения связаны с титаном как конструкционным материалом. Использование титана позволяет повысить долговечность и надежность оборудования.

Титан – химически активный металл, но в то же время является одним из немногих металлов с исключительно высокой коррозионной стойкостью: практически вечен в атмосфере воздуха, в холодной и кипящей воде, весьма стоек в морской воде и растворах многих солей. Благодаря такой коррозионной стойкости и высоким значениям удельной прочности титановых сплавов их применяют на объектах мировой тепловой и атомной энергетики. По коррозионной устойчивости титан превосходит в большинстве случаев высоколегированные кислотоустойчивые стали [1–4].

Высокая коррозионная стойкость титана обусловлена образованием на его поверхности инертной хорошо срастающейся с металлом очень тонкой пленки диоксида титана. Металл ею «пассивируется», т.е. защищает сам себя от дальнейшего разрушения. В некоторых агрессивных средах титан начинает разрушаться. Существуют различные способы защиты, одним из которых является модификация поверхности [5, 6].

Эффективным способом формирования на различных металлах и сплавах инертных оксидных покрытий, снижающих выход легирующих компонентов, служит термическое оксидирование в реактивных газовых средах [7–9]. Виды оксидирования: анодное, воздушно-термическое, паротермическое и аргонокислородное.

Анодное оксидирование осуществляется в электролитах при подаче тока. Создаваемое покрытие обладает высокими показателями шероховатости, благоприятным составом инертных оксидов титана и хорошими защитными свойствами.

Метод паротермического оксидирования основан на воздействии перегретого водяного пара на металл. Исследования покрытий, полученных данным методом, показали, что они обладают большим количеством открытых пор различного размера и высокой шероховатостью поверхности. Образуется трещиноватая поверхность, однако коррозионные свойства таких покрытий удовлетворительны.

Метод аргонокислородного оксидирования представляет собой высокотемпературное воздействие смеси аргона и кислорода на титан для избежания образования малопрочных и некоррозионностойких титанонитридных и прочих соединений, ухудшающих свойства покрытия.

Формирование оксидного покрытия при воздушно-термическом методе происходит за счет нагрева фиксаторов в электропечи с воздушной атмосферой и определенной температурой. При этом оксидирование поверхности повышает трибологические свойства титана, склонность которого к налипанию и задиркам обусловлена высоким коэффициентом трения [10].*

Другой возможный способ модификации поверхности – лазерная обработка [11–13]. При этом виде обработки луч лазера воздействует на поверхности, приводя к ее нагреву, плавлению и испарению титана. Перемещая луч по поверхности, можно получить развитый рельеф поверхности. Лазерная обработка позволяет повысить микротвердость и стойкость к коррозии за счет образования оксидного слоя. Увеличение твердости поверхностного слоя осуществляется за счет упрочняющего воздействия обработки и придания микро- и нанометровых показателей морфологии поверхности [14–16]. Меняя режимы обработки, можно получить поверхность с требуемыми показателями: диаметром пор и размером шероховатости. Преимущества лазерной обработки в том, что метод не требует расходных материалов, а получаемая поверхность характеризуется высокой чистотой и не со-

* Патент RG 12-487. Способ модификации поверхности титана / Коршунов Л.Г., Черненко Н.Л., Пущин В.Г. 2014. 4 с.



держит остатков кислот или абразивных частиц [17]. Импульсная лазерная обработка поверхности способствует упрочнению конструкции и повышению ее функциональных свойств.

Целью нашей работы было исследование электрохимического поведения титана с модифицированной поверхностью в агрессивной среде.

Материал и методика исследования

Для изучения электрохимического поведения титана в различных средах снимали анодные потенциодинамические поляризационные кривые, используя универсальный потенциостат-гальваностат IPC-Pro M фирмы «Volta» с компьютерной системой регистрации и обработки данных в режиме «программатора».

