

## ПРОЧНОСТЬ И ПЛАСТИЧНОСТЬ

УДК 539.374.1

### ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ МЕДИ И ЕЕ СПЛАВОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НАНОСЕКУНДНЫМ УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ

© 2022 г. Т. В. Малинский<sup>а</sup>, В. Е. Роголин<sup>а, \*</sup>, В. А. Ямщиков<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Дворцовая набережная, 18,  
Санкт-Петербург, 191186 Россия

\*e-mail: v-rogalin@mail.ru

Поступила в редакцию 18.03.2021 г.

После доработки 19.10.2021 г.

Принята к публикации 21.10.2021 г.

Исследовано воздействие наносекундных УФ-лазерных импульсов на образцы меди и ее низколегированных сплавов. В допороговом режиме, в отсутствие явных следов плавления, при плотности энергии 0.1–1.0 Дж/см<sup>2</sup> обнаружены следы высокотемпературной деформации. Они проявляются в виде результатов проскальзывания по границам зерен и растрескивания по ним, а также следов кристаллографического скольжения внутри зерен. Поверхность металла в облученной зоне вспучивается. С ростом числа воздействующих импульсов происходит накопление повреждений. Высота возникшего поднятия может достигать 1 мкм, а иногда и несколько более. Полученные результаты имеют сходство с электропластическим и магнитопластическим эффектами. По аналогии предлагается назвать обнаруженный эффект оптикопластическим.

*Ключевые слова:* термодформация, медь и ее сплавы, УФ-лазер, наносекундный импульс, порог оптического пробоя, абляция

**DOI:** 10.31857/S0015323022020073

#### ВВЕДЕНИЕ

Лазеры существуют уже больше 60 лет и все это время, наряду с работами по физике и технике лазерных источников, проводятся активные исследования их технологических применений для обработки материалов [1, 2]. Чаще всего, применяются непрерывные волоконные и СО<sub>2</sub>-лазеры, используемые для резки, сварки, закалки и других процессов обработки металлов. Эти лазеры излучают в инфракрасном (ИК) диапазоне спектра, однако металлы, как правило, хорошо отражают в этой области. Для увеличения производительности технологического процесса часто используют частотно-импульсное излучение и уменьшение длины волны лазера. Рост импульсной мощности излучения способствует эффективности воздействия. Последнее время весьма популярны стали фемтосекундные лазеры [3, 4]. Однако они пока весьма дороги и сложны в эксплуатации. В то же время использование более дешевых наносекундных лазеров в ряде случаев оказывается весьма эффективным и более практичным [5–12].

Для повышения доли поглощенной в материале энергии лазерного излучения и, тем самым, увеличения К.П.Д. процесса, создаются излучатели с меньшей длиной волны. С уменьшением

длины волны коэффициент отражения металлов заметно снижается. В настоящее время разработаны и промышленно производятся лазеры, излучающие в ультрафиолетовом диапазоне. Это излучение поглощается металлами в десятки раз лучше, чем ИК-лучи. Так, например, медь, которая отражает в ИК-области ~98% излучения, на длине волны 355 нм отражает лишь 10% [6], т.е. поглощенная доза излучения возрастает в 45 раз.

Лазерные методы создания различных наноструктур на поверхности металлов исследованы достаточно подробно [10]. Структурирование поверхности материалов в микронном и субмикронном масштабе приводит к изменению их излучательных, электрических, электронно-эмиссионных, тепловых и адгезионных свойств. Известно, что можно добиться увеличения прочности совместно с пластичностью в металлах и сплавах [13] или контролируемого изменения электрических свойств поверхности проводников и диэлектриков [14].

В данной работе исследовали создание наноструктур на поверхности меди и ее сплавов с помощью наносекундного импульсно-периодического УФ-лазера. Наносекундные импульсы УФ-лазера способны модифицировать металлическую поверх-

ность, кардинально меняя ее свойства [15–18]. Этот процесс способствует проведению диффузионной сварки обработанных металлических поверхностей благодаря интенсификации диффузионных процессов в поверхностном слое металла [5, 7, 8]. В работах [5, 7, 8, 15–18] эти исследования проводили при плотности энергии лазерного импульса порядка нескольких Дж/см<sup>2</sup>. При такой плотности энергии лазерного импульса воздействие на металл сопровождается эффектом оптического пробоя. Это пороговое явление, заключающееся в возникновении эрозионного плазменного факела вблизи образца, сопровождается плавлением и испарением материала и образованием кратера на поверхности. Это явление было подробно изучено при появлении лазеров и подробно описано в литературе [19].

Исследования, о которых сообщается в данной работе, проведены при плотности энергии лазерного импульса меньшей порога оптического пробоя (для исследованных материалов, менее 1.0 Дж/см<sup>2</sup>). Ранее допороговые повреждения на поверхности металла вполне справедливо считались несущественными по сравнению со сверхпороговыми кратерами. Однако современные методы исследования структуры облученных образцов позволяют более внимательно рассмотреть эти дефекты. В данной работе сообщается о допороговых нано- и микроэффектах на поверхности образцов меди и ее сплавов, возникших при воздействии наносекундного импульсного излучения УФ-лазера.

### ИССЛЕДОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования были приготовлены образцы бескислородной меди марки МОБ и ее бронзовых низколегированных сплавов Cu–Cr, Cu–Zr и Cu–Cr–Zr. В сплавах содержание легирующих добавок не превышало 0.5%, что почти не влияло на оптические и теплофизические свойства сплавов, однако заметно повышало их механические свойства [20, 21].

Были изготовлены образцы диаметром 40 мм и толщиной 10 мм, которые были отполированы по стандартной оптической технологии [22]. Предварительно были измерены коэффициенты отражения образцов на спектрофотометре Cary-5000 UV-VIS-NIR с приставкой UMA. На рабочей длине волны  $\lambda = 355$  нм образцы отражали 10%. До и после лазерного воздействия образцы исследовали на оптическом профилометре – Zygo New View 7300, и растровом электронном микроскопе (РЭМ) JEOL JSM 6610LV. Все рисунки, приведенные в работе, получены на профилометре. Исходная шероховатость поверхности образцов на участ-

ке, сопоставимом с площадью лазерного пятна, составляла приблизительно 15–20 нм.

Затем образцы подвергали воздействию лазерного излучения. Экспериментальная установка, оптическая схема и методика обработки результатов измерений подробно описаны в работах [5–7, 11, 17]. В качестве источника излучения использовали импульсно-периодический Nd:YAG лазер (третья гармоника, длина волны  $\lambda = 355$  нм, энергия в импульсе 8 мДж при длительности  $\tau = 10$  нс, частота повторения  $f = 10$  Гц). Количество импульсов на образце регулировали электромеханическим затвором. Образец устанавливали на трехкоординатном предметном столике, в состав которого входят два линейных транслятора 8MT180 и один 8MT173, управляемые контроллером 8SMC1-USBhF (Standa Ltd, Lithuania). Управление комплексом осуществляли с помощью персонального компьютера.

Излучение лазера фокусировали на образец кварцевой линзой с фокусным расстоянием 250 мм в пятно 100–200 мкм. Для определения площади облученной зоны на поверхности образца, перед проведением экспериментов с допороговым излучением на каждом образце регистрировали серию пятен с допороговым и сверхпороговым воздействием. На каждое пятно проводили воздействие 30 импульсами излучения с заранее заданной плотностью энергии при частоте 10 Гц.

Частоту  $f$  импульсов лазерного излучения выбирали, исходя из возможностей используемого лазера. Но при этом учитывали условие полного остывания поверхности меди или ее сплава за время между импульсами, определяемое из уравнения (1), полученного в работе [23]:

$$t_{\text{cool}} = \frac{4L^2}{\alpha\pi^2} \ln \frac{8T_m}{T_{\text{in}}\pi^2}, \quad (1)$$

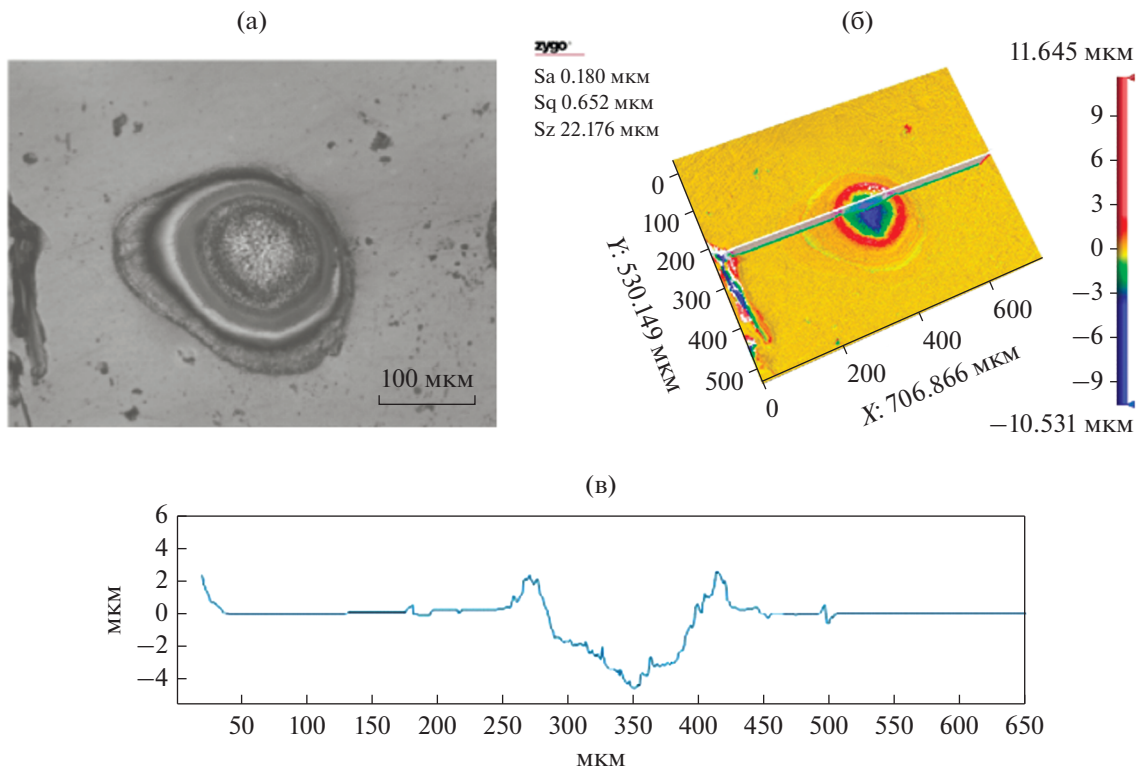
где  $\alpha$  – температуропроводность,  $T_m$  – температура плавления меди или ее сплава соответственно,  $L$  – толщина прогретого поверхностного слоя меди или ее сплава, определяемая из уравнения

