

УДК 669:535.8

УДАРНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НАНОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ПОВЕРХНОСТЬ БЕСКИСЛОРОДНОЙ МЕДИ В ВОДЕ

© 2024 г. В. Ю. Железнов¹, Т. В. Малинский¹, С. И. Миколуцкий^{1, *}, В. Е. Рогалин¹, Ю. В. Хомич¹, В. А. Ямщиков¹, А. А. Сергеев², С. В. Ивакин², И. А. Каплунов³, А. И. Иванова³

¹Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук, Россия, 191186 Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18

²Балтийский государственный технический университет “ВОЕНМЕХ” им. Д.Ф. Устинова, Россия, 190005 Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, 1

³Тверской государственный университет, Россия, 170100 Тверь, ул. Желябова, 33

*e-mail: mikolserg@mail.ru

Поступила в редакцию 18.04.2024 г.

После доработки 25.06.2024 г.

Принята к публикации 26.06.2024 г.

Проведена модификация поверхности бескислородной меди излучением сфокусированного пучка наносекундного твердотельного лазера под слоем воды при плотности энергии $W_p = 20\text{--}32$ Дж/см². Воздействие производилось на образец при наличии поглощающего покрытия и без него. Выявлено, что при плотности энергии излучения 32 Дж/см² без покрытия возникала впадина глубиной около 2.75 мкм, тогда как при наличии покрытия это значение возрастало до 5 мкм. Получена зависимость глубины впадины от плотности энергии лазерного импульса. Проведена оценка ударного воздействия мощного наносекундного лазерного импульса на бескислородную медь.

Ключевые слова: лазерная обработка, бескислородная медь, пластическая деформация, наносекундный импульс, вода

DOI: 10.31857/S0002337X24050045, EDN: MXCPIU

ВВЕДЕНИЕ

При обработке металлической мишени мощным лазерным излучением имеют место такие процессы, как нагрев, плавление, испарение [1–6]. Обычно подобные эксперименты проводились на воздухе, в вакууме или в инертных газовых средах. При воздействии на материал в воде возможны новые процессы, одним из которых является светогидравлический эффект, обнаруженный в 1963 г. [7]. Его суть заключается в образовании лазерной плазмы в ограниченном объеме жидкости и возникновении в ней ударной волны, приводящей к эффекту мощного гидроудара.

Использование наносекундных лазерных импульсов и защитного покрытия на

поверхности обрабатываемого материала позволяет создать сжимающие напряжения в приповерхностном слое, приводя к его упрочнению, что в конечном итоге увеличит сопротивление поверхностным повреждениям [2, 8]. В этом случае в приповерхностном слое обычно происходят уменьшение размеров зерен и рост плотности дислокаций [9, 10]. Предполагается, что наличие подобных дефектов структуры приповерхностного слоя может стимулировать диффузионные процессы и интенсифицировать процесс диффузионной сварки [11–13].

Большинство научных работ по ударному воздействию рассматривают лазерные импульсы с энергией в десятки джоулей [14, 15], однако для практического применения и широкого внедрения технологии в произ-

водство вызывает интерес использование энергий до 1 Дж.

Целью данной работы является исследование возможности применения наносекундных лазерных импульсов с энергией до 1 Дж для ударного воздействия на поверхность бескислородной меди, а также эффективности использования защитного покрытия для формирования пластических поверхностных деформаций. Выбор меди обусловлен наличием кубической плотнейшей упаковки в кристаллической решетке и отсутствием фазовых переходов в конденсированном состоянии, а также частым использованием в качестве модельного материала [16–18]. В частности, образцы из бескислородной меди и ее сплавов использовались при обнаружении оптикопластического эффекта [19, 20].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Эксперимент проводился в стандартных лабораторных условиях при комнатной температуре и нормальном атмосферном давлении. Лазерному воздействию подвергались образцы из бескислородной меди (Cu–OF), которые представляли собой медные зеркала цилиндрической формы с диаметром 40 и высотой 10 мм. Поверхность образца была отполирована по стандартной оптической

технологии [21], ее исходная шероховатость составляла 20 нм.

Используемый в эксперименте Nd:YAG-лазер ($\lambda = 1.064$ мкм, длительность импульса 10 нс, энергия в импульсе до 0.6 Дж, частота следования импульсов до 10 Гц, расходимость 16 мрад) состоял из задающего генератора, пространственного фильтра, изолятора Фарадея и усилителя на стекле (ГЛС – 1) диаметром 10 и длиной 180 мм. Излучение фокусировалось на поверхность образца линзой из кварцевого стекла с фокусным расстоянием $f = 500$ мм в пятно размером 1.5 мм. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

Были проведены два типа экспериментов по воздействию на образец излучения с одинаковыми параметрами лазерного пучка (размер пятна и плотность энергии излучения были идентичны для каждой серии пятен). В первом случае образец находился в воде без защитного покрытия; во втором – поверхность образца была закрыта черным поглощающим покрытием для уменьшения последствий деградации материала из-за теплофизического воздействия лазерной плазмы и абляции материала.

В качестве покрытия была использована черная виниловая изоляционная лента толщиной 200 мкм с коэффициентом остаточного отражения приблизительно 1 % [22].

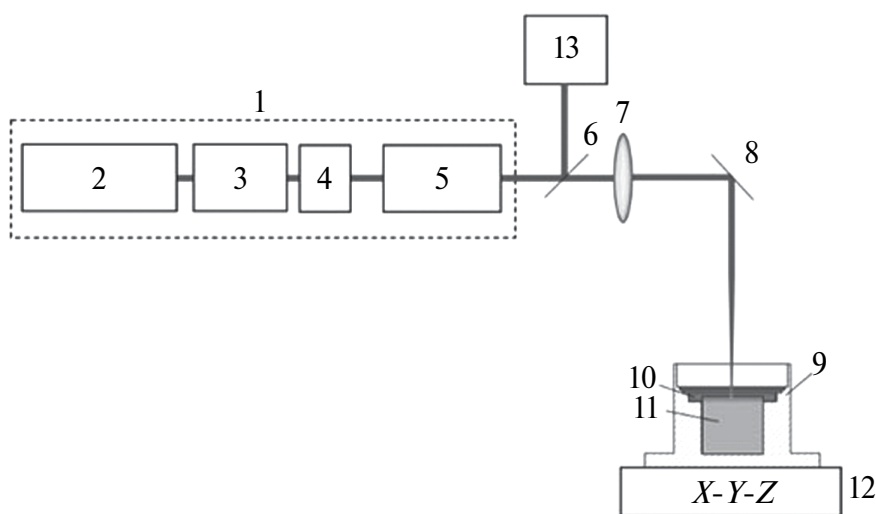


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для обработки лазерным излучением в кювете с водой: 1 – твердотельный Nd:YAG-лазер; 2 – задающий генератор; 3 – пространственный фильтр; 4 – изолятор Фарадея; 5 – усилитель; 6, 8 – зеркала; 7 – линза; 9 – устройство для крепления образца (кювета); 10 – вода; 11 – обрабатываемый образец; 12 – двухкоординатная система перемещения; 13 – измеритель энергии импульса.

Лазерное воздействие проводилось в монопериодном режиме для каждого пятна. Перед каждым импульсом в кювету с образцом заливалась свежая порция деионизированной воды, затем после воздействия происходила ее замена. Слой воды над образцом составлял 1 мм.

Для исследования морфологии поверхности образца после воздействия лазерного излучения использовались оптический профилометр NewView 7300 (метод бесконтактной сканирующей интерферометрии белого света) и растровый электронный микроскоп (РЭМ) JSM 6610LV.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 2а, 2б показаны 2D-профилограммы впадин, образованных на полированной поверхности образца в результате воздействия лазерного импульса с плотностью энергии 30 Дж/см² без поглощающего покрытия на поверхности и с покрытием соответственно. В обоих случаях после воздействия на поверхности образца возникало обширное углубление, поперечный размер которого соответствовал размеру лазерного пятна. В случае воздействия излучения на незащищенную поверхность на ней помимо впадины возникали следы абляции и другие мелкие дефекты.