Лазерная обработка титановой пластины осуществлялась на волоконном иттербииевом лазере (длина волны – 1,07 мкм; модель ЛС-16 IPG, фокусное расстояние линзы 500 мм; расстояние между линзой и поверхностью 705 мм; $D_{пла}$ = 14 мм; толщина пластины – 0,5 мм). Обработка производилась расфокусированным лучом без защиты аргоном. Для исследования кривой был выбран один образец, обработанный при следующем режи-

ме: мощность – 0,8 кВт, скорость – 15 м/с, результат – оксидная пленка. Поверхность титанового образца после лазерной обработки представлена на рис. 1.

Электрохимическое оксидирование титановых пластин проводили в 15 %-м растворе H_2SO_4 при различных потенциалах с целью получения оксидных пленок, имеющих различную микроструктуру поверхностного слоя, толщину и цвет.

Для оксидирования использовали пластинки титана толщиной 0,5 мм размером 10×40 мм. Оксидирование проводили, осуществляя в течение 20 с анодную поляризацию пластин титана при следующих потенциалах: 1,3; 1,5; 1,8; 2,3; 2,8 В.

На рис. 2 представлено изображение окрашенных пластин титана при различных потенциалах поляризации. Видно, что в исследуемом интервале потенциалов пластины титана окрашиваются в различные цвета в зависимости от потенциала поляризации: от золотистого при потенциале 1,30 до голубого при потенциале 2,50 В. По мере утолщения оксидной пленки цвет ее изменяется в следующей последовательности: золотистый – темно-коричневый – фиолетовый – синий – голубой. При этом толщина пленки меняется от 9,5–12,5 нм до 160–300 нм.



Рис. 1. Поверхность титана после лазерной обработки
Fig. 1. Titanium surface after laser treatment

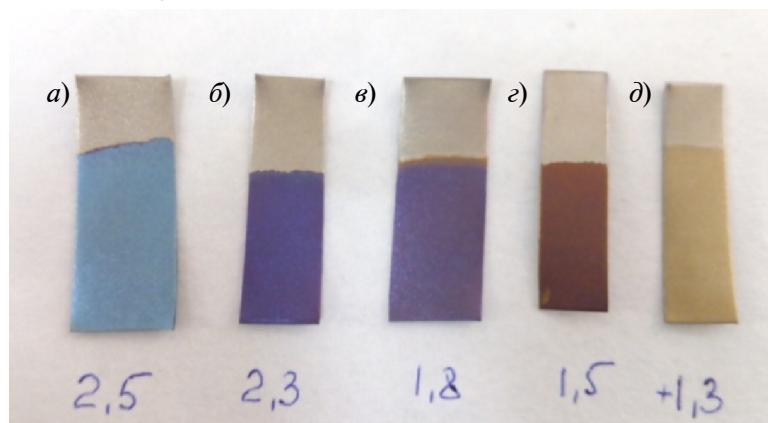


Рис. 2. Изображение пластин титана после поляризации в 15 %-ном растворе H_2SO_4 при различных потенциалах, В: а – 2,50; б – 2,30; в – 1,80; г – 1,50; д – 1,30
Fig. 2. Titanium plates after polarization in 15 %- H_2SO_4 solution at various potentials:
a – 2,50; б – 2,30; в – 1,80; г – 1,50; д – 1,30 V

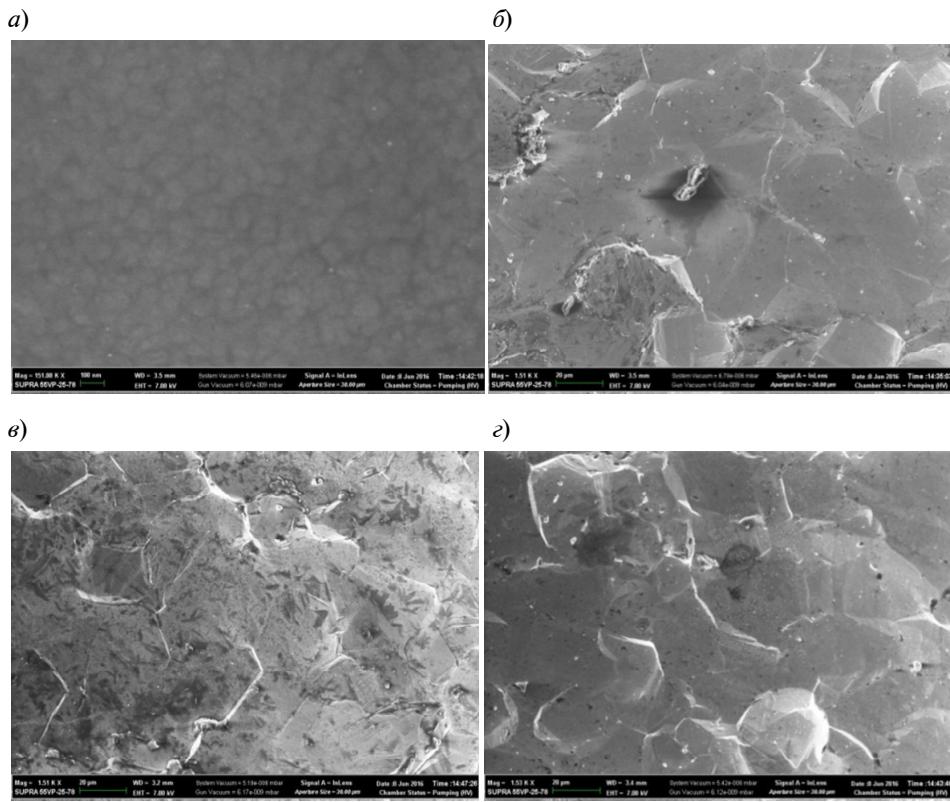


Рис. 3. РЭМ-изображения поверхности титана после окрашивания при различных потенциалах: *а* – 2500, *б* – 2300, *в* – 1800, *г* – 1300 мВ
Fig. 3. SEM-Images of titanium surface after painting at various potentials:
a – 2500, *b* – 2300, *c* – 1800, *d* – 1300 mV

На рис. 3 представлены РЭМ-изображения поверхности титана после оксидирования в 15 %-м растворе H_2SO_4 при различных потенциалах.

Видно, что изменение потенциала поляризации в интервале от 1,30 до 2,3 В практически не влияет на микроструктуру оксидного слоя. При потенциале 2,5 В структура поверхностного оксидного слоя становится более мелкокристаллической.

Полученные данные о весовом составе (в %) поверхностного слоя оксидированного титана при разных конечных потенциалах поляризации следующие:

| | |
|---|-------|
| <i>при потенциале 2,5 В (спектр 83)</i> | |
| O..... | 18,02 |
| Na..... | 0,19 |
| Al..... | 0,23 |
| Cl..... | 0,07 |
| K..... | 0,13 |
| Ca..... | 0,28 |

| | |
|---|--------|
| Ti | 81,08 |
| Сумма | 100,00 |
| <i>при потенциале 1,8 В (спектр 84)</i> | |
| O..... | 13,87 |
| Al..... | 0,25 |
| Si | 0,12 |
| Ca..... | 0,10 |
| Ti..... | 85,66 |
| Сумма | 100,00 |
| <i>при потенциале 1,3 В (спектр 85)</i> | |
| O..... | 8,52 |
| Al..... | 0,36 |
| Si | 0,11 |
| K..... | 0,06 |
| Ti..... | 90,89 |
| Сумма | 100,00 |

По мере увеличения потенциала поляризации соотношение титан/кислород (Ti/O) в оксиде изменяется от 10:1 при потенциале 1,3 В до 4:1 при потенциале 2,5 В. Это указывает на то, что при более поло-



жительном потенциале формируются оксидные слои с более высокой степенью окисленности.

Для исследования электрохимического поведения оксионированных образцов титана были выбраны:

образцы, имеющие крупнокристаллическую структуру поверхностного слоя (рис. 2.7, б) и окрашенные в фиолетовый цвет при потенциале 1,8 В;

образцы, имеющие мелкокристаллическую структуру поверхностного слоя (рис. 2.7, а) и окрашенные в синий цвет при потенциале 2,5 В.

Известно, что в нейтральных и кислых растворах, кроме HF и HBr, титан находится в устойчивом пассивном состоянии. В соответствии с этим в работе проведено исследование электрохимического поведения титана BT1-0 в нейтральных сульфатных растворах (раствор 1), в растворах, содержащих агрессивные ионы – хлорид-ионы (раствор 2) и фторид-ионы (слабокислый раствор – раствор 3). Состав растворов:

0,1Н Na₂SO₄ (раствор 1);

0,1Н Na₂SO₄ + 0,1Н NaCl (раствор 2);
0,1Н Na₂SO₄ + 0,5Н NaF – добавка HF до pH=3 (раствор 3).

Результаты исследования представлены на рис. 4.

Анодная потенциодинамическая поляризационная кривая, полученная на титане в сульфатном растворе, представлена на рис. 4 (кривая 1). Стационарный потенциал Ti в 0,1 Н растворе Na₂SO₄ равен $E = -350$ мВ. Как видно, в чисто сульфатном растворе титан находится в устойчивом пассивном состоянии в широком интервале потенциалов, а на поляризационной кривой отсутствует область активного растворения. При потенциале $E = 1600$ мВ на кривой наблюдается рост анодного тока.

На рис. 4 представлена анодная потенциодинамическая поляризационная кривая (2), полученная на титане в растворе 0,1 Н Na₂SO₄+0,1 Н NaCl. Как видно из рис. 4, в сульфатно-хлоридных растворах титан также находится в устойчивом пассивном состоянии. Стационарный потенциал равен $E = -0,45$ В.

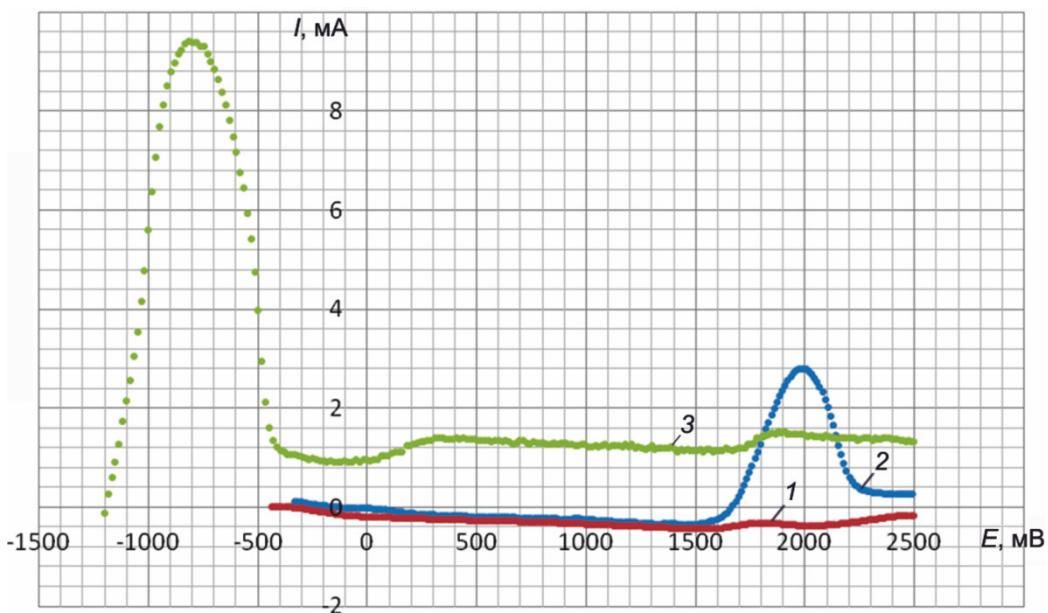


Рис. 4. Анодные потенциодинамические поляризационные кривые, полученные на титане BT 1-0 в средах, содержащих: 0,1 Н раствора Na₂SO₄ (1); 0,1 Н Na₂SO₄+0,1 Н NaCl (2); 0,1 Н Na₂SO₄ + 0,5 Н NaF (pH=3) (3)

Fig. 4. Anodic potentiodynamic polarizing curves obtained on titanium in environments containing: 0,1 N solution Na₂SO₄ (1); 0,1 N Na₂SO₄ + 0,1 N NaCl (2); 0,1 N Na₂SO₄ + 0,5 N NaF (pH = 3) (3)

Анодная потенциодинамическая поляризационная кривая, полученная на титане в растворе 0,1 н $\text{Na}_2\text{SO}_4 + 0,5$ н NaF ($pH=3$) также представлена на рис. 4 (кривая 3). Как видно, добавка фторид-ионов F^- в сульфатный раствор приводит к смещению стационарного потенциала в отрицательную сторону на ~ 700 мВ и составляет $E = -1157$ мВ. Снятие анодных поляризационных кривых в смешанном сульфатно-фторидном растворе показало, что при сдвиге потенциала в отрицательную сторону на поляризационной кривой появляется область активного растворения. При потенциале $E = -800$ мВ и положительнее на поляризационной кривой наблюдается уменьшение анодных токов (область перехода титана в пассивное состояние).

Таким образом, на основе полученных результатов из исследуемых растворов для электрохимических испытаний титана с модифицированной поверхностью был выбран смешанный сульфатно-фторидный раствор состава 0,1 н $\text{Na}_2\text{SO}_4 + 0,5$ н NaF ($pH=3$).

Исследование влияния предварительной обработки поверхности титана BT1-0 на скорость его растворения проводили в смешанном сульфатно-фторидном растворе.

На рис. 5 представлены анодные потенциодинамические поляризационные кривые, полученные на титане с различной модифицированной поверхностью — оксидированные при потенциалах 1,3 В (кривая 2) и 2,5 В (кривая 3) и с лазерной обработкой поверхности (кривая 4). Для сравнения представлена анодная потенциодинамическая поляризационная кривая (1), полученная на титане без обработки (в исходном состоянии).

На рис. 5 видно, что в результате оксидирования и лазерной обработки на поверхности титана формируются оксидные слои с высокими защитными свойствами. В обоих случаях титан с модифицированным поверхностным слоем в смешанном сульфатно-фторидном растворе находится в устойчивом пассивном состоянии. Стационарный потенциал титана после обработок смещается в положительную сторону на ~ 700 мВ при лазерной обработке и составляет -490 мВ, после оксидирования на ~ 1000 мВ и составляет -190 мВ. На поляризационных кривых, полученных в смешанном сульфатно-фторидном растворе, отсутствует область активного растворения (рис. 5, кривые 2–4).

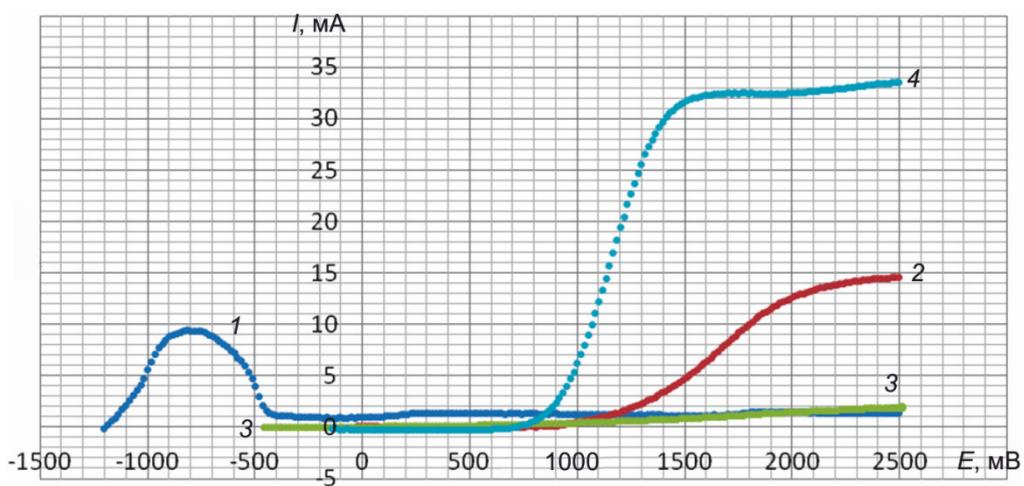


Рис. 5. Анодные потенциодинамические поляризационные кривые, полученные в сульфатно-фторидном растворе: 1 — титан в исходном состоянии; 2 — титан, оксидированный в 15 % растворе H_2SO_4 ; 3 — титан с лазерной обработкой поверхности; 4 — оксидированный титан, окрашенный в синий цвет в условиях катодной поляризации

Fig. 5. Anodic potentiodynamic polarizing curve obtained in sulfate-fluoride solution on samples:
1 — Titan in its original state; 2 — is oxidized in the 15 % solution of H_2SO_4 Titan; 3 — Titan with laser surface treatment; 4 — oxidized titanium, painted in blue color in the conditions of cathodic polarization



Титан после лазерной обработки поверхности находится в пассивном состоянии в широком интервале потенциалов, вплоть до потенциала 2,5 В. Это свидетельствует, что при такой обработке формируются бездефектные, плохо проводящие ионы и электроны оксидные слои с высокими защитными свойствами.

На поляризационных кривых, полученных на оксидированном при потенциалах 1,3 и 2,3 В титане, окрашенном соответственно в фиолетовый и синий цвета, при потенциалах ~0,8 и ~1,1 В наблюдается рост тока, переходящий при более положительных потенциалах в предельное значение. Рост тока связан с началом процесса выделения кислорода. При этом предельное значение тока на титане, оксидированном при потенциале 2,5 В и окрашенном в синий цвет, примерно в 2 раза больше, чем предельное значение тока на титане, оксидированном при потенциале 1,3 В и окрашенном в фиолетовый цвет (соответственно 32 и 15 мА).

При оксидировании титана на поверхности образуются более дефектные оксидные пленки, чем при лазерной обработке, причем степень дефектности оксидной пленки возрастает с увеличением потенциала оксидирования.

Следует отметить, что анодные потенциодинамические поляризационные кривые, полученные в смешанном сульфатно-фторидном растворе (раствор 2) на электродах, изготовленных из порошков титана, аналогичны поляризационным кривым, полученным на титане с лазерной обработкой.

Заключение

Экспериментально показано, что модификация поверхности титана и его сплавов эффективно повышает коррозионную стойкость титановых изделий в различных средах, что свидетельствует о целесообразности проведения этой дополнительной технологической операции.

По результатам предварительных электрохимических испытаний для оценки эффективности модификации поверхности титановых сплавов был выбран смешанный сульфатно-фторидный раствор.

Результаты электрохимических испытаний титановых сплавов показали, что лазерное модификация поверхности в наибольшей степени повышает их антикоррозионные свойства. При оксидировании титана на поверхности образуются более дефектные оксидные пленки, причем степень дефектности растет с увеличением потенциала оксидирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рачев Х., Стефанова С. Справочник по коррозии: Пер. с болгарского / Пер. С.И. Нейковского; под ред. Н.И. Исаева. М.: Мир, 1982. 520 с.
2. Анастасиади Г.П., Кондратьев С.Ю., Рудской А.И. Избирательное высокотемпературное окисление фаз в литом жаропрочном сплаве системы 25Cr – 35Ni – Si – Nb – C // Металловедение и термическая обработка металлов. 2014. № 8 (710). С. 3–8.
3. Анастасиади Г.П., Кокорина А.В., Кондратьев С.Ю. Исследование процесса окисления жаропрочного жаростойкого сплава Fe-25Cr-35Ni-0,45C-Si-Nb // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2014. № 3 (202). С. 161–169.
4. Кондратьев С.Ю., Анастасиади Г.П., Рудской А.И. Наноструктурный механизм образования оксидной пленки в жаростойких сплавах на основе Fe – 25Cr – 35Ni // Металловедение и термическая обработка металлов. 2014. № 8 (710). С. 3–8.
5. Медведецкий В.М., Попов В.О., Кондратьев С.Ю. Лазерное упрочнение резьбовых соединений // РИТМ: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. 2012. № 4 (72). С. 108–110.
6. Кондратьев С.Ю., Вайнерман А.Е., Попов В.О. Лазерное модифицирование поверхности сталей и сплавов // РИТМ: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. 2013. № 7 (85). С. 28–31.
7. Мальчишина А.И. Биосовместимые покрытия и материалы // Материалы II Всероссийской заочной научной конференции для молодых ученых, студентов и школьников «Актуальные вопросы «биомедицинской инженерии»: электронное науч. издание. СПб.: ФГУП НТЦ «Информрегистр», 2012. С. 83–89.