$$L = 2\sqrt{\alpha\tau}. \quad (2)$$

Полное остывание поверхности происходит при  $f < 50$  МГц, что значительно выше использованной в работе  $f = 10$  Гц.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Порог оптического пробоя на образцах из меди и ее сплавов в нашем эксперименте наблюдали при плотности энергии  $E \sim 1.0$  Дж/см<sup>2</sup>. При превышении  $E$  поверхность подвергалась плавлению и испарению. В воздухе, вблизи поверхности, возникал эрозионный плазменный факел, а в образце появлялся кратер. На рис. 1а хорошо виден лазерный кратер, обрамленный бруствером из расплав-



**Рис. 1.** (а) Кратер на поверхности меди, полученный в результате воздействия 30 УФ-импульсов лазера, (б) 3D-профиль; (в) 2D-профилограмма.

ленного материала. На рис. 1б показан трехмерный профиль с показанным сечением, на котором получен двумерный профиль (рис. 1в).

Однако допороговые результаты воздействия излучения наблюдались нами уже при  $E \sim 0.1$  Дж/см<sup>2</sup>. Это были хорошо видные с помощью микроскопа следы высокотемпературной пластической деформации, заключающиеся в образовании поднятия на облучаемой поверхности до уровня около 1 мкм, вследствие миграции границ зерен и кристаллографического скольжения в их объеме. Следы расплавленного металла в этом случае практически не наблюдались.

Характерно, что образовавшиеся дефекты имеют необратимый характер. Были специально исследованы образцы меди после хранения в условиях лабораторного помещения в течение 6 месяцев. Полученные профилограммы не изменились.

На рис. 2 приведены микрофотографии следов повреждения поверхности образца Cu–Cr–Zr после воздействия одного (рис. 2а), трех (рис. 2б), пяти (рис. 2д) и тридцати (рис. 2е) лазерных импульсов при  $E = 0.77$  Дж/см<sup>2</sup>. Под ними приведены их профилограммы.

В зоне лазерного пятна после воздействия отчетливо наблюдалось неравномерное вспучивание материала образца (рис. 2–4). С увеличением

