

06.4;13.3

Особенности структурирования поверхности металла фемтосекундными лазерными импульсами высокой мощности

© И.О. Явтушенко, М.С. Явтушенко, И.О. Золотовский,
С.Г. Новиков, А.В. Беринцев, А.С. Кадочкин,
Д.А. Столяров, Б.Б. Костишко, Н.А. Бунаков

Ульяновский государственный университет
Научно-исследовательский технологический институт им. С.П. Капицы,
Ульяновск
E-mail: yavigor@mail.ru

Поступило в Редакцию 2014 г.

Представлены особенности модификации поверхности инструментальной стали 9ХС фемтосекундными лазерными импульсами с большой частотой следования (1МГц) и высокой пиковой мощностью. Для случая *p*-поляризации падающего излучения зафиксировано скругление несплошных линейных микроструктур, сдваивающихся при увеличении угла разориентации с вектором поляризации.

Известно, что взаимодействие мощного лазерного излучения ультракороткой длительности с поверхностью твердого тела может приводить к эффектам электронной эмиссии [1], возникновению поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ) [2], процессам абляции и структурирования поверхности материалов [3]. Фундаментальность происходящих процессов [4], а также прикладная привлекательность получаемых результатов [5,6] определяют большое количество научных работ, посвященных данной тематике [2–7]. Лазерное микро- и наноструктурирование поверхности различных материалов [2] возможно благодаря эффектам, связанным с возникновением на границе раздела материалов ПЭВ, которые могут интерферировать с первичным излучением и приводить в итоге к образованию поверхностных периодических и разупорядоченных структур [8]. При этом в зоне облучения могут наблюдаться подплавление, абляция и изменение структуры поверх-

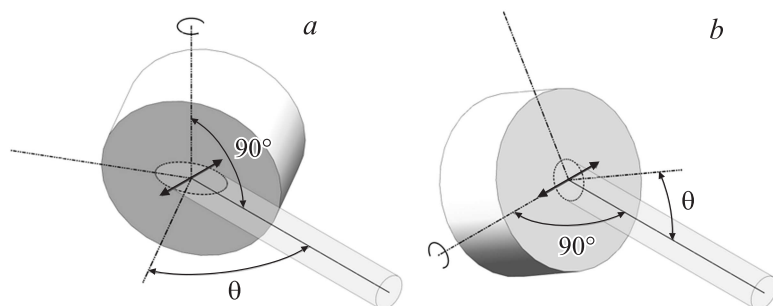


Рис. 1. Схема облучения образца. При повороте образца вокруг одной из осей на угол θ (угол между лазерным лучом и нормалью к поверхности) образуется вытянутое фокусное пятно. Вектор поляризации: *a* — параллелен плоскости падения (*p*-поляризация); *b* — перпендикулярен плоскости падения лазерного луча (*s*-поляризация).

ности — образование микрорельефа [3]. Указанные эффекты могут лежать в основе массы приложений в микросенсорике, нанопотонике и нанотехнологиях и имеют важное фундаментальное значение.

Целью данной работы является выявление факторов, определяющих структурную перестройку поверхности металла под воздействием фемтосекундных лазерных импульсов высокой мощности. В качестве экспериментальных образцов использовались цилиндры из стали 9ХС (твердость по Виккерсу, определенная при помощи микротвердомера Qness Q10M, составила $HV = 250$) высотой 15 mm и диаметром 20 mm. Выбор инструментальной стали 9ХС сделан по причине ее широкого использования для создания инструментов и деталей машин, а лазерная обработка позволяет улучшить их характеристики [9].

Облучаемая поверхность (торец цилиндра) предварительно подвергалась механической полировке с использованием шлиф-порошка ($30\mu\text{m}$) и пасты ГОИ. Подготовленная поверхность облучалась итербиевым волоконным лазером FIANIUM со следующими характеристиками: длина волны $\lambda = 1064\text{ nm}$, частота следования импульсов $\nu = 1\text{ MHz}$, длительность импульса $\tau = 300\text{ fs}$; средняя мощность до 2 W, диаметр пучка 2 mm, расходимость пучка 2 mrad; пучок линейно поляризован (*p*-поляризация). Фокусировка лазерного луча на поверхность образца осуществлялась при помощи кварцевой линзы

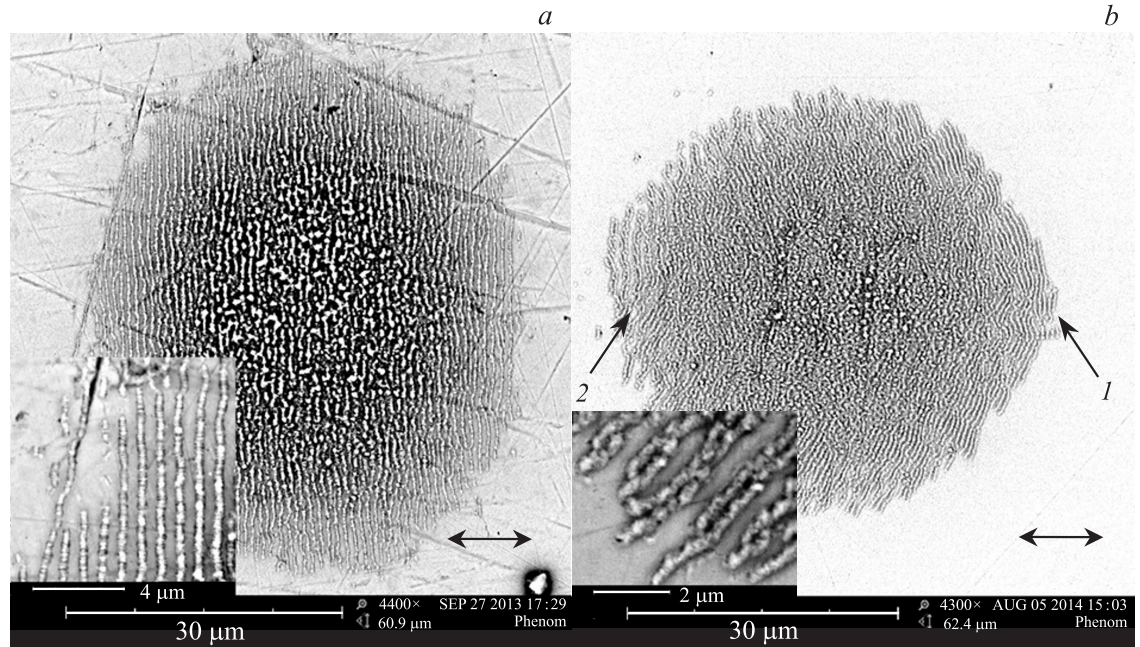


Рис. 2. Снимки области лазерного облучения образцов стали 9ХС. Плотность мощности излучения $2 \cdot 10^6 \text{ W/cm}^2$, время облучения 5 с, *p*-поляризация падающей волны. Углы падения: *a* — $\theta = 0^\circ$; *b* — $\theta = 20^\circ$ (*1* — область скругления и *2* — область сдвигания). На вставках увеличенная область: *a* — левая верхняя четверть; *b* — левая нижняя четверть изображения. Двойной стрелкой указано направление вектора поляризации излучения.

с фокусным расстоянием $f = 100$ mm, расположенной на расстоянии 130 mm от излучателя. Образцы закреплялись на трехкоординатном поворотном столике, который перемещался для фокусировки пучка на плоскости образца и ее контролируемого вращения вокруг двух взаимно перпендикулярных осей (рис. 1). Снимки поверхности образца осуществлялись с помощью сканирующего электронного микроскопа PHENOM PRO-X.