На рис. 2в, 2г представлены профили поверхности меди, из которых видно, что впадина в образце с защитным покрытием заметно глубже, чем при его отсутствии (4.75 против 2.5 мкм). На поверхности обоих образцов отсутствует бруствер, который обычно наблюдается вокруг лазерных кратеров, возникших в воздушной среде [23]. В целом, по микрофотографиям на рис. 2д, 2е можно судить о значительной деградации поверхности меди в результате воздействия лазерного облучения.

На рис. 3 представлены экспериментальные зависимости глубины впадины после лазерного воздействия на поверхность меди от плотности энергии лазерного импульса W_p при наличии защитного покрытия и без него. Плотность энергии составляла 20, 25, 30 и 32 Дж/см². Видно, что глубина впадины линейно растет с увеличением плотности

энергии без очевидных признаков насыщения. Наличие поглощающего покрытия заметно увеличило глубину возникшей впадины. При $W_p = 20$ Дж/см² эта величина больше чем на порядок превышает глубину впадины, созданной без покрытия. С ростом энергии глубина кратера растет быстрее в отсутствие защитного покрытия и различие существенно снижается. Однако необходимо проведение дополнительных исследований на наличие сжимающих напряжений, так как такое углубление может быть также обусловлено выносом материала из-за лазерной абляции в воде.

На рис. 4 представлены РЭМ-изображения пятна, полученного в результате лазерного воздействия в воде без покрытия с энергией 32 Дж/см². Видно, что поверхность была сильно трансформирована, наблюдается застывший расплавленный материал, который выплеснулся на поверхность в результате коллапса кавитационного пузыря. Из рис. 4б видно, что в пятне, возникшем в результате лазерного воздействия в воде на поверхность меди без покрытия, образовалось большое количество пор различного размера до ~ 1.5 мкм в диаметре. В случае использования защитного поглощающего покрытия не удалось обнаружить заметного изменения морфологии поверхности.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При воздействии мощного лазерного импульса на металл возникшая лазерная плазма вызывает ударную волну. Благодаря ограничению разлета плазменного факела в воде генерируется мощный гидродинамический импульс, который способен вызывать необратимые процессы в приповерхностном слое материала. Критическим параметром, определяющим возможность пластической деформации металла, является предел упругости Гюгонио (ПУГ), выражаемый следующим образом [8]:

$$HEL = \frac{1 - \nu}{1 - 2\nu} \sigma_Y^{dyn}, \quad (1)$$

где ν — коэффициент Пуассона (коэффициент поперечной деформации материала), σ_Y^{dyn} — динамический предел текучести.

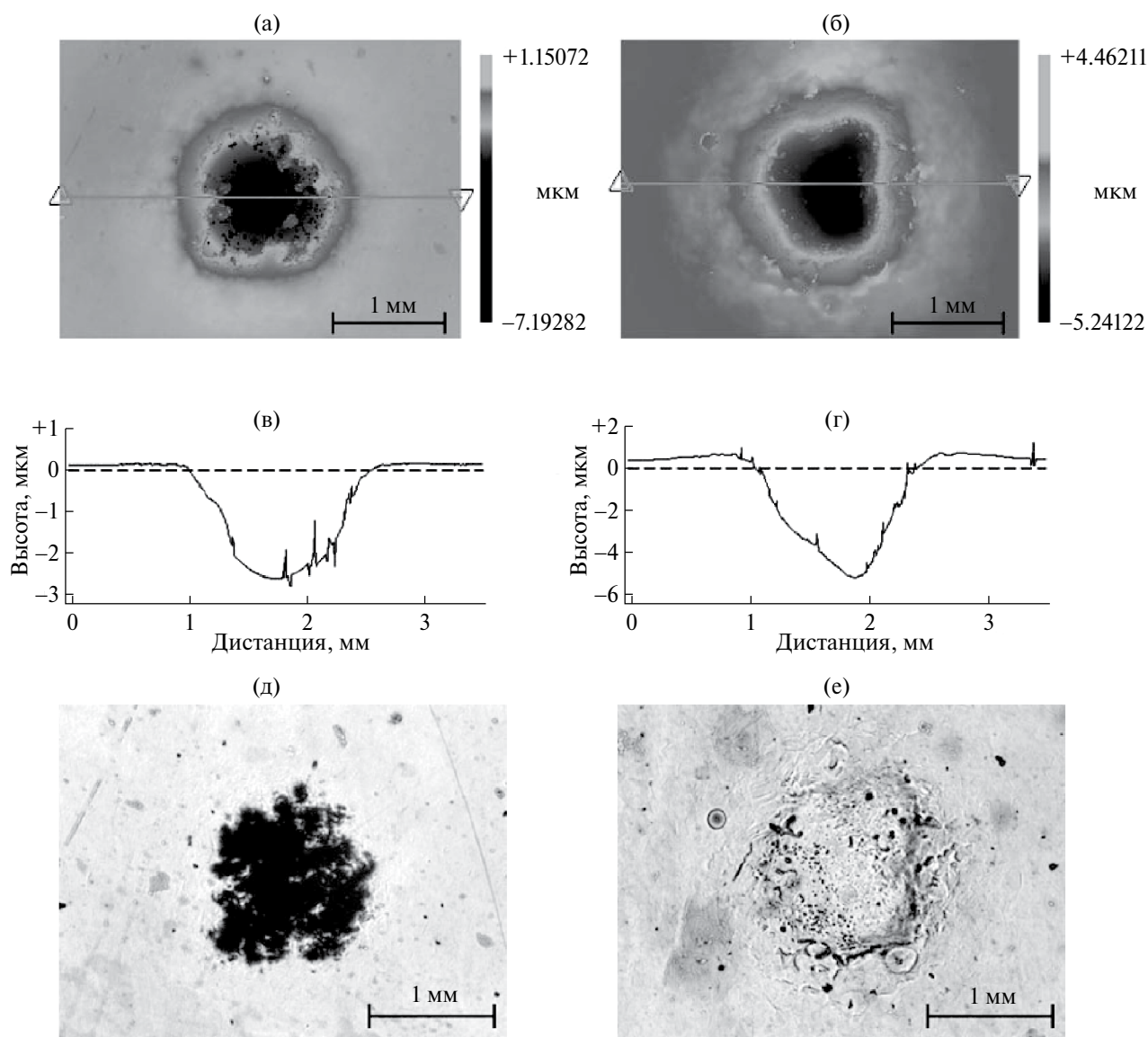


Рис. 2. Поверхность бескислородной меди после лазерной обработки в воде с плотностью энергии 30 Дж/см² ((а), (в), (д) – без покрытия; (б), (г), (е) – с покрытием): (а) и (б) – двумерные данные профилометрии; (в) и (г) – центральные профили; (д) и (е) – микрофотографии.

Если давление лазерной плазмы превышает значения ПУГ, то в материале происходит пластическая деформация. В случае меди $\nu = 0.34$, предел текучести лежит в диапазоне 77–400 МПа [24, 25], поэтому оценка по формуле (1) для предела упругости Гюгонио составляет 0.16–0.83 ГПа.

Рассмотрение ударного воздействия мощного наносекундного лазерного импульса на поверхность материала происходит путем генерации ударной волны от образовавшейся лазерной плазмы. Плазменный факел под действием высокого давления, из-за удер-

живающего эффекта окружающей жидкости [26], не может распространиться в воздушную среду, благодаря чему в объеме жидкости образуется кавитационный пузырь, наполненный высокотемпературным газом и расплавленными частицами аблированного материала [27]. Затем кавитационный пузырь коллапсирует в противоположную сторону направления движения плазменного факела. Процесс сопровождается выплескиванием частиц материала (смешанного с пузырьками газа) на поверхность образца, которая стремительно застывает, а в местах

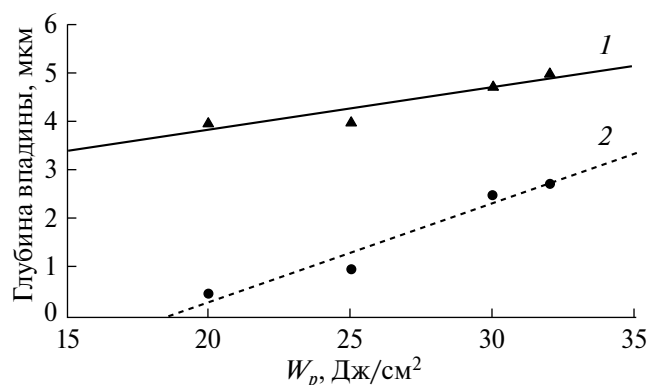


Рис. 3. Зависимости глубины впадины от плотности энергии излучения для случая с покрытием (1), без покрытия (2).