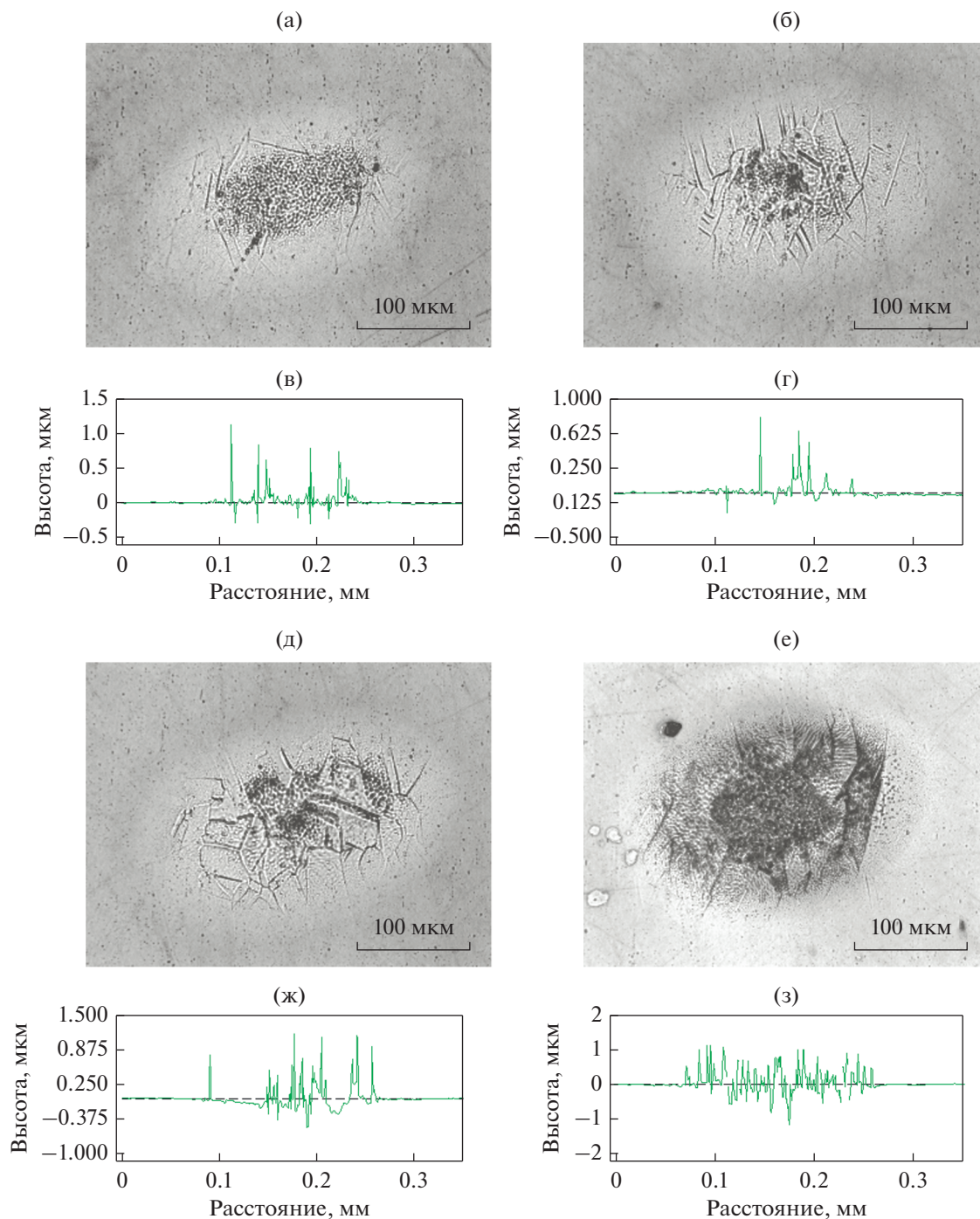
количества воздействующих импульсов и ростом плотности энергии высота поднятия увеличивалась и достигала уровня  $\sim 1$  мкм. При этом возникло характерное трещинообразование по границам зерен. Отдельные зерна, имевшие характерный размер десятки мкм, как бы выдавливались из тела образца на поверхность.

На рис. 3а приведено 3D-изображение лазерного пятна на поверхности меди после воздействия излучения 25 импульсов лазера, а на рис. 3б его 2D-профилограмма вдоль сечения, показанного на рис. 3а. Поверхность в пятне поднялась на высоту до 150 нм в максимальной точке, возникли глубокие микротрещины по границам зерен (глубиной до 100 нм).

С увеличением  $E$  масштабы повреждений растут. Высота поднятий увеличивается до 1 мкм.

На рис. 4 приведены данные, полученные с поверхности Cu–Cr после воздействия излучения 30 импульсов лазера: на рис. 4а микрофотография поврежденной зоны; на рис. 4б приведено 3D-изображение, а на рис. 4в – 2D-профилограмма.

На рис. 5 показан участок лазерного пятна на Cu–Cr, полученного при воздействии 30 импульсами при  $E = 0.74$  Дж/см<sup>2</sup>. Хорошо видны следы выхода на поверхность плоскостей скольжения. Они уже начали оплавляться последующими импульсами.



**Рис. 2.** Поверхность Cu–Cg–Zr после воздействия 1 (а), 3 (б), 5 (д) и 30 (е) импульсами лазера ( $E \sim 0.77$  Дж/см<sup>2</sup>); в, г, ж, з – соответствующие 2D-профиллограммы.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Так как средняя мощность лазера была мала (на уровне нескольких Вт), то такое облучение не сказывалось на геометрии образцов. В то же время интенсивное воздействие импульсной составляющей излучения вызывало заметные измене-

ния в приповерхностных слоях образца, не затрагивая его объёма.

Поглощение света металлами происходит в результате передачи энергии фотона электронной составляющей скин-слоя  $\sim 15$  нм [24], что в нашем случае существенно перегревает электронную подсистему. За время электрон-ионной ре-

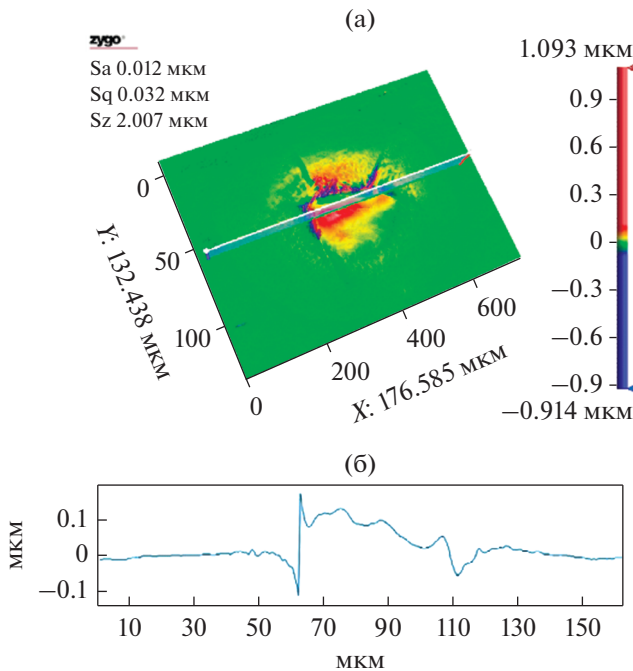


Рис. 3. Поверхность Cu–Cr после воздействия импульсами лазера: (а) 3D-изображение поврежденной зоны на поверхности образца; (б) 2D-профилограмма.

