

ВОЗДЕЙСТВИЕ УФ ЛАЗЕРНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ПОВЕРХНОСТЬ ХРОМОВОЙ БРОНЗЫ

С.И. Миколуцкий, Т.В. Малинский, Р.Р. Хасая, Ю.В. Хомич
*Институт электрофизики и электроэнергетики РАН,
Дворцовая наб. 18, Санкт-Петербург 191186, Россия, mikolserg@mail.ru*

Исследовано воздействие наносекундных импульсов Nd:YAG-лазера с длиной волны 355 нм на поверхность хромовой бронзы. Обнаружено образование субмикронных шарообразных структур в диапазоне плотностей энергии в импульсе от 0.15 до 1.85 Дж/см². Представлена зависимость концентрации хрома в приповерхностном слое хромовой бронзы после лазерной обработки от плотности энергии излучения в импульсе. Обнаружена некоторая корреляция между пространственной плотностью полученных структур и концентрацией хрома у поверхности сплава. Показано, что максимальная концентрация хрома в приповерхностном слое и наибольшее количество субмикронных структур достигаются при 0.85 Дж/см². Полученная корреляция пространственной плотности субмикронных структур и концентрации хрома в приповерхностном слое позволяет сделать выводы о возможном механизме возникновения шарообразных структур.

Ключевые слова: лазерная обработка; наносекундные импульсы; УФ диапазон; бронза; субмикронные структуры; концентрация хрома.

INFLUENCE OF UV LASER NANOSECOND PULSES ON THE SURFACE OF CHROMIUM BRONZE

Sergey Mikolutskiy, Taras Malinskiy, Radmir Khasaya, Yury Khomich
*Institute for Electrophysics and Electric Power RAS,
18 Dvortzovaya Nab., 191186 Russia, Sankt-Peterburg, mikolserg@mail.ru*

The effect of nanosecond pulses generated by a Nd:YAG laser at the third harmonic with a wavelength of 355 nm on the surface of chromium bronze has been studied. The original samples had traces of mechanical processing in the form of a small-scale structure with a characteristic size of several micrometers and a large-scale structure with a size of about 50 μm . Scanning electron microscopy revealed the formation of submicron spherical structures in the range of pulse energy densities from 0.15 to 1.85 J/cm². Moreover, the diameter of the spherical top was about 600 nm, and the length of the leg-stand was about 1 μm . Studies of the elemental composition of the irradiated surface using energy-dispersive X-ray spectroscopy made it possible to obtain the dependence of the chromium concentration in the near-surface layer of chromium bronze on the energy density of laser radiation per pulse. A certain correlation was found between the spatial density of the obtained structures and the chromium concentration near the alloy surface. It is shown that the maximum concentration of chromium in the near-surface layer and the largest number of submicron structures per unit area are achieved at 0.85 J/cm². It is assumed that the increase in the concentration of chromium at a certain energy density is associated with different melting and boiling points of copper and chromium, when the first material is already removed from the surface, and the second one still remains. The obtained correlation of the spatial density of submicron structures and the concentration of chromium in the near-surface layer allows us to draw conclusions about the possible mechanism of the formation of spherical structures. This occurs due to the concentration of particles of more refractory chromium at the tops of spherical structures and the removal of low-melting copper around such structures by means of numerous nanosecond laser pulses.

Keywords: laser treatment; nanosecond pulses; UV range; bronze; submicron structures; chrome concentration.

Введение

Хромовая бронза является низколегированным медным сплавом с высокой электро- и теплопроводностью, обладает жаропрочностью и коррозионной стойкостью. Благодаря своим эксплуатационным и механическим свойствам широко применяется в атомной энергетике, металлур-

гии, электронике и электротехнике, авиакосмическом машиностроении. Для обработки такого рода материалов хорошо зарекомендовали себя наносекундные лазеры с достаточно короткой длиной волны излучения УФ диапазона при использовании простого метода прямого лазерного микро- и наноструктурирования [1-3].

Методика эксперимента

В работе исследуется воздействие наносекундных лазерных импульсов ультрафиолетового диапазона (355 нм) на поверхность хромовой бронзы. Для обработки материала используется Nd:YAG-лазер на третьей генерируемой гармонике с длительностью импульсов 10 нс при частоте следования 100 Гц. Схема экспериментальной установки аналогична используемой в работах [2, 4]. Во избежание сильного окисления образцы помещались в герметичную камеру с возможностью откачки воздуха.

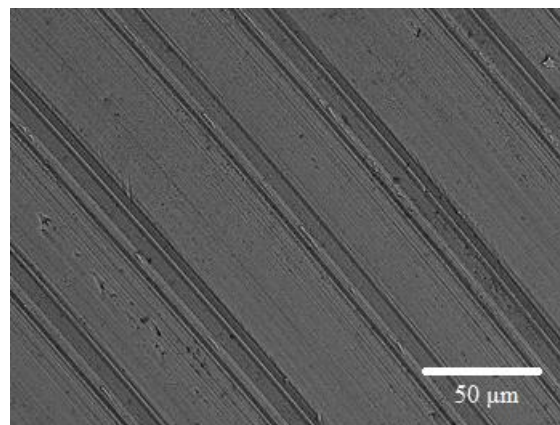
Для исследования поверхности обработанных образцов использовался сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) с приставкой для энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии с возможностью анализа элементного состава.

Результаты и их обсуждение

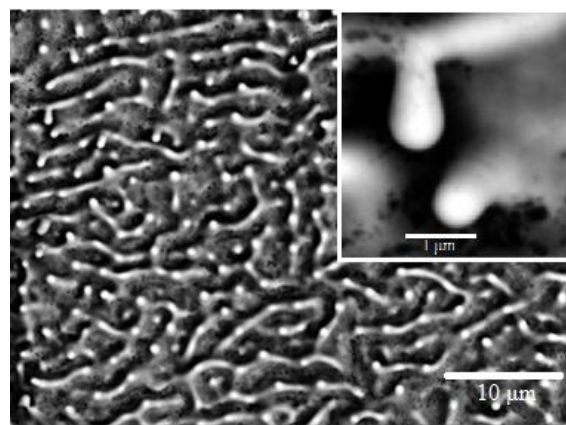
Изображение исходной поверхности хромовой бронзы, полученное с помощью СЭМ, показано на рисунке 1а. Видно, что материал после механической обработки с мелкомасштабной структурой с размером несколько микрометров и крупномасштабной – размером около 50 мкм.

Образцы обрабатывались в диапазоне плотностей энергии от 0.1 Дж/см² до 1.9 Дж/см² (8 точек) в режиме сканирования лазерным пучком по поверхности материала. Были обнаружены новые субмикронные образования в виде шарообразных структур на ножках (так называемые микроджеты), расположенных на протяженных холмообразных структурах в виде бороздок, расстояние между которыми составляет несколько микрометров друг от друга (рис. 1б). Причем плотность таких структур-микроджетов изменялась в исследуемом диапазоне энергий: при 0.25 Дж/см² наблюдалось несколько структур на 100 мкм², наибольшая плотность структур наблюдалась при 0.85 Дж/см² (рис. 1б), далее с увеличением энергии количество структур уменьшалось.

Из увеличенной вставки на рисунке 1б видно, что полученные структуры имеют форму застывших капель на ножках. Размер верхней сферической части субмикронной структуры составлял 500-700 нм, длина ножки-подставки была около 1 мкм, а ее диаметр у различных структур изменялся в диапазоне от 400 до 600 нм.



(a)



(б)

Рис. 1. СЭМ изображения поверхности хромовой бронзы (а) исходной и (б) после обработки Nd:YAG-лазером при плотности энергии 0,85 Дж/см² со вставкой с десятикратным увеличением (правый верхний угол)

С точки зрения элементного анализа наблюдалась некоторая корреляция концентрации хрома в приповерхностном слое и пространственной плотности новых структур (рис. 2). Из рисунка 2 видно, что с увеличением плотности энергии лазерного излучения до 0.85 Дж/см² росла концентрация хрома в приповерхностном слое. То же самое происходило и с количеством микроджетов на единицу площади. При увеличении плотности энергии до

1.85 Дж/см² концентрация хрома уменьшалась, как и концентрация исследуемых субмикронных структур.