Формирование микрорельефа при лазерном облучении сверхкороткими импульсами, как это было показано нами ранее в [10], носит пороговый характер: структурирование поверхности происходит при превышении пороговой поглощенной дозы излучения. При фиксированном времени обработки $t = 5$ s, при плотности излучения $Q = 1.2 \cdot 10^6$ W/cm² на поверхности начинает формироваться микрорельеф, который уже при $Q = 1.3 \cdot 10^6$ W/cm² охватывает всю зону облучения. Наблюдаемая при этом одномерная периодическая структура (в виде дорожек), сформированная нормально падающим лазерным лучом, ориентирована перпендикулярно плоскости поляризации излучения (рис. 2, *a* и вставка). Исследования профиля структурированной поверхности при помощи атомно-силового микроскопа (АСМ) Solver P47-PRO полуконтактным методом показали, что данные области возвышаются над исходной поверхностью образца в среднем на 150 nm. Период наблюдаемой структуры составляет 980 nm, что меньше длины волны используемого излучения $\lambda = 1064$ nm, и практически не зависит от мощности излучения. С увеличением плотности мощности излучения в центральной области пятна на поверхности металла происходит постепенное разрушение линейного рельефа и образование неупорядоченной структуры. Кроме того, зафиксировано образование наложенного периодического микрорельефа вдоль формирующихся линейных дорожек металла, при этом период данных структур на порядок меньше длины волны.

Наиболее распространенной моделью, описывающей образование лазерно-индуцированных поверхностных периодических структур, в настоящее время является плазмон-поляритонная модель (ППМ), основывающаяся на интерференции возбужденных поверхностных плазмон-поляритонов с падающим излучением [2]. Период подобных структур зависит от длины волны применяемого лазерного излучения и угла падения [11], а формирующиеся в зоне облучения дорожки „выстраива-

ются“ в зависимости от ориентации плоскости поляризации лазерного излучения [7,8,12].

Особенностью используемого нами волоконного лазера является высокая частота следования импульсов, что приводит к ряду особенностей структурирования поверхности металлов. Так, в работах [5–8] использовались лазеры с низкочастотными импульсными режимами (от единиц до десятков герц); при этом структурированная поверхность представляла собой чередование плотно прилегающих друг к другу „вспученных“ относительно исходной поверхности материала дорожек, которые заполняли всю зону облучения. В нашем же случае высокочастотного импульсно-периодического облучения образца ($\nu = 1$ МГц), при плотности излучения $Q = 1.2 \cdot 10^6$ Вт/см², наблюдается иная картина: на неизменной поверхности образца возникают периодические дорожки модифицированного (вспученного) металла с нетронутыми областями между ними (рис. 2, а, вставка). В рамках ППМ период таких структур для p -поляризованного падающего излучения может быть описан следующим выражением ([7]):

$$d = \frac{\lambda}{(\lambda q_p / 2\pi) \pm \sin \theta}, \quad (1)$$

где λ — длина волны падающего излучения, θ — угол падения, c — скорость света в вакууме, q_p — волновое число поверхностного плазмон-поляритона. Если облучаемый материал (металл) имеет толщину, много большую, нежели длина волны облучающего лазера, то выражение для волнового числа поверхностного плазмон-поляритона принимает вид [13]

$$q_p = (\omega/c) \sqrt{|\epsilon_m| \epsilon_1 / (|\epsilon_m| - \epsilon_1)}, \quad (2)$$

где ϵ_1 — диэлектрическая проницаемость среды, граничащей с облучаемым металлом, а ϵ_m — диэлектрическая проницаемость металла. В случае падения излучения из вакуума (воздуха), т.е. при $\epsilon_1 = 1$ и $|\epsilon_m| \gg 1$ (что имеет место в рассматриваемом случае), для волнового числа плазмон-поляритона справедливо выражение $q_p \cong \omega/c$, и выражение (1) приходит к виду

$$d = \lambda / (1 \pm \sin \theta). \quad (3)$$

Теоретическая зависимость (3) изменения периода микрорельефа d от угла падения θ для случая p -поляризации падающего излучения (рис. 1, *a*) согласуется с экспериментальными результатами, что позволяет сделать заключение о справедливости данной ППМ в рассматриваемой ситуации.

Отметим следующее: при малых углах падения в случае p -поляризации наблюдается постепенное уменьшение периода рельефа согласно (3), однако вместе с этим происходит и изменение конфигурации рельефа. Так, уже при угле $\theta = 10^\circ$ происходит постепенное „скругление“ линейного рельефа с центром на оси вращения образца (область 1 на рис. 2, *b*). При углах более 20° наблюдается формирование сдвоенных линий микрорельефа с волноподобной конфигурацией (область 2 на рис. 2, *b*), период которых превышает исходный (линейный) примерно в 2 раза. Между этими сближенными образованиями по-прежнему располагается немодифицированная поверхность металла (рис. 2, *b* и вставка). Данное явление, описанное, насколько нам известно, впервые, может быть связано с возникновением нелинейно-оптических явлений в лазерном поле высокой мощности, а именно с влиянием высших гармоник, приводящим к наложению формируемых ими картин.