лаксации (2–3 пс) происходит передача поглощенной энергии фоновой подсистеме. Таким образом, объем приповерхностного слоя металла

нагревается за время действия лазерного импульса – 10 нс.

Качественные оценки, проведенные в работе [6], при использовании формулы (3), подкрепленные анализом микрофотографий исследованных образцов меди и ее сплавов, показывают, что за счет нагрева лазерным импульсом при  $E \sim 0.6\text{--}1.0$  Дж/см<sup>2</sup> удалось достичь в приповерхностном слое меди предплавленной температуры.

Пороговая плотность энергии плавления с учетом удельной теплоты плавления составляет [25]:

$$E_m(\tau) = \delta(\tau)\rho[C(T_m - T_{in}) + L_m], \quad (3)$$

где  $\delta(\tau)$  имеет физический смысл эффективной толщины скин-слоя, в котором происходит выделение поглощенной энергии лазерного импульса длительностью  $\tau$  в материале. Символами  $\rho$ ,  $C$ ,  $T_m$ ,  $T_{in}$ ,  $L_m$  обозначены плотность, удельная теплоемкость, температура плавления, начальная температура и скрытая теплота плавления материала, соответственно. В случае поверхностного нагрева:

$$\delta(\tau) = \frac{1}{2}(\pi\alpha\tau)^{1/2}. \quad (4)$$

Мы провели качественные оценки для меди с учетом уравнений (3) и (4) при  $C = 385$  Дж/(кг К),  $\rho = 8920$  кг/м<sup>3</sup>,  $\alpha = 1.2 \times 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с,  $T_m = 1356$  К,  $T_{in} = 293$  К,  $L_m = 204.7 \times 10^3$  Дж/кг [20] для  $\tau = 10$  нс. Получены следующие значения:  $\delta(\tau) = 971$  нм,  $E_m(\tau) = 0.59$  Дж/см<sup>2</sup> (с учетом отражения). Для

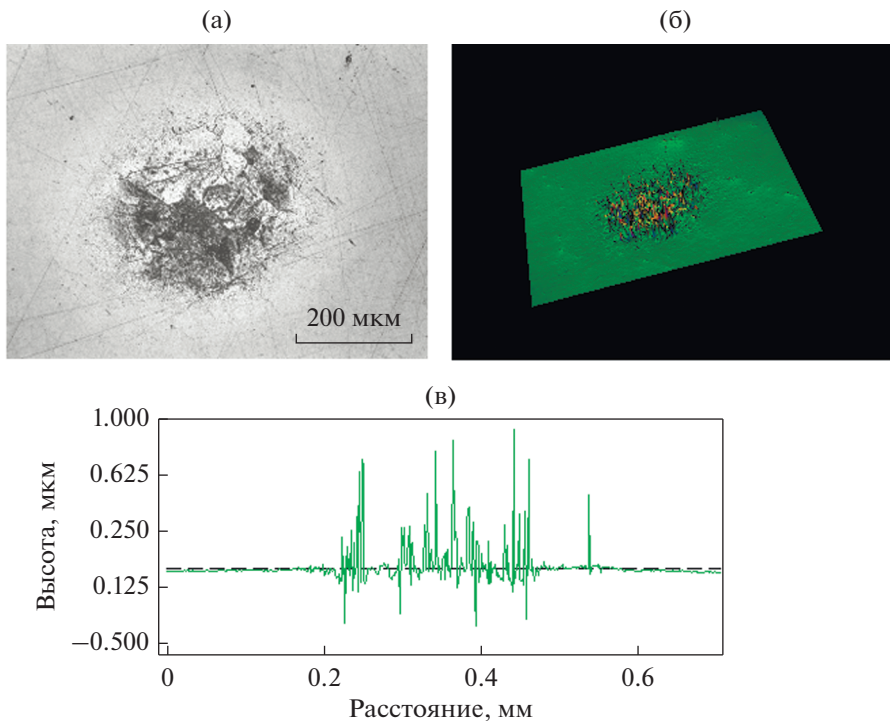
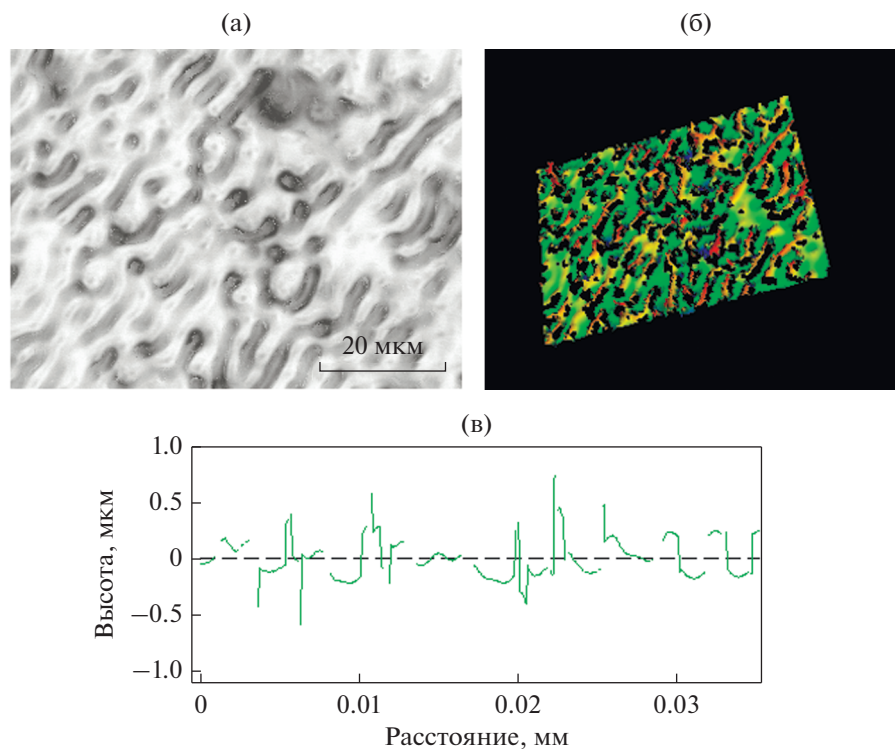


