

06.4;09

Пластическая деформация меди в результате воздействия мощного ультрафиолетового наносекундного лазерного импульса

© Т.В. Малинский¹, С.И. Миколуцкий¹, В.Е. Роголин^{1,¶}, Ю.В. Хомич¹, В.А. Ямщиков¹, И.А. Каплунов², А.И. Иванова²

¹ Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Тверской государственный университет, Тверь, Россия

[¶] E-mail: v-rogalin@mail.ru

Поступило в Редакцию 17 декабря 2019 г.

В окончательной редакции 15 мая 2020 г.

Принято к публикации 22 мая 2020 г.

Исследована модификация полированной поверхности бескислородной меди после воздействия жестко сфокусированным одиночным импульсом ультрафиолетового Nd:YAG-лазера. Выявлено, что при предпороговых плотностях энергии (при $E \sim 0.6 \text{ J/cm}^2$) в отсутствие заметных следов абляции наблюдалось необратимое поднятие поверхности металла в зоне облучения. При увеличении плотности энергии абляционные процессы заметно нивелируют этот эффект.

Ключевые слова: УФ-лазер, наносекундный импульс, порог оптического пробоя, абляция, термомодеформация.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.16.49856.18157

Наносекундные импульсы УФ-лазера способны модифицировать поверхность металла, существенно изменяя его поверхностные свойства [1–4]. Диффузионная сварка металлов, обработанных подобным образом, заметно улучшается благодаря интенсификации диффузионных процессов в зоне контакта соединяемых поверхностей [5]. Обычно основное внимание при воздействии лазерного излучения (ЛИ) уделялось исследованию явлений плавления, испарения и абляции [2,6–10] — процессам, сопряженным с переходом вещества в другое агрегатное состояние [3,6].

Однако иногда при воздействии импульсного ЛИ наблюдались необычные признаки возникновения различных нестационарных процессов, связанных с резко ускоренным перемещением ионов в объеме твердого тела [11–13]. Эти работы, проведенные с использованием лазеров с различающимися длинами волн ЛИ и длительностями импульсов, а также на различных материалах, не нашли должной теоретической интерпретации и недостаточно освещены в обзорах и монографиях.

В настоящей работе исследовалась полированная бескислородная медь после обработки наносекундными лазерными импульсами УФ-диапазона. Излучателем был импульсно-периодический Nd:YAG-лазер (третья гармоника, длина волны $\lambda = 355 \text{ nm}$, энергия в импульсе до 8 mJ при длительности $\tau = 10 \text{ ns}$). Полированная медь на длине волны $\lambda = 355 \text{ nm}$ поглощает $\sim 90\%$, тогда как на длине волны $\lambda = 1060 \text{ nm}$ — $3\text{--}4\%$ (спектры измерены в ИЛМЗ НИТУ „МИСиС“). Изменялись энергия и число воздействующих импульсов ЛИ. После воздействия ЛИ поверхность исследовалась на оптическом профилометре Zygo NewView 7300 и растровом электронном микроскопе (РЭМ) JEOL JSM 6610LV. Исходная шероховатость поверхности на участке, сопоста-

вимом с площадью лазерного пятна, составляла приблизительно $10\text{--}15 \text{ nm}$. На рис. 1, *a* приведена РЭМ-микрофотография образца после воздействия пяти импульсов с плотностью энергии $E \sim 0.6 \text{ J/cm}^2$, на рис. 1, *b* — после воздействия одного импульса с $E \sim 6.2 \text{ J/cm}^2$, на рис. 1, *c* — после воздействия пяти импульсов с $E \sim 2.3 \text{ J/cm}^2$. На рис. 2 представлены соответствующие профилограммы.

Анализ профиля поверхности меди после воздействия ЛИ показывает, что при $E \sim 0.6 \text{ J/cm}^2$ в отсутствие заметных следов абляции наблюдалось необратимое неравномерное поднятие поверхности металла в зоне облучения на несколько десятков нанометров (рис. 1, *a*, *2, a*). Профиль уровня такого поднятия приблизительно соответствует распределению лазерной энергии в пятне.