При переходе к s -поляризации падающей волны (рис. 1, *b*) вектор напряженности электрического поля не меняет своей ориентации при изменении угла падения, поэтому зависимость периода микрорельефа от угла падения отсутствует. Происходит постепенная разориентация линейного периодического рельефа в хаотически расположенные длинномасштабные структурные образования с полным их исчезновением при углах более 70° .

Следующая серия экспериментов была посвящена исследованию влияния времени экспозиции на процесс структурирования поверхности металла. На рис. 3 представлена динамика разрушения структуры с увеличением продолжительности лазерного облучения. Так, при воздействии на образец в течение времени $t = 5$ с с плотностью мощности излучения $Q = 2 \cdot 10^6$ W/cm² (рис. 2, *a*) видна сформированная одномерная периодическая структура — параллельные дорожки модифицированного металла, ориентированные перпендикулярно плоскости поляризации излучения, а также зарождающаяся в центре облучаемой области разупорядоченная структура. При времени воздействия $t = 10$ с с той же плотностью мощности $Q = 2 \cdot 10^{-6}$ W/cm² сформированные ранее дорожки „распухают“, на них появляются поперечные трещины,

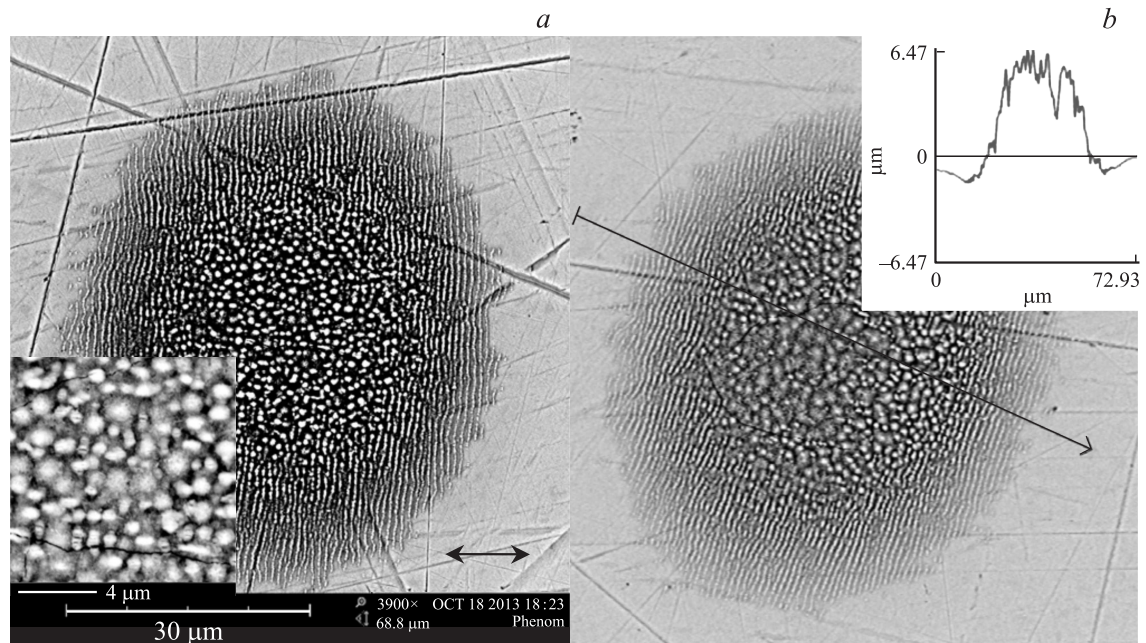


Рис. 3. Модификация структуры поверхности образцов стали 9ХС при плотности мощности лазерного излучения $2 \cdot 10^6 \text{ W/cm}^2$ со временем облучения t : a — 60 s, b — 300 s. На вставках: a — центральная область изображения; b — центральное сечение пятна. Двойной стрелкой указано направление вектора поляризации излучения.