Рис. 4. Поверхность Cu–Cr после воздействия импульсами лазера: (а) микрофотография поврежденной зоны; (б) 3D-изображение; (в) 2D-профилограмма  $E = 0.83$  Дж/см<sup>2</sup>.



**Рис. 5.** Поверхность Cu–Cr после воздействия импульсами лазера: (а) микрофотография участка поврежденной зоны; (б) 3D-изображение; (в) 2D-профилограмма.

низколегированных сплавов, использовавшихся в данной работе, результат получается близкий.

Анализ микрофотографий и профилограмм позволяет сделать вывод, что в приповерхностном слое меди и ее низколегированных сплавов в результате воздействия наносекундных УФ-лазерных импульсов появляются следы высокотемпературной деформации.

Во второй половине 20 века поводились интенсивные исследования влияния различных импульсных воздействий на процесс пластической деформации в металлах, продолжающиеся и в настоящее время [26–29]. Выяснилось, что воздействие электромагнитными полями возбуждает электронную подсистему. Она передает энергию в фононную подсистему, создавая большое количество коротковолновых фононов. Они воздействуют на структурные дефекты (точечные, линейные, границы зерен и выделения различных фаз) кристаллической решетки, что способствует движению и перераспределению дефектов кристаллической решетки. Естественно, что эти микропроцессы, в итоге, реализуются в макропроцессах пластической деформации.

Так, были открыты электропластический [26] и магнитопластический [27, 28] эффекты. Аналогичное влияние имеет и акустопластический эффект [29].

При воздействии интенсивного лазерного излучения подобные эффекты также изредка наблюдались [30–34]. Однако эти результаты не носят систематический характер. Они получены на лазерах резко различающихся между собой по длине волны, длительности импульса, плотности энергии. Это обусловлено тем, что при исследовании воздействия лазерного импульса на твердые тела основное внимание уделялось значительно более эффективным и наглядным процессам расплавления и испарения, в значительной мере маскирующие эффекты воздействия лазерных импульсов на процессы пластической деформации [19].

Существуют интересные теоретические исследования Мирзаде о “нелинейных волнах деформации, взаимодействующих с лазерно-индуцированными носителями локального беспорядка”, обобщенные в главе 7 коллективной монографии [1]. Эти результаты, к сожалению, пока не нашли должного подтверждения экспериментальными исследованиями.

В работах [6, 35, 36] проведены достаточно подробные исследования воздействия наносекундных УФ-лазерных импульсов на процессы пластической деформации, происходящие в приповерхностном слое меди и ее низколегированных сплавов. Они обобщены и проанализированы в данной работе. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что в этом случае мы имеем де-

ло с процессами, сходными с электропластическим и магнитопластическим эффектами и, считаем справедливым назвать, по аналогии, обнаруженный эффект оптикопластическим.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Порог оптического пробоя при воздействии наносекундных УФ-лазерных импульсов на образцы меди и ее низколегированных сплавов в нашем эксперименте составлял  $\sim 1.0$  Дж/см<sup>2</sup>. В воздухе, вблизи поверхности образца, возникал эрозионный плазменный факел, а в образце появлялся кратер с явными следами расплавления и испарения металла.

