УДК 537.9, 53.043, 535.016

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СТРУКТУРИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ

© 2013 И.О. Явтушенко, А.С. Кадочкин, С.Г. Новиков, А.В. Беринцев, Д.А. Столяров

Научно-исследовательский технологический институт Ульяновского государственного университета

### Поступила в редакцию 26.11.2013

В работе представлены результаты модификации поверхности инструментальной стали 9ХС фемтосекундными лазерными импульсами высокой мощности. Определены режимы получения трех типов поверхностных структур: периодической, равномерно распределенной и высокопористой. Отмечены особенности влияния мощности и времени облучения на структуру поверхности металла. Ключевые слова: структурирование поверхности, лазер, фемтосекундные импульсы

В настоящее время, с появлением новых высокоэффективных источников мощных ультракоротких (пико- и фемтосекундных) лазерных импульсов, разработка и внедрение технологий лазерного модифицирования поверхностей твердых тел, генерации наночастиц, нано и микроструктурирование становятся востребованными для различных применений лазерной технологии в промышленности.

В частности, технологии обработки материалов ультракороткими лазерными импульсами используются для создания сложных микро- и наноструктур в диэлектриках, полупроводниках, металлах и сплавах при производстве приборов опто- и наноэлектроники, в технологиях хранения информации, в методиках управления механическими и оптическими свойствами твердых тел, в биомедицинских применениях, а также для научных исследований метаматериалов и плазмонных устройств [1].

Кроме указанных применений, подобные технологии представляют интерес для широкого использования в машиностроении [2]. Возможность упрочнения, изменения поверхностных свойств (смачивание, электропроводность, коэффициены отражения и др.), локального изменения химических составов материалов, инструментов и деталей машин [3–5] открывают широкие перспективы для развития уникальных промышленных лазерных микро и нанотехнологий.

В этой связи становится актуальным изучение не только физических механизмов взаимодействия ультракороткого оптического излучения с поверхностью металлов и сплавов, но и поиск, определение и получение оптимальных режимов (интенсивности и длительности лазерных импульсов, частоты следования, параметров сканирования лазерного пучка) для контролируемого микро- и наноструктурирования поверхностей объёмных материалов и модифицирование с использованием лазерных импульсов с различными параметрами исходных механических свойств и качества поверхности облучаемого материала.

Целью данной работы является определение оптимальных режимов лазерной обработки инструментальной стали 9XC с помощью фемтосекундных импульсов высокой мощности для получения упорядоченной микроструктуры. Выбор объекта исследования и реализации технологии инструментальной стали 9XC сделан по причине ее широкого распространения и применения для создания инструментов и деталей машин широкого назначения.

Схема эксперимента представлена на рис. 1. В качестве экспериментальных образцов использовались цилиндры высотой 15 мм и диаметром 20 мм, торцы которых располагались перпендикулярно падающему лазерному излучению. Облучаемая поверхность (торец цилиндра) предварительно подвергалась механической полировке с использованием шлиф порошка (30мкм) и пасты ГОИ. На подготовленную поверхность направлялся пучок от источника лазерного излучения, в качестве которого использовался иттербиевый (Yb) волоконный лазер с рабочей длиной волны  $\lambda = 1064$  нм, частотой следования

Явтушенко Игорь Олегович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник.

E-mail: yavigor@mail.ru

Кадочкин Алексей Сергеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник.

E-mail: askadochkin@sv.ulsu.ru

Новиков Сергей Геннадьевич, кандидат технических наук, начальник лаборатории твердотельной электроники. E-mail: novikovsg@ulsu.ru

Беринцев Алексей Валентинович, инженер-конструктор. E-mail: berints@mail.ru

Столяров Дмитрий Александрович, младший научный сотрудник, acnupaнm. E-mail: dmitreyst@gmail.com



Рис. 1. Схема экспериментальной установки для облучения образцов

импульсов  $\nu = 1$  МГц, длительностью импульсов  $\tau = 300$  фс и средней мощностью до 2 Вт. Лазерное излучение (диаметр пучка 2мм, расходимость пучка 2 мрад) с линейной поляризацией фокусировалось при помощи кварцевой линзы с фокусным расстоянием f=100мм, расположенной на расстоянии 130 мм от излучателя. Цилиндры закреплялись на двухкоординатном столике, который использовался для фокусировки пучка на торце образцов и для получения необходимого сдвига в пределах фокусного расстояния для получения серии отпечатков с разными параметрами облучения.

Облучение образцов проводилось при различных мощностях P и количестве воздействующих импульсов (длительности обработки t), что позволило определить наиболее оптимальные параметры обработки металла для создания развитой периодической структуры.

В первой серии экспериментов исследовалось влияние мощности излучения при фиксированном времени обработки t=5 с, что соответствует воздействию примерно  $N=5\cdot10^6$  импульсов. Было установлено, что уже при мощности излучения P=1.15 Вт на поверхности стали начинают формироваться островки структурирования, которые при P=1.27 Вт охватывают всю облучаемую площадь. При этом четко прослеживается периодическая структура с постоянной ориентацией перпендикулярно вектору поляризации излучения (рис. 2). На вставках рисунков представлены отдельные участки зоны облучения, из которых вид-



**Рис. 2.** Снимки области лазерного облучения образцов стали 9ХС при различных мощностях излучения: a – 1.15, b – 1.27, c – 1.53, d –1.9 Вт

но, что на фоне неизмененной поверхности стали возникают периодические дорожки модифицированного металла. При проведении исследований профиля модифицированной поверхности при помощи атомно-силового микроскопа (ACM) Solver P47-PRO полуконтактным методом установлено, что данные области возвышаются над основной поверхностью образца в среднем на 150 нм. На рис. 3 приведены АСМ-снимки данных участков. Наличие участков обрабатываемого материала, возвышающихся над поверхностью основного материала позволяют говорить о сложных процессов абляции и анизотропной конденсации материала протекающих во время обработки. Период наблюдаемой структуры составляет величину порядка 850 нм, что меньше длины волны используемого излучения  $\lambda = 1064$  нм, и практически не зависит от мощности излучения. Однако, с её увеличением в центральной области пятна на поверхности металла происходит постепенное разрушение структурированной поверхности и образование иной развитой структуры (рис. 2d).

Вторая серия экспериментов была посвящена исследованию процесса модификации структуры поверхности металла при различном числе воздействующих импульсов. На рