

УДК 621.7

ЛАЗЕРНАЯ МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНА: ТЕХНОЛОГИЯ, СВОЙСТВА, ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ

© 2019 г. С. В. Телегин¹, А. В. Лясникова¹, О. А. Дударева¹, И. П. Гришина¹,
О. А. Маркелова¹, *, **, В. Н. Лясников¹

¹Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054 Саратов, Россия

*E-mail: markelovaoa@bk.ru

**E-mail: kafbma2011@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.04.2018 г.

После доработки 14.06.2018 г.

Принята к публикации 14.06.2018 г.

Проведены исследования морфологии поверхности титанового сплава ВТ1-00 после импульсной лазерной обработки. Выявлена зависимость морфологии поверхностного слоя титана от режимов технологического процесса модификации с помощью лазерного излучения. Варьирование технологических параметров процесса, таких как напряжения лампы накачки, длительности и частоты следования импульсов, а также числа импульсов в пятне облучения, позволяет регулировать тепловое воздействие, влияющее на формирование субмикрометровых показателей металлокерамических пленок и покрытий. Установлено влияние режимов обработки на показатели морфологической гетерогенности поверхности. Показана возможность изменять морфологию поверхности под конкретно поставленную задачу.

Ключевые слова: функциональные покрытия, лазерная обработка, модификация титана, плазменное напыление.

DOI: 10.1134/S020735281903017X

ВВЕДЕНИЕ

В современном производстве актуальной задачей является повышение физико-механических характеристик изделий с покрытиями. Одна из самых важных характеристик покрытий – их адгезия, которая во многом определяется свойствами подложки [1]. В различных отраслях машиностроения и приборостроения, а также медицины давно и успешно применяют титан и его сплавы [2, 3]. Нередко на титановые изделия наносят покрытия, используя различные технологии для придания им особых физико-химических свойств, в том числе плазменное напыление [3, 4].

Для улучшения физико-механических характеристик плазменных покрытий на титановых изделиях предлагается проводить предварительную упрочняющую лазерную обработку поверхности с одновременным формированием металлокерамических оксидных покрытий требуемой морфологии [4–10]. Такая подготовка поверхности позволит исключить из технологического процесса воздушно-абразивную обработку электрокорундом, которая зачастую приводит к загрязнению поверхности, а также заменить плазменное напыление титанового подслоя.

Целью настоящей работы было исследование возможности применения лазерного излучения в комбинации с плазменным напылением для получения адгезионнопрочных покрытий на поверхности изделий различного назначения, позволяющего исключить из технологического процесса воздушно-абразивную обработку электрокорундом, а также электроплазменное напыление титанового подслоя. Таким образом, для улучшения физико-механических характеристик покрытий предлагается проводить предварительную упрочняющую лазерную обработку поверхности титана с одновременным формированием металлокерамических оксидных покрытий требуемой морфологии и последующим плазменным напылением функциональных покрытий [4, 5].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили на плоских образцах размером $10 \times 10 \times 2$ мм из технически чистого титана марки ВТ1-00. Перед лазерной модификацией поверхности титана образцы очищали и обезжиривали с использованием установки ультразвуковой обработки “УЗУМИ-2” при частоте 18 кГц в этиловом спирте в течение 5 мин. Поверх-

Таблица 1. Варьирование технологических параметров лазерной модификации

Технологические параметры	Диапазон
Напряжение лампы накачки U , В	250–450
Длительность импульса τ , мс	3–10
Частота следования импульсов f , Гц	1–5
Число импульсов в пятне облучения, шт.	1–5

ность экспериментальных образцов подвергалась импульсной лазерной обработке на Nd : YAG-лазерном технологическом комплексе LRS-50 (длина волны 1.064 мкм) в воздушной среде. Режимы лазерной обработки сведены в табл. 1. Модификацию образцов осуществляли без оплавления и с оплавлением поверхности титановой основы.

Различные сочетания параметров технологического процесса лазерной обработки (плотности мощности и плотности энергии) приводят к различному энергетическому воздействию на поверхность титана. Измерение и контроль данных параметров осуществляли с помощью специального измерителя Laserstar Ophir. Плотность энергии лазерного излучения Q на поверхности образцов при различных вариантах сочетания режимов обработки изменялась от 0.2×10^7 до 4×10^7 Дж/м².