скопления пузырьков газа образуются пустоты (поры) округлого вида.

Одним из следствий такого процесса является формирование впадины и возникновение сжимающих напряжений на поверхности образца, которые приводят к упрочнению приповерхностного слоя материала. В основе рассмотрения процесса лазерного ударного упрочнения лежат пиковые давления у поверхности образца, создаваемые лазерными импульсами достаточно высокой мощности. Если давление ударных волн превышает предел упругости Гюгонио обрабатываемого материала, то происходит его пластическая деформация. Исходя из описания ограниченного режима абляции и считая плазму идеальным газом, пиковое давление плазмы P_{peak} может быть выражено как [8]

$$P_{peak} = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha + 3}} \sqrt{Z} \sqrt{I_0}, \quad (2)$$

где I_0 — плотность лазерной мощности, α — эффективность взаимодействия ($\alpha = 0.1-0.2$), Z — приведенный ударный импеданс между материалом и удерживающей средой.

Таким образом, если значение пикового давления из формулы (2) превышает ПУГ металла, который является эквивалентом предела текучести в ударных условиях, то ударная волна распространяется в образец и вызывает его пластическую деформацию на глубину, где пиковое напряжение уже не превышает ПУГ. Возникшие в результате деформации остаточные напряжения вызывают упрочнение поверхностного слоя материала. Оптимальным для лазерного ударного упрочнения считается пиковое давление, близкое к 2–2.5 ПУГ [8].

В случае используемых в эксперименте плотностей энергии лазерного излучения в 20, 25, 30 и 32 Дж/см² имеем пиковые давления в размере 1.44, 1.61, 1.77 и 1.83 ГПа соответственно. Сравнение этих значений с пределом упругости Гюгонио для меди показывает, что в данном материале должна наблюдаться пластическая деформация, что и подтверждается полученными экспериментальными данными.

Помимо этого, в ходе исследования на поверхности образца после воздействия излучения были обнаружены структуры в виде

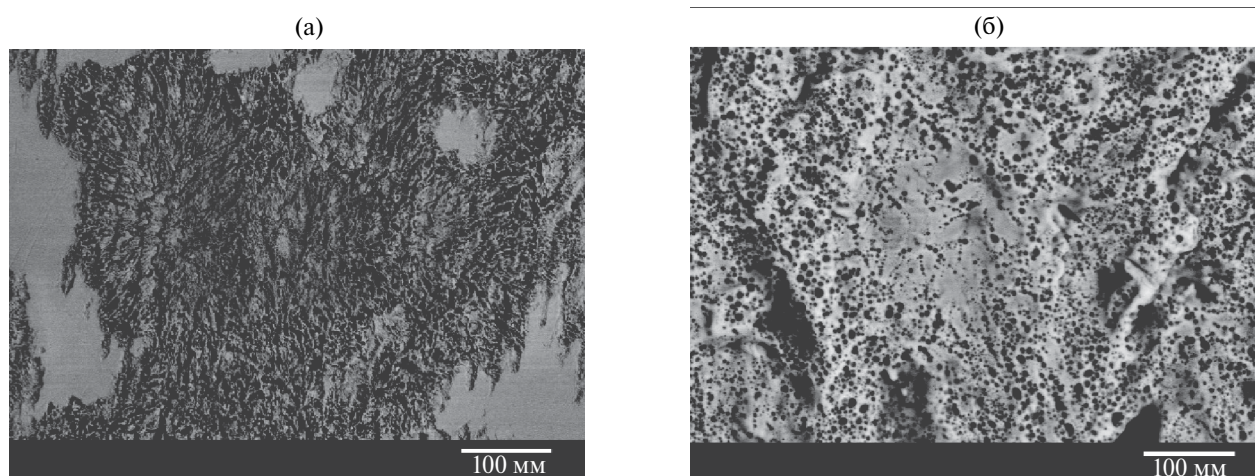


Рис. 4. РЭМ-снимки поверхности бескислородной меди без покрытия после лазерной обработки в воде с плотностью энергии 32 Дж/см².