Неравномерное удаление элементов хромовой бронзы с поверхности материала при лазерном облучении с плотностью энергии около 1 Дж/см², возможно, связано с более низкой температурой плавления меди (1085°C) по сравнению с хромом (1907°C), когда один материал уже удаляется с поверхности, а другой еще остается. При увеличении энергии лазерного излучения происходит значительный перегрев поверхности, которого достаточно для удаления как меди, так и хрома, поэтому его относительная концентрация снижается (см. рис. 2).

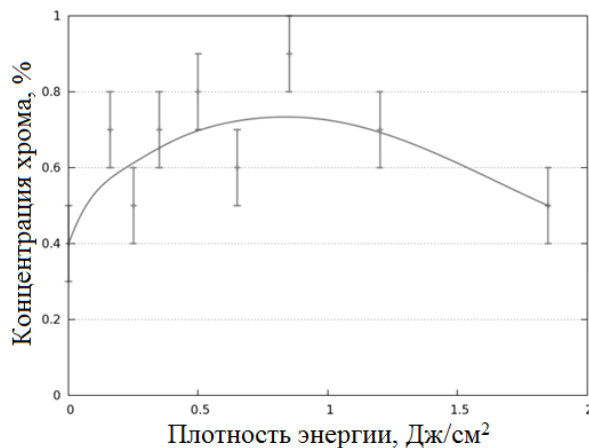


Рис. 2. Экспериментальная зависимость концентрации хрома в приповерхностном слое хромовой бронзы, обработанной наносекундными импульсами Nd:YAG-лазера, от плотности энергии излучения в импульсе

Описанная корреляция пространственной плотности микроджетов и концентрации хрома в приповерхностном слое материала позволяет сделать предположение о механизме возникновения таких субмикронных структур за счет сосредоточения частиц более тугоплавкого хрома в вершинах шарообразных структур и удалении легкоплавкой меди вокруг таких структур посредством многочисленных лазерных наносекундных импульсов.

Причем такая лазерная обработка бронзы позволяет изменять адгезионные свойства при диффузионно-сварном соедине-

нии с разнородными материалами [3]. Механические испытания их сварного соединения продемонстрировали улучшение предела прочности более 10 % [3]. Такое улучшение свойств после лазерной обработки поверхности можно объяснить созданием ультра-мелкозернистой структуры материала в зоне сварного шва, обеспечивающей более активную диффузию по границам зёрен и облегчающей пластическую деформацию.

Заключение

В работе исследовано взаимодействие наносекундных лазерных импульсов УФ диапазона с поверхностью хромовой бронзы. Выявлено формирование субмикронных структур в виде застывших капель на ножках-подставках при плотности энергии в импульсе от 0.15 до 1.85 Дж/см². Экспериментально исследована зависимость концентрации хрома в приповерхностном слое облученного участка хромовой бронзы от плотности энергии излучения. Показано, что максимальная концентрация хрома 0.9 % соответствует наибольшей плотности (около 20 шт. на 100 мкм²) субмикронных структур при плотности энергии 0.85 Дж/см².

Библиографические ссылки

1. Малинский Т.В., Рогалин В.Е., Ямщиков В.А. Пластическая деформация меди и ее сплавов при воздействии наносекундным УФ лазерным импульсом. *Физика металлов и материаловедение* 2022; 123(2): 192-199.
2. Железнов В.Ю., Малинский Т.В., Миколуцкий С.И., Рогалин В.Е., Филин С.А., Хомич Ю.В., и др. Деформационные процессы на поверхности никелевого сплава при воздействии наносекундными лазерными импульсами. *Деформация и разрушение материалов* 2021; (2): 15-20.
3. Вашуков Ю.А., Демичев С.А., Еленев В.Д., Малинский Т.В., Миколуцкий С.И., Хомич Ю.В., и др. Лазерная обработка поверхности металлических сплавов для диффузионной сварки. *Прикладная физика* 2019; (1): 82-87.
4. Khomich Yu.V, Mikolutskiy S.I. Preliminary laser treatment of materials for diffusion bonding in space and aviation technologies. *Acta Astronautica* 2022; 194: 442-449.