затем они дробятся на отдельные возвышенности, и периодичность нарушается. Облучение в течение $t = 60$ s приводит к образованию отдельных островков разрушенных дорожек и зарождению на поверхности металла термоиндуцированных трещин (рис. 3, *a* и вставка). Подобную динамику микрорельефа можно объяснить тем, что в силу большой средней мощности используемого лазерного излучения в центре „следа“ воздействия происходит расплавление металла, частично разрушающее интерференционную плазмон-поляритонную структуру за счет перераспределения расплава под действием градиента давления (испарительного, капиллярного, термокапиллярного, связанного с действием эффекта Марангони и т.д. [7,12]). На этой стадии структура поверхности практически утрачивает ориентацию, связанную с поляризацией лазерного излучения. Увеличение длительности воздействия до 300 s приводит к формированию еще более развитой дефектной структуры и росту трещин на поверхности (рис. 3, *b*). Образование данных особенностей сопровождается непрерывным вертикальным ростом (распуханием) облученного участка за счет материала близлежащих областей.

Особенности топологии данной структуры представлены на вставке рис. 3, *b*. Трехмерное изображение, восстановленное с помощью инструментария электронного микроскопа, подтверждает, что в результате обработки „вырастает“ новая структура. Профиль структуры, представленный на вкладке, позволяет заключить, что она образуется в кратере и вырастает над поверхностью исходного материала. Также необходимо отметить, что высота всей структуры с увеличением времени обработки возрастает. Так, если периодическая структура, полученная при обработке в течение $t = 5$ s, имела высоту порядка 150 nm, то увеличение времени обработки до 2 min привело к росту ее высоты до 6.5 μ m (вставка рис. 3, *b*), нарушению периодичности и зарождению трещин.

Таким образом, лазерное структурирование металлических образцов в зависимости от времени экспозиции и мощности облучения упрощенно можно описать как трехстадийный процесс: 1) образование периодической структуры, вызванное генерацией поверхностных плазмон-поляритонов; 2) частичное разрушение периодической структуры, связанное с расплавлением в области фокусного пятна; 3) развитие рельефной структуры (не зависящей от направления поляризации), масштаб которой определяется конкурирующим влиянием неустойчивостей разных типов, и появление микротрещин. Поворот образца относительно вектора поляризации излучения приводит к изменению конфигурации

образующихся структур: скругление изначально параллельных дорожек при увеличении угла с дальнейшим их сдвиганием.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, проект № 14.Z50.31.0015, гранта РФФИ № 14-32-50507, в рамках государственного задания Минобрнауки России.

Список литературы

- [1] Рэди Дж. Действие мощного лазерного излучения. М.: Мир, 1974. 468 с.
- [2] Баженов В.В., Бонч-Бруевич А.М. и др. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. В. 24. С. 1520–1527.
- [3] Макаров Г.Н. // УФН. 2013. Т. 183. № 7. С. 673–718.
- [4] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 720 с.
- [5] Степихова М.В., Жигунов Д.М., Шегуров В.Г. // Письма в ЖЭТФ. 2005. Т. 81. В. 10. С. 614–617.
- [6] Лазеры и технология. Сб. / Под ред. М.Ф. Стельмаха. М.: Энергия, 1975. 182 с.
- [7] Макин В.С., Макин Р.С., Воробьев А.Я., Чунлей Гуо // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 9. С. 55–64.
- [8] Емельянов В.И., Байдуллаева А. и др. // Квантовая электроника. 2008. № 38(3). С. 245–250.
- [9] Бирюков В. // Фотоника. 2011. № 3. С. 34–37.
- [10] Явтушенко И.О., Кадошкин А.С. и др. // Изв. СНЦ РАН. 2013. Т. 15. № 4(5). С. 1033–1037.
- [11] Громов Г.Г., Уфимцев В.Б. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. В. 10. С. 580–582.
- [12] Ахманов С.А., Емельянов В.И. и др. // УФН. 1985. Т. 147. № 4. С. 675–745.
- [13] Федянин Д.Ю., Арсенин А.В. и др. // Квантовая электроника. 2009. Т. 39. № 8. С. 745–750.