При $E \geq 1.0 \text{ J/cm}^2$ происходил оптический пробой, сопровождавшийся абляционными процессами, что в итоге привело к изменению структуры поверхностного слоя (рис. 1, *b*, *2, b*; $E \sim 6.2 \text{ J/cm}^2$). Профиль поверхности приобрел характерный для режима абляции резко неоднородный вид. Перепад высот составлял величину до нескольких микрометров. Зафиксированы следы плавления и частичного испарения поверхностного слоя с последующей быстрой кристаллизацией.

Анализ РЭМ-микрофотографий и оценки по приведенной далее формуле (1) позволили предположить, что за счет нагрева ЛИ при $E \sim 0.6 \text{ J/cm}^2$ удалось достичь на поверхности меди предплавленной температуры. Пороговая плотность энергии плавления с учетом удельной теплоты плавления составляет [14]:

$$E_m(\tau) = \delta(\tau)\rho[C(T_m - T_{in}) + L_m], \quad (1)$$

где $\delta(\tau)$ имеет физический смысл эффективной толщины слоя, в котором происходит выделение энергии лазер-

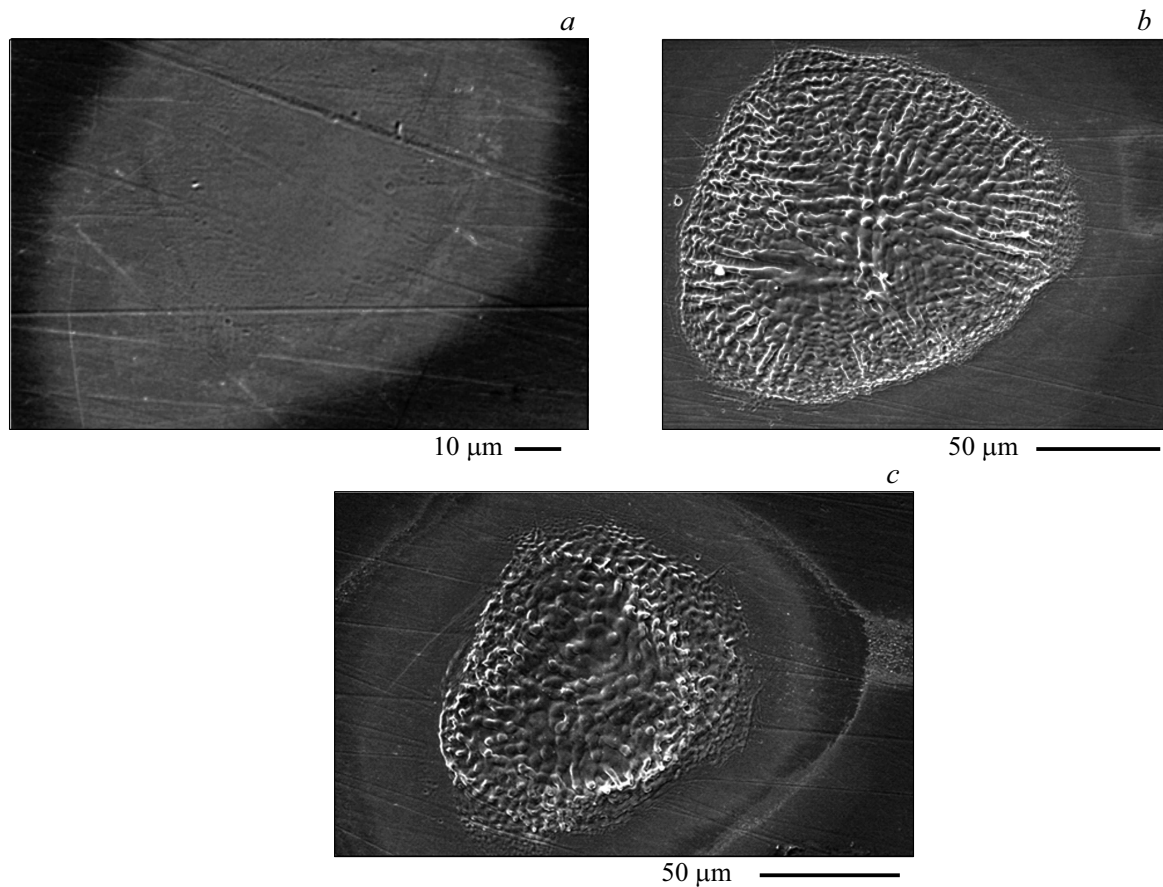


Рис. 1. РЭМ-микрофотография поверхности бескислородной меди после облучения Nd:YAG-лазером ($\lambda = 355$ nm): *a* — пять импульсов с $E \sim 0.6$ J/cm², *b* — один импульс с $E \sim 6.2$ J/cm², *c* — пять импульсов с $E \sim 2.3$ J/cm².

ного нагрева в материале во время импульса длительностью τ , а символами ρ , 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

$$\delta(\tau) = \frac{1}{2} (\pi a \tau)^{1/2}, \quad (2)$$

где a — температуропроводность материала.