8. Попов В.О., Кондратьев С.Ю. Упрочнение титановых сплавов методом лазерного оксидирования // РИТМ: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. 2013. № 4 (82). С. 106–110.
9. Попов В.О., Смирнов С.Н., Кондратьев С.Ю. Лазерное легирование деталей из сталей и сплавов // РИТМ: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. 2013. № 9 (87). С. 32–36.
10. Мирзоев Р.А., Давыдов А.Д. Анодные процессы электрохимической и химической обработки металлов. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 382 с.
11. Попов В.О., Кондратьев С.Ю. Лазерное упрочнение труб // РИТМ: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. 2014. № 5 (93). С. 84–86.
12. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А. Новый подход к синтезу порошковых и композиционных материалов электронным лучом. Часть 1. Технологические особенности процесса // Металловедение и термическая обработка металлов. 2016. № 1 (727). С. 30–35.
13. Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А. Новый подход к синтезу порошковых и композиционных материалов электронным лучом. Часть 2. Практические результаты на примере сплава ВТ6 // Металловедение и термическая обработка металлов. 2016. № 3 (729). С. 40–44.
14. Соколов Ю.А., Павлушкин Н.В., Кондратьев С.Ю. Новые аддитивные технологии с использованием пучка ионов // Вестник машиностроения. 2016. № 9. С. 72–76.
15. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А., Копаев В.Н. Особенности моделирования процесса послойного синтеза изделий электронным лучом // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. Вып. 11. С. 91–96.
16. Лясников В.Н., Телегин С.В. Импульсная лазерная обработка поверхности титана // Материалы II Всероссийской заочной научной конференции для молодых ученых, студентов и школьников «Актуальные вопросы «биомедицинской инженерии»: электронное научн. издание. СПб.: ФГУП НТЦ «Информрегистр», 2012. С. 74–78.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОТОВ Сергей Анатольевич – кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
E-mail: Serkotov51@mail.ru

БАТУРОВА Людмила Петровна – кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
E-mail: baturova_lp@mail.ru

БУРЛОВА Анна Николаевна – студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
E-mail: an.burlova@mail.ru

ЗВЕРЕВА Екатерина Дмитриевна – студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
E-mail: EkatZvereff@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 25.01.2018

REFERENCES

- [1] Rachev Kh., Stefanova S. Spravochnik po korrozii: Per. s bolgarskogo / Per. S.I. Neikovskogo; pod red. N.I. Isaeva. M.: Mir, 1982. 520 s. (rus.)
- [2] Anastasiadi G.P., Kondrat'ev S.Iu., Rudskoi A.I. Izbiratel'noe vysokotemperaturnoe okislenie faz v litom zharoprochnom splave sistemy 25Cr – 35Ni – Si – Nb – C. Metallovedenie i termicheskaiia obrabotka metallov. 2014. № 8 (710). S. 3–8. (rus.)
- [3] Anastasiadi G.P., Kokorina A.V., Kondrat'ev S.Iu. Issledovanie protsessa okisleniya zharoprochnogo zharostoikogo splava Fe-25Cr-35Ni-0,45C-Si-Nb. Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. 2014. № 3 (202). S. 161–169. (rus.)
- [4] Kondrat'ev S.Iu., Anastasiadi G.P., Rudskoi A.I. Nanostrukturnyi mekhanizm obrazovaniia oksidnoi plenki v zharostoikikh splavakh na osnove Fe – 25Cr – 35Ni. Metallovedenie i termicheskaiia obrabotka metallov. 2014. № 10 (712). S. 15–20. (rus.)
- [5] Medvetskii V.M., Popov V.O., Kondrat'ev S.Iu. Lazernoe uprochnenie rez'bovykh soedinenii. RITM: Remont. Innovatsii. Tekhnologii. Modernizatsiia. 2012. № 4 (72). S. 108–110. (rus.)
- [6] Kondrat'ev S.Iu., Vainerman A.E., Popov V.O. Lazernoe modifitsirovanie poverkhnosti stalei i splavov. RITM: Remont. Innovatsii. Tekhnologii. Modernizatsiia. 2013. № 7 (85). S. 28–31. (rus.)



- [7] **Mal'chikhina A.I.** Biosovmestimye pokrytiia i materialy. *Materialy II Vserossiiskoi zaochnoi nauchnoi konferentsii dlia molodykh uchenykh, studentov i shkol'nikov «Aktual'nye voprosy «biomeditsinskoi inzhenerii»: elektronnoe nauchn. izdanie*. SPb.: FGUP NTTs «Informregistr», 2012. S. 83–89. (rus.)
- [8] **Popov V.O., Kondrat'ev S.Iu.** Uprochnenie titanovykh splavov metodom lazernogo oksidirovaniia. *RITM: Remont. Innovatsii. Tekhnologii. Modernizatsiia*. 2013. № 4 (82). S. 106–110. (rus.)
- [9] **Popov V.O., Smirnov S.N., Kondrat'ev S.Iu.** Lazernoe legirovanie detalei iz stalei i splavov. *RITM: Remont. Innovatsii. Tekhnologii. Modernizatsiia*. 2013. № 9 (87). S. 32–36.
- [10] **Mirzoev R.A., Davydov A.D.** Anodnye protsessy elektrokhimicheskoi i khimicheskoi obrabotki metallov. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2013. 382 s. (rus.)
- [11] **Popov V.O., Kondrat'ev S.Iu.** Lazernoe uprochnenie trub. *RITM: Remont. Innovatsii. Tekhnologii. Modernizatsiia*. 2014. № 5 (93). S. 84–86. (rus.)
- [12] **Rudskoi A.I., Kondrat'ev S.Iu., Sokolov Iu.A.** Novyi podkhod k sintezu poroshkovykh i kompozitsionnykh materialov elektronnym luchom. Chast' 2. Prakticheskie rezul'taty na primere splava VT6. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 2016. № 3 (729). S. 40–44. (rus.)
- [13] **Sokolov Iu.A., Pavlushin N.V., Kondrat'ev S.Iu.** Novye additivnye tekhnologii s ispol'zovaniem puchka ionov. *Vestnik mashinostroeniia*. 2016. № 9. S. 72–76. (rus.)
- [14] **Rudskoi A.I., Kondrat'ev S.Iu., Sokolov Iu.A., Kopaev V.N.** Osobennosti modelirovaniia protsessa posloinogo sinteza izdelii elektronnym luchom. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2015. T. 85. Vyp. 11. S. 91–96. (rus.)
- [15] **Liasnikov V.N., Telegin S.V.** Impul'snaia lazernaiia obrabotka poverkhnosti titana. *Materialy II Vserossiiskoi zaochnoi nauchnoi konferentsii dlia molodykh uchenykh, studentov i shkol'nikov «Aktual'nye voprosy «biomeditsinskoi inzhenerii»: elektronnoe nauchn. izdanie*. SPb.: FGUP NTTs «Informregistr», 2012. S. 74–78. (rus.)

AUTHORS

- KOTOV Sergei A.** – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university
E-mail: Serkotov51@mail.ru
- BATUROVA Liudmila P.** – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university
E-mail: baturova_lp@mail.ru
- BURLOVA Anna N.** – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university
E-mail: an.burlova@mail.ru
- ZVEREVA Ekaterina D.** – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university
E-mail: EkatZvereff@mail.ru

Received: 25.01.2018