полос, внешне напоминающие лазерно-индуцированные поверхностные периодические структуры (ЛИППС) (рис. 5). На образце, обработанном с покрытием, данные полосы не возникали.

Известно, что обычно период ЛИППС Λ меньше или равен длине волны падающего излучения λ [28], однако в результате нашего эксперимента были зарегистрированы полосы с периодом гораздо большим, чем длина волны (около 15 мкм). Полосы перпендикулярны направлению поляризации лазерного излучения [29], и угол их поворота изменялся в зависимости от фокусировки в случае круговой поляризации излучения. Высота некоторых полос достигала 1 мкм. Характерно, что кристаллографическая ориентация зерен металла не оказала никакого влияния на положение этих полос.

Другое предположение (кроме ЛИППС) возникновения этих полос на поверхности может быть следующим. В задающем генераторе используется петлевой резонатор, в котором происходит четырехволновое смешение. Две волны записывают решетку, остальные две — вход и выход излучения. Период решетки по условию Брэгга

$$\Lambda = \lambda / 2 \sin \theta, \quad (3)$$

где θ — угол взаимодействия волн, записывающих решетку.

В представленном эксперименте θ составляет 1° – 2° . Для угла, равного 2° , период полос совпадает с представленным выше значением. Таким образом, активная среда

лазера могла быть накачана неравномерно по объему, а максимумы и минимумы соответствуют периоду решетки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы особенности влияния светогидравлического эффекта на поверхность полированного образца бескислородной меди при воздействии моноимпульса излучения твердотельного Nd:YAG-лазера в воде. Лазерное ударное воздействие производилось на образцы в отсутствие покрытия и при наличии черного поглощающего покрытия толщиной 200 мкм. В обоих случаях воздействие приводило к образованию на поверхности образца обширного углубления, размер которого соответствовал размеру лазерного пятна. Глубина возникшей впадины пропорциональна плотности энергии импульса. Наличие поглощающего покрытия увеличивало глубину впадины. Такие пластические деформации косвенно могут свидетельствовать о наведении сжимающих напряжений в приповерхностном слое материала, что требует дополнительных исследований в данном направлении.

Обнаружены структуры в виде полос, внешне напоминающие ЛИППС с периодом около 15 мкм и высотой до 1 мкм. Полосы перпендикулярны направлению поляризации излучения. Кристаллографическая ориентация зерен металла не влияла на положение полос.

На следующем этапе работы предполагается обработка поверхности образца скани-

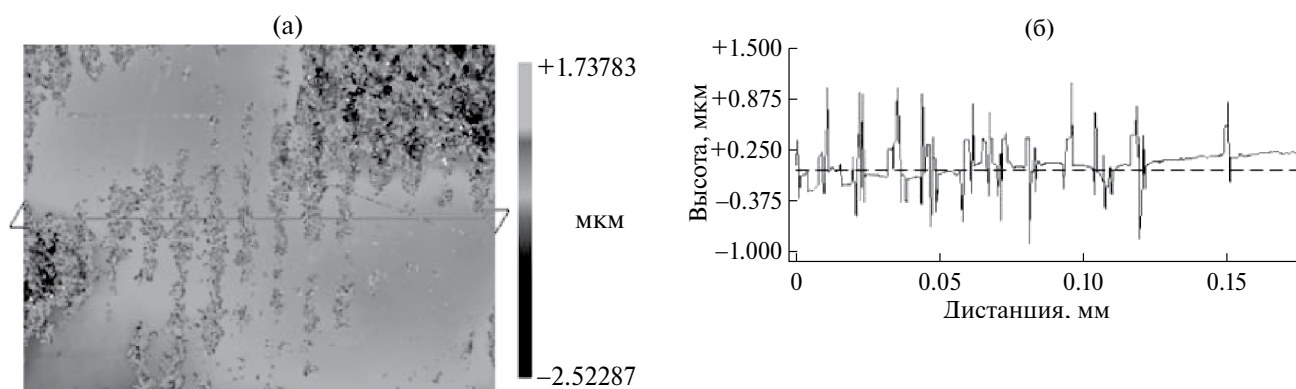


Рис. 5. Поверхность бескислородной меди без покрытия после лазерной обработки в воде с плотностью энергии 25 Дж/см²: (а) — профилограмма, (б) — профиль поверхности по отмеченной линии.

рующим частотно-импульсным лазерным излучением и исследование влияния созданной модифицированной структуры на процесс диффузионной сварки.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 24–19–00727, <https://rscf.ru/project/24–19–00727/> с использованием ресурсов ЦКП ТвГУ.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zheleznov V. Yu., Malinskiy T. V., Mikolutskiy S. I., Khomich Yu. V. Improving the Properties of Metal-Ceramic Joints by Means of Laser Pretreatment // J. Commun. Technol. Electron. 2023. V. 68. № 9. P. 1061–1066. <https://doi.org/10.1134/S1064226923090292>
2. Железнов В.Ю., Малинский Т.В., Роголин В.Е., Хасая Р.Р., Хомич Ю.В., Исаков В.В., Козлов А.Л., Новиков И.А., Ножницкий Ю.А., Шибеев С.А. Лазерные технологии, сопутствующие лазерной ударной обработке деталей: очистка, полировка, наплавка // УПФ. 2023. Т. 11. № 4. С. 340–355. <https://doi.org/10.51368/2307–4469–2023–11–4–340–355>
3. Хомич В.Ю., Шмаков В.А. Образование наноструктур на поверхности твердых тел при лазерном плавлении // ДАН. 2011. Т. 438. № 4. С. 460–464.
4. Токарев В.Н., Хомич В.Ю., Шмаков В.А., Ямщиков В.А. Формирование наноструктур при лазерном плавлении поверхности твердых тел // ДАН. 2008. Т. 419. № 6. С. 754–758.
5. Миколуцкий С.И., Хомич В.Ю., Ямщиков В.А., Токарев В.Н., Шмаков В.А. Исследование процессов формирования наноструктур на поверхности материалов под действием излучения ArF-лазера // УПФ. 2013. Т. 1. № 5. С. 548–552.
6. Хомич В.Ю., Ямщиков В.А. Основы создания систем электроразрядного возбуждения мощных CO₂-, N₂- и F₂- лазеров. М.: Физматлит, 2014. 164 с.
7. Аскарьян Г.А., Прохоров А.М., Чантурия Г.Ф., Шупуло Г.П. Луч ОКГ в жидкости // ЖЭТФ. 1963. Т. 44. № 6. С. 2180–2182.
8. Peyre P., Fabbro R., Merrien P., Lieurade H.P. Laser Shock Processing of Aluminium Alloys. Application to High Cycle Fatigue Behavior // Mater. Sci. Eng. A. 1996. V. 210. P. 102–113. [https://doi.org/10.1016/0921–5093\(95\)10084–9](https://doi.org/10.1016/0921–5093(95)10084–9)
9. Мухаметрахимов М.Х. Твердофазная свариваемость листов титанового сплава ВТ6 при пониженной температуре // Письма о материалах. 2015. № 2 (5). С. 194–197. <https://doi.org/10.22226/2410–3535–2015–2–194–197>
10. Лутфуллин Р.Я., Мухаметрахимов М.Х., Валитов В.А., Мухтаров Ш.Х., Классман П.А. Наноструктурирование и твердофазная сварка труднообрабатываемых сплавов // Перспективные материалы. 2011. № 12. С. 295–300.
11. Ващуков Ю.А., Еленев В.Д., Железнов Ю.А., Малинский Т.В., Миколуцкий С.И., Хомич Ю.В., Ямщиков В.А. Влияние лазерной перфорации элементов диффузионно-сварного соединения “керамика-медь-керамика” на его механические свойства // Неорганические материалы. 2021. Т. 57. № 2. С. 214–219. <https://doi.org/10.31857/S0002337X21020147>
12. Khomich Yu.V., Mikolutskiy S.I., Rogalin V.E., Kaplunov I.A., Ivanova A.I. Heat Treatment of the Surface of the ChS57 Alloy with Powerful Nanosecond Ultraviolet Laser Pulses // Key Eng. Mater. 2021. V. 887. P. 345–350. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.887.345>
13. Mikolutskiy S.I., Khomich Yu.V. Effect of Nanosecond Ultraviolet Laser Radiation on the Structure and Adhesion Properties of Metals and Alloys // Phys. Met. Metallogr. 2021. V. 122. № 2. P. 148–153. <https://doi.org/10.1134/S0031918X21020083>
14. Munther M., Martin T., Tajyar A., Hackel L., Beheshti A., Davami K. Laser Shock Peening and Its Effects on Microstructure and Properties of Additively Manufactured Metal Alloys: A Review // Eng. Res. Express. 2020. V. 2. P. 022001. <https://doi.org/10.1088/2631–8695/ab9b16>
15. Новиков И.А., Ножницкий Ю.А., Шибеев С.А. Мировой опыт в исследовании и применении