Оценки для меди с учетом (1) и (2) при $C = 385$ J/(kg · K), $\rho = 8920$ kg/m³, $a = 1.2 \cdot 10^{-4}$ m²/s, $T_m = 1356$ K, $T_{in} = 293$ K, $L_m = 204.7 \cdot 10^3$ J/kg [15] для $\tau = 10$ ns дают следующие значения: $\delta(\tau) = 971$ nm, $E_m(\tau) = 0.53$ J/cm².

Эксперимент показал, что подъем поверхности стабильно наблюдался до появления оптического пробоя (при $E < 1.0$ J/cm²).

Проведена оценка высоты подъема поверхности, основанная на анализе протекания процесса необратимой термомодеформации меди вблизи поверхности при усредненной температуре поверхностного слоя меди $T \sim 1350$ K. За время длительности импульса τ тепло

распространяется на глубину h

$$h = 2\sqrt{a\tau} = 2.2 \mu\text{m},$$

где a — температуропроводность меди ($1.2 \cdot 10^{-4}$ m²/s [15]), $\tau = 10$ ns.

Поскольку произошел резкий нагрев локального облучаемого объема, его термическое расширение произошло преимущественно в направлении свободной поверхности. В этом случае величина поднятия Δh составляет

$$\Delta h = Kh(T - T_{in}) \approx 40 \text{ nm},$$

где K — коэффициент термического расширения меди ($17 \cdot 10^{-6}$ K⁻¹) [15], T_{in} — начальная температура, приблизительно равная 300 K.

Если допустить, что наблюдавшийся эффект имел накопительный характер, то после пяти импульсов поднятие поверхности может составить около 100–200 nm, что по порядку величины совпадает с данными проведенного эксперимента (рис. 1, *a*, *2, a*). С учетом того, что поднятие поверхности в пятне произошло за время τ , можно оценить скорость процесса, которая составила ~ 1 m/s.

К сожалению, получить данные о результатах воздействия большего числа импульсов предпороговой мощности на наши образцы пока не удалось, так как после