В допороговом режиме в отсутствие явных следов плавления присутствуют следы высокотемпературной деформации. Они проявляются в виде результатов проскальзывания и растрескивания по границам зерен, а также следов кристаллографического скольжения внутри зерен. Поверхность металла в облученной зоне вспучивается. С ростом числа воздействующих импульсов происходит накопление повреждений. Высота возникшего поднятия может достигать 1 мкм, а иногда и несколько более.

Полученные результаты имеют сходство с электропластическим и магнитопластическим эффектами. По аналогии предлагается назвать обнаруженный эффект оптикопластическим.

Авторы выражают признательность акад. РАН В.Ю. Хомичу за полезные обсуждения, Межкафедральной учебно-испытательной лаборатории полупроводниковых материалов и диэлектриков НИТУ МИСиС “Монокристаллы и заготовки на их основе” (ИЛМЗ) за измерения коэффициентов отражения образцов, а также И.А. Каплунову и А.И. Ивановой за проведение электронно-микроскопического исследования.

Работа выполнена в рамках государственного задания по научной деятельности № 0057-2019-0005 с использованием ресурсов центра коллективного пользования Тверского государственного университета.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панченко В.Я. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 679 с.
2. Григорьянц А.Г., Мисюрюв А.И. Технологические процессы лазерной обработки. М.: МГТУ им Н.Э. Баумана, 2006. 664 с.
3. Ashitkov S.I., Komarov P.S., Ovchinnikov A.V., Struleva E.V., Zhakhovskii V.V., Inogamov N.A., Agranat M.B. Ablation and nanostructuring of metals by femtosecond laser pulses // *Quantum Electron.* 2014. V. 44. № 6. P. 535–539.
4. Ashitkov S.I., Romashevskii S.A., Komarov P.S., Burmistrov A.A., Zhakhovskii V.V., Inogamov N.A., Agranat M.B. Formation of nanostructures under femtosecond laser ablation of metals // *Quantum Electronics.* 2015. V. 45. № 6. P. 547–550.
5. Елкин В.Н., Малинский Т.В., Хомич Ю.В., Ямщиков В.А. Влияние предварительной лазерной обработки поверхности на механические свойства диффузионного сварного соединения железоникелевого сплава // *Физика и химия обр. материалов.* 2020. № 3. С. 40–47.
6. Малинский Т.В., Миколуцкий С.И., Роголин В.Е., Хомич В.Ю., Ямщиков В.А., Каплунов И.А., Иванова А.И. Пластическая деформация меди в результате воздействия мощного ультрафиолетового наносекундного лазерного импульса // *Письма в ЖТФ.* 2020. Т. 46. Вып. 16. С. 51–54.
7. Ваушков Ю.А., Демичев С.Ф., Еленев В.Д., Малинский Т.В., Миколуцкий С.И., Хомич Ю.В., Ямщиков В.А. Лазерная обработка поверхности металлических сплавов для диффузионной сварки // *Прикладная физика.* 2019. №1. С. 82–87.
8. Khomich Yu.V., Yamshchikov V.A. The effect of preliminary laser surface treatment on the mechanical properties of a solid-phase compound of an iron–nickel alloy in diffusion welding. / Chapter 6. *Advanced Materials. Proceedings of the International conference on Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications.* PHENMA, 2019. P. 61–71.
9. Ganin D.V., Mikolutskiy S.I., Tokarev V.N., Khomich V.Yu., Shmakov V.A., Yamshchikov V.A. Formation of micron and submicron structures on a zirconium oxide surface exposed to nanosecond laser radiation // *Quantum Electronics.* 2014. V. 44. № 4. P. 317–321.
10. Хомич В.Ю., Шмаков В.А. Механизмы и модели прямого лазерного наноструктурирования материалов // *УФН.* 2015. Т. 185. С. 489–499.
11. Khomich V.Yu., Urlichich Yu.M., Shmakov V.A., Tokarev V.N., Galstyan A.M., Mikolutskiy S., Malinskiy T.V., Ganin D.V. Formation of submicron structures on the surface of zirconium dioxide under illumination of nanosecond laser // *Inorganic Materials: Applied Research.* 2013. V. 4. № 3. P. 201–204.
12. Миколуцкий С.И., Хомич Ю.В. Влияние лазерного УФ излучения наносекундной длительности на структуру и адгезионные свойства металлов и сплавов // *ФММ.* 2021. Т. 122. № 2. С. 159–165.
13. Matsui I., Kawakatsu T., Takigawa Y., Uesugi T., Higashi K. Fabrication of bulk nanocrystalline Fe–Ni alloys with high strength and high ductility by an electrodeposition // *Mater. Let.* 2014. V. 116. P. 71–74.
14. Lu L., Shen Y., Chen X., Qian L., Lu K. Ultrahigh strength and high electrical conductivity in copper // *Science.* 2004. V. 304. P. 422–426.
15. Fraggelakis F., Mincuzzi G., Manek-Hönniger I., Lopez J., Klinga R. Generation of micro- and nanomorphologies on a stainless steel surface irradiated with 257 nm femtosecond laser pulses // *RSC Advance.* 2018. V. 8. P. 16082–16087.
16. Csizmadia T., Smausz T., Tápai C., Kopniczky J., Wang Xi, Ehrhardt M., Lorenz P., Zimmer K., Orosz L., Varga E., Oszkó A., Hopp B. Comparison of the production of