- нии технологического процесса лазерной ударной обработки металлов (обзор) // *Авиационные двигатели*. 2022. Т. 2. № 15. С. 59–81. https://doi.org/10.54349/26586061_2022_1_59
16. *Рогалин В.Е.* Оптическая стойкость медных зеркал для мощных импульсных ТЕА CO₂-лазеров // *Материаловедение*. 2013. № 9. С. 34–42.
17. *Николаев А.К., Костин С.А.* Медь и жаропрочные медные сплавы. М.: ДПК Пресс, 2012. 715 с.
18. *Осинцев О.Е., Федоров В.Н.* Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки. М.: Машиностроение, 2004. 337 с.
19. *Малинский Т.В., Рогалин В.Е., Ямщиков В.А.* Пластическая деформация меди и ее сплавов при воздействии наносекундным ультрафиолетовым лазерным импульсом // *ФММ*. 2022. Т. 123. № 2. С. 192–199. <https://doi.org/10.31857/S0015323022020073>
20. *Khomich Yu.V., Malinskiy T.V., Rogalin V.E., Yamshchikov V.A., Kaplunov I.A.* Modification of the Surface of Copper and Its Alloys due to Impact to Nanosecond Ultraviolet Laser Pulses // *Acta Astronautica*. 2022. V. 194. P. 434–441. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.11.033>
21. *Окатов М.А., Антонов Э.А., Байгожин А. и др.* Справочник технолога—оптика. СПб.: Политехника, 2004. 679 с.
22. ГОСТ 16214–86. Лента поливинилхлоридная электроизоляционная с липким слоем. Технические условия.
23. *Анисимов С.И., Имас Я.А., Романов Г.С., Ходыко Ю.В.* Действие излучения большой мощности на металлы. М.: Наука, 1970. 272 с.
24. *Davis J. R.* Copper and Copper Alloys. Almere: ASM international, 2001. 652 p.
25. *Joseph G., Kundig K.J.A.* Copper: Its Trade, Manufacture, Use, and Environmental Status. Almere: ASM international, 1998. 451 p.
26. *Sasaki K., Takda N.* Liquid-Phase Laser Ablation // *Pure Appl. Chem.* 2010. V. 82. № 6. P. 1317–1327. <https://doi.org/10.1351/PAC-CON-09-10-23>
27. *Yang Z., Liu X., Tian Y.* Novel Metal–Organic Super–Hydrophobic Surface Fabricated by Nanosecond Laser Irradiation in Solution // *Colloids Surf., A*. 2020. V. 587. P. 124343. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.124343>
28. *Bonse J.* Quo Vadis LIPSS?—Recent and Future Trends on Laser-Induced Periodic Surface Structures // *Nanomaterials*. 2020. V. 10. № 10. P. 1950. <https://doi.org/10.3390/nano10101950>
29. *Достовалов А.В., Корольков В.П., Терентьев В.С., Окопуб К.А., Дульцев Ф.Н., Бабин С.А.* Исследование формирования термохимических лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур на пленках Cr, Ti, Ni и NiCr фемтосекундным излучением // *Квантовая электроника*. 2017. Т. 47. № 7. С. 631–637.