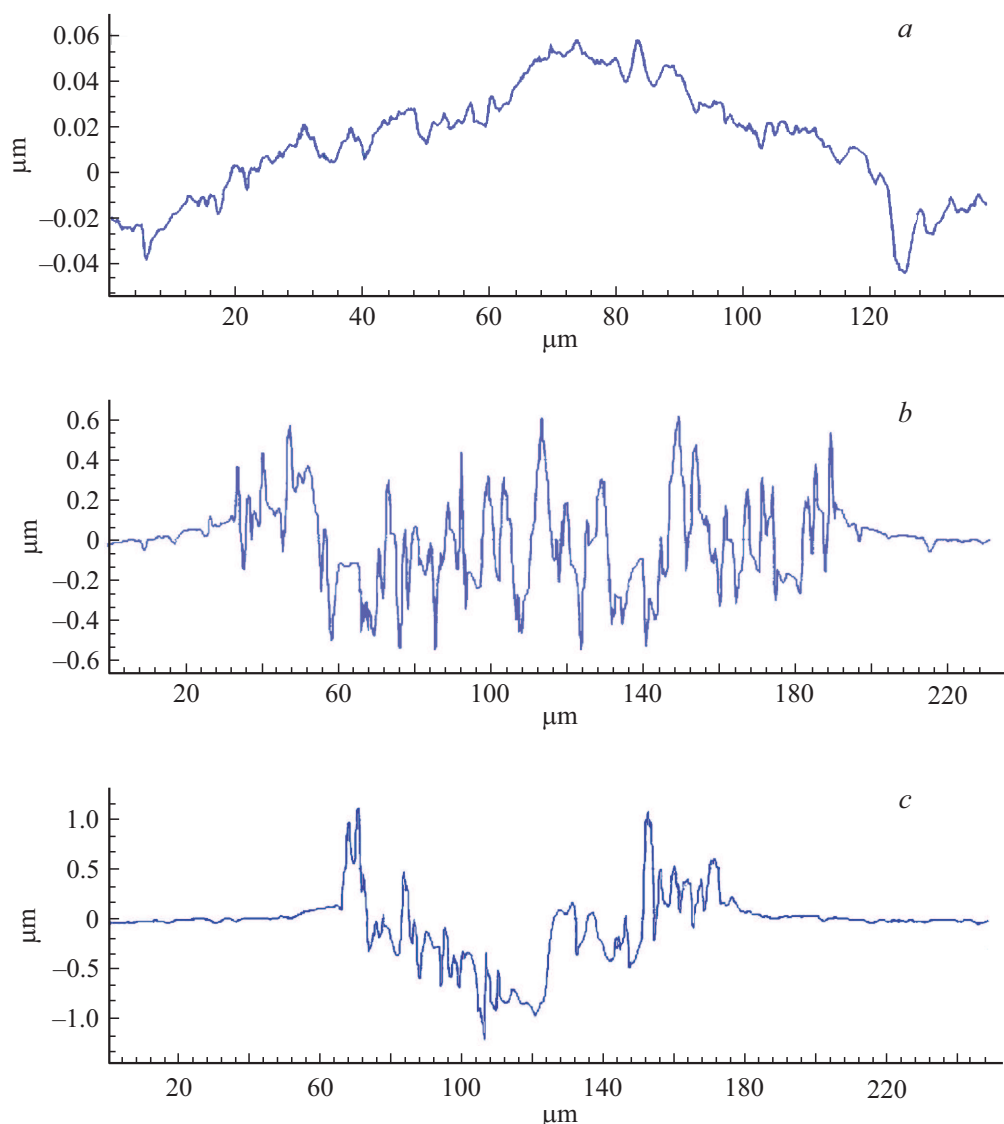


Рис. 2. Профиль поверхности меди в пятне облучения: *a* — пять импульсов с $E \sim 0.6 \text{ J/cm}^2$, *b* — один импульс с $E \sim 6.2 \text{ J/cm}^2$, *c* — пять импульсов с $E \sim 2.3 \text{ J/cm}^2$.

воздействия тремя-пятью импульсами при используемой мощности ЛИ, как правило, возникал оптический пробой с образованием абляционного слоя, резко изменяющего профиль поверхности. Мы предполагаем, что этот эффект может быть связан с созданием на первоначально полированной поверхности заметной неравномерности, снижающей порог оптического пробоя [16].

Дальнейшее увеличение как мощности воздействующих импульсов, так и их количества приводило к появлению заметного кратерообразования (рис. 1, *c* и 2, *c*).