- nanostructures on bulk metal samples by picoseconds laser ablation at two wavelengths for the fabrication of low-reflective surfaces // *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*. 2015. V. 10. № 2. P. 110–118.
17. Железнов Ю.А., Малинский Т.В., Миколуцкий С.И., Хасая Р.Р., Хомич Ю.В., Ямщиков В.А. Обработка поверхности титана наносекундным лазерным излучением // *Письма о материалах*. 2014. Т. 4. № 1. С. 45–48.
  18. Luo F., Ong W., Guan Y., Li F., Sun S., Lim G.C., Hong M. Study of micro/nanostructures formed by a nanosecond laser in gaseous environments for stainless steel surface coloring // *Appl. Surface Sci.* 2015. V. 328. P. 405–409.
  19. Анисимов С.И., Имас Я.А., Романов Г.С., Ходыко Ю.В. Действие излучения большой мощности на металлы. М.: Наука, 1970. 272 с.
  20. Николаев А.К., Костин С.А. Медь и жаропрочные медные сплавы М.: ДПК Пресс, 2012. 715 с.
  21. Осинцев О.Е., Федоров В.Н. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки. Отечественные и зарубежные марки. Справочник. М.: Машиностроение. 2004. 337 с.
  22. Окатов М.А. Справочник технолога-оптика. С-Пб.: Политехника, 2004. 679 с.
  23. Либенсон М.Н., Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). /Конспект лекций под редакцией В.П. Вейко Часть I. Поглощение лазерного излучения в веществе. С-Пб. ИТМО, 2008. 143 с.
  24. Соколов А.В. Оптические свойства металлов. М.: Физматлит, 1961. 464 с.
  25. Токарев В.Н., Чешев Е.А., Малинский Т.В., Хомич Ю.В., Ямщиков В.А., Железнов Ю.А., Безотосный В.В., Артемов В.Г. Подавление нежелательного эффекта плазменного плавления боковых стенок скважины при лазерном сверлении // *Успехи прикладной физики*. 2013. Т. 1. № 6. С. 686–691.
  26. Спицын В.И., Троицкий О.А. Электропластическая деформация металлов. М.: Наука, 1985. 153 с.
  27. Карась В.И., Соколенко В.И. Неравновесная кинетика электрон-фононной подсистемы кристалла при действии переменных электрических и магнитных полей как основа электро- и магнитопластического эффектов // *УФН*. 2018. Т. 188. № 11. С. 1156–1177.
  28. Неклюдов И.М., Стародубов Я.Д., Соколенко В.И. Влияние магнитных полей на сопротивление пластической деформации кристаллических тел // *УФЖ*. 2005. Т. 50. № 8А. С. А113–А121.
  29. Тяпунина Н.А., Наими Е.К., Зиненкова Г.М. Действие ультразвука на кристаллы с дефектами. М.: Изд-во МГУ, 1999. 238 с.
  30. Ровинский Р.Е., Рогалин В.Е., Розенберг В.М., Теплицкий М.Д. Изменение структуры сплава медь-хром, облученного импульсом CO<sub>2</sub>-лазера // *Физ. и хим. обраб. матер.* 1980. №3. С. 7–11.
  31. Гуревич М.Е., Лариков Л.Н., Мазанко В.Ф., Погорелов А.Е., Фальченко В.М. Влияние многократного лазерного воздействия на массоперенос в металлах // *Металлофизика*. 1978. В. 73. С. 80–83.
  32. Рогалин В.Е. Оптическая стойкость медных зеркал для мощных импульсных ТЕА CO<sub>2</sub>-лазеров // *Материаловедение*. № 9. 2013. С. 34–42.
  33. Vogel K., Beckland P. Application of electron and optical microscopy in studying laser-irradiated metal surfaces // *Appl. Phys.* 1965. V. 36. P. 3697.
  34. Васильев С.В., Иванов А.Ю., Лиопо В.А. Изменения кристаллической структуры металлов под воздействием лазерного излучения // *ИФЖ*. 2007. Т. 80. № 5. С. 12–18.
  35. Khomich Yu., Malinskiy T., Rogalin V., I Kaplunov I., Ivanova A. Features of microrelief formation during laser treatment of Cu–Cr–Zr alloy surface for diffusion welding // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. V. 939. P. 012035.
  36. Khomich Yu.V., Malinskiy T.V., Mikolutskiy S.I., Rogalin V.E., Yamshchikov V.A., Kaplunov I.A., Ivanova A.I. Powerful ultraviolet laser pulse impact on polished metals and semiconductors // *J. Physics: Conference Series*. 2020. V. 1697. P. 012254.