При лазерной обработке единичным импульсом зона термического влияния имеет форму круга, а для обработки заданной площади поверхности необходимо использовать перекрытие точек. С целью формирования однородного по свойствам покрытия и обеспечения равномерной глубины модификации поверхности титана был использован коэффициент перекрытия $K_n = 0.5$.

Морфологическую гетерогенность поверхностного слоя и его структуру исследовали методами оптической микроскопии (металлографические микроскопы “МИМ-8М” и “МБС-10”), растровой электронной микроскопии (РЭМ) (микроскоп MIRA II LMU), профилометрии при исследовании основных параметров шероховато-

сти (профилограф-профилометр модели 170623). Изображения микроструктур анализировали с помощью комплекса АГПМ-6М. При исследовании толщины модифицированного слоя изготавливали микрошлифы в поперечном сечении.

Адгезионную прочность металлокерамических покрытий определяли методом испытания на сдвиг по ГОСТ 14759-69 на универсальной испытательной машине ИР 5082-100 при скорости перемещения рабочей траверсы 0.5 мм/мин. Для изучения адгезии образцы попарно склеивали покрытиями. В качестве клея использовали эпоксидную смолу ЭД-20 (ТУ 2252-003-62517430-01) с полиэтиленполиаминовым отвердителем, выдерживающую удельные нагрузки на разрыв 35–40 МПа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Морфологическая гетерогенность структуры покрытия зависит от режимов импульсной лазерной обработки и характеризуется в комплексе количеством элементов на поверхности в поле зрения микроскопа (выступами, углублениями и порами), их распределением по линейным размерам (среднему диаметру) и параметрами шероховатости микрорельефа (R_a, R_z, R_{max}, S_m ; ГОСТ 2789-73).

При лазерном воздействии без оплавления поверхностного слоя параметры морфологической гетерогенности обуславливаются качеством предварительной подготовки поверхности перед процессом обработки, так как на обрабатываемой поверхности формируются тонкие металлокерамические пленки, которые не оказывают сами по себе влияния на морфологию (рис. 1а). При лазерной модификации с плотностью энергии более 10^7 Дж/м² происходит оплавление поверхностного слоя, что позволяет улучшить основные комплексные характеристики морфологии поверхности: шероховатость, количество элементов на поверхности, их размер и распределение, пористость (рис. 1б). Использование плотности энергии свыше 4×10^7 Дж/м² приводит к разрушению сформированных покрытий за счет обра-

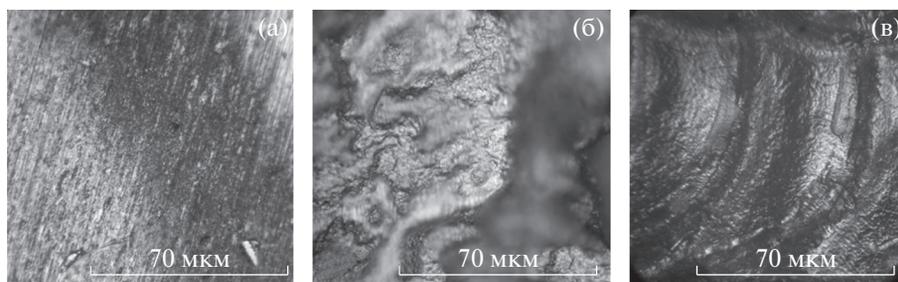


Рис. 1. Оптическая микроскопия модифицированных образцов, сформированных лазерным излучением в режиме: а – $U = 300$ В, $\tau = 8$ мс, $f = 1$ Гц, $N = 5$, $Q = 0.85 \times 10^7$ Дж/м²; б – $U = 400$ В, $\tau = 8$ мс, $f = 2$ Гц, $N = 5$, $Q = 3.3 \times 10^7$ Дж/м²; в – $U = 450$ В, $\tau = 8$ мс, $f = 1$ Гц, $N = 5$, $Q = 4.05 \times 10^7$ Дж/м².

зования трещин вследствие возникновения высоких внутренних напряжений (рис. 1в), а также, возможно, протекания процесса лазерной абляции.

Для реализации функциональных характеристик покрытий при нанесении необходимо учитывать их прочность сцепления с основой, т.е. адгезионную прочность. При послойном нанесении покрытия предшествующий слой будет выступать в качестве основы. Самым простым способом повышения адгезии покрытий является формирование более развитой морфологии поверхности. Чем более развитой будет морфология поверхности, тем больше будет площадь удельной поверхности и, как следствие, будет больше центров механического зацепления последующего покрытия, в рассматриваемом случае расплавленных частиц кальцийфосфатов при электроплазменном напылении.

Морфология поверхностного слоя зависит от энергетических параметров лазерной модификации, что подтверждается результатами РЭМ (рис. 2). Так, при обработке поверхностного слоя, которая приводит к его оплавлению, формируется более развитая морфология (рис. 2а). В ходе лазерной обработки помимо энергетического воздействия оказывается еще гидродинамическое воздействие светового потока, что приводит к “вспениванию” поверхностного слоя. На рис. 2б отчетливо видны вертикальные риски, оставленные после абразивной предварительной подготовки поверхности перед лазерной обработкой. Это подтверждает влияние качества предварительной подготовки поверхностного слоя при формировании металлокерамических покрытий без оплавления.

Увеличение длительности лазерного воздействия до 10 мс приводит к формированию на поверхностном слое большего количества выступов и углублений со средним размером 0.51–0.75 мкм (25 и 18% от общего числа соответственно). Повышение напряжения лампы накачки от 250 до 450 В приводит к увеличению энергетического воздействия на обрабатываемую поверхность, что оказывает влияние на морфологическую гетерогенность формируемых покрытий. При использовании напряжения свыше 350 В при обработке реализуются температурные поля на поверхности, которые приводят к оплавлению поверхностного слоя.

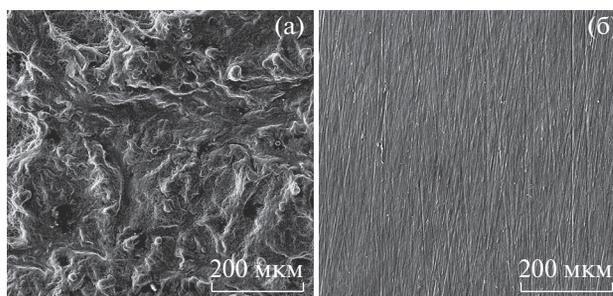


Рис. 2. РЭМ-изображения модифицированных образцов при различном энергетическом лазерном воздействии с плотностью энергии: а – 3.5×10^7 ; б – 1×10^7 Дж/м².

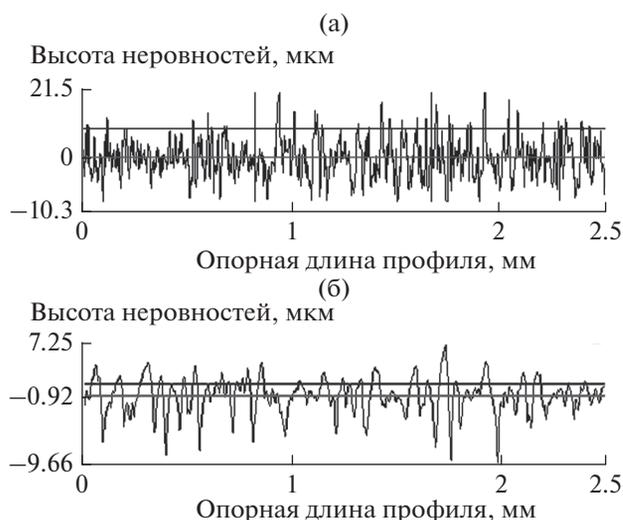


Рис. 3. Профилограмма исследуемых образцов: а – из компактного титана со слоем порошкового титана; б – после импульсной лазерной обработки, плотность энергии $Q = 3.5 \times 10^7$ Дж/м².

Установлено, что адгезия металлокерамических, морфологически гетерогенных оксидных покрытий, сформированных лазерным излучением на поверхности титана, составляет 25–32 МПа при максимальных энергетических воздействиях. Это характеризует необходимый уровень прочности сцепления покрытия с титановой основой.

В ходе сравнения параметров шероховатости покрытий, полученных электроплазменным на-

Таблица 2. Параметры шероховатости исследуемых образцов

№	Технология формирования покрытия	R_a , мкм	R_z , мкм	R_{max} , мкм	S_m , мкм
1	Электроплазменное напыление порошкового титана на компактный титан	4.02	029.4	32.3	69.6
2	Импульсная лазерная обработка компактного титана	3.95	21.2	29.01	91

пылением на образцы из компактного титана слоя порошкового титана (рис. 3а), и покрытий, сформированных при импульсной лазерной обработке (рис. 3б, табл. 2), можно сделать вывод, что при использовании последнего метода удается достичь аналогичных параметров шероховатости. При этом наблюдается и упрочняющий эффект, что позволит повысить физико-механические характеристики изделия в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный комплексный анализ морфологической гетерогенности модифицированных образцов показал зависимость морфологии поверхностного слоя титана от режимов технологического процесса модификации с помощью лазерного излучения. Варьирование технологических параметров процесса, таких как напряжения лампы накачки, длительности и частоты следования импульсов, а также числа импульсов в пятне облучения, позволяет регулировать тепловое воздействие, влияющее на формирование субмикрометровых показателей металлокерамических пленок и покрытий. Получена возможность изменять морфологию поверхности под конкретно поставленную задачу.

Изменение энергетического воздействия при лазерной обработке поверхности титана позволяет регулировать основные параметры шероховатости поверхности в широком диапазоне значений: R_a от 0.10 до 3.95 мкм, R_z от 0.46 до 21.2 мкм, R_{max} от 0.52 до 29.01 мкм и S_m от 8.5 до 91 мкм. Также существует возможность регулировать поверхностную пористость металлокерамических покрытий, которая варьируется от 20 до 61% со средним размером пор порядка 200 мкм. Сформированные покрытия обладают высокой адгезионной прочностью относительно титановой основы 25–32 МПа.

Резюмируя вышеизложенное, можно заключить, что лазерная модификация поверхности титана позволяет получать как адгезионнопрочные

металлокерамические покрытия с определенной пористостью, так и плазменные покрытия на основе различных порошковых материалов без применения воздушно-абразивной обработки и нанесения промежуточных слоев.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование в части разработки технологии плазменной обработки поверхности титана выполнено при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ (стипендии для молодых ученых и аспирантов № СП-5291.2018.4, № СП-5048.2018.4; грант № МД-1403.2017.8). Исследование в части проведения экспериментальных исследований шероховатости поверхности и оптической микроскопии поверхности после лазерной обработки выполнено при поддержке РФФИ (проект № 18-38-00677 мол_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кривобоков В.П., Соловьев А.А.* Плазменные покрытия (свойства и применение): учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политех. ун-та, 2011. 136 с.
2. *Бубнов В.А., Князев А.Н.* // Вестн. Курган. гос. ун-та. Сер. тех. науки. 2016. № 3(42). С. 92.
3. *Лясникова А.В., Дударева О.А.* Технология создания многофункциональных композиционных покрытий. М.: Спецкнига, 2012. 301 с.
4. *Телегин С.В., Лясников В.Н., Гоц И.Ю.* // Вестн. Саратов. гос. тех. ун-та. 2015. Т. 3. № 1(80). С. 101.
5. *Бекренев Л.Н., Морозова Е.А.* // Физика и химия обработки материалов. 1991. № 6. С. 117.
6. *Fomin A.A., Steinhauer A.B., Lyasnikov V.N. et al.* // Tech. Phys. Lett. 2012. V. 38. № 5. P. 481.
7. *Perez del Pino A., Fernandez-Pradas J.M., Serra P., Morenza J.L.* // Surf. Coat. Tech. 2004. V. 187. P. 106.
8. *Götz H.E., Müller M., Emmel A. et al.* // Biomaterials. 2004. V. 25. Iss. 18. P. 4057.
9. *Baburaj E.G., Starikov D., Evans J. et al.* // Int. J. Adhes. Adhes. 2007. V. 27. Iss. 4. P. 268.
10. *Митрофанов А.А., Чащин Е.А., Балашова С.А.* // Вестн. Иван. гос. энерг. ун-та. 2011. № 1. С. 103.

Laser Modification of Titanium Surface: Technology, Properties, and Prospects of Application

S. V. Telegin, A. V. Lyasnikova, O. A. Dudareva, I. P. Grishina, O. A. Markelova, V. N. Lyasnikov

The morphology of the surface of the VT1-00 titanium alloy after pulsed laser processing has been studied. The dependence of the morphology of the titanium surface layer on the modes of the technological modification process by means of laser radiation has been revealed. Variation of technological process parameters, such as voltage, pulse duration, and repetition frequency, as well as the number of pulses in the irradiation spot, makes it possible to regulate the thermal effect that influences the formation of submicrometric parameters of metal-ceramic films and coatings. The effect of treatment regimes on the morphological heterogeneity of the surface is found. The possibility of changing the morphology of the surface for a specific task is shown.

Keywords: functional coatings, laser processing, titanium modification, plasma spraying.