На профилограммах и микрофотографиях (рис. 1, 2) отчетливо видно, что профиль поверхности в зоне воздействия ЛИ приобрел резко неравномерный характер. Продекорированы некоторые мелкие царапины и, по-видимому, некоторые другие дефекты приповерхностного слоя. В то же время часть мелких царапин, проходящих через облученную область, в зоне воздействия не

наблюдалась. Резкий рост шероховатости, видимо, обусловлен температурной активацией структурных дефектов металла (дислокаций, границ зерен и др.), вызвавшей их движение в сторону свободной поверхности, что в итоге привело к пластической деформации. Возможно, как и в работе [11], произошла передача части энергии лазерного импульса в кристаллическую решетку металла и в наблюдавшемся явлении принимает участие и объем образца.

Таким образом, при воздействии ЛИ на полированную поверхность меди обнаружены два процесса, частично компенсирующие друг друга. Это абляция материала в зоне воздействия при $E \geq 1.0 \text{ J/cm}^2$ и не наблюдавшийся ранее эффект неравномерного поднятия поверхности меди в этой зоне при $E \sim 0.5\text{--}1.0 \text{ J/cm}^2$. С увеличением количества импульсов происходило кратерообразование в зоне воздействия.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Fraggelakis F., Mincuzzi G., Manek-H'onninger I., Lopez J., Klinga R.* // RSC Adv. 2018. V. 8. N 29. P. 16082–16087.
- [2] *Csizmadia T., Smausz T., Tápai C., Kopniczky J., Wang X., Ehrhardt M., Lorenz P., Zimmer K., Orosz L., Varga E., Oszkó A., Hopp B.* // J. Laser Micro/Nanoeng. 2015. V. 10. N 2. P. 110–118.
- [3] *Железнов Ю.А., Малинский Т.В., Миколуцкий С.И., Хасая Р.Р., Хомич Ю.В., Ямицков В.А.* // Письма о материалах. 2014. Т. 4. № 1. С. 45–48.
- [4] *Luo F., Ong W., Guan Y., Li F., Sun S., Lim G.C., Hong M.* // Appl. Surf. Sci. 2015. V. 328. P. 405–409.
- [5] *Вашуков Ю.А., Демичев С.Ф., Еленев В.Д., Малинский Т.В., Миколуцкий С.И., Хомич Ю.В., Ямицков В.А.* // Прикладная физика. 2019. № 1. С. 82–87.
- [6] *Хомич В.Ю., Шмаков В.А.* // УФН. 2015. Т. 185. № 5. С. 489–499.
- [7] *Гуренцов Е.В., Еремин А.В., Мусихин С.А.* // ЖТФ. 2019. Т. 89. В. 8. С. 1200–1207.
- [8] *Старинский С.В., Шухов Ю.Г., Булгаков А.В.* // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. В. 8. С. 45–52.
- [9] *Khotich V.Yu., Urlichich Yu.M., Shmakov V.A., Tokarev V.N., Galstyan A.M., Mikolutskiy S., Malinskiy T.V., Ganin D.V.* // Inorganic Mater.: Appl. Res. 2013. V. 4. N 3. P. 201–204.
- [10] *Вейко В.П., Скворцов А.М., Конг Т.Х., Петров А.А.* // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 14. С. 79–87.
- [11] *Ровинский Р.Е., Рогалин В.Е., Розенберг В.М., Теплицкий М.Д.* // Физика и химия обраб. материалов. 1980. № 3. С. 7–11.
- [12] *Гуревич М.Е., Лариков Л.Н., Мазанко В.Ф., Погорелов А.Е., Фальченко В.М.* // Металлофизика. 1978. В. 73. С. 80–83.
- [13] *Veigel K., Beckland P.* // J. Appl. Phys. 1965. V. 36. N 12. P. 3697–3701.
- [14] *Токарев В.Н., Чешев Е.А., Малинский Т.В., Хомич Ю.В., Ямицков В.А., Железнов Ю.А., Безотосный В.В., Артемов В.Г.* // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 6. С. 686–691.
- [15] *Николаев А.К., Костин С.А.* Медь и жаропрочные медные сплавы М.: ДПК Пресс, 2012. 715 с.
- [16] *Бломберген Н.* // Квантовая электроника. 1974. Т. 1. № 4. С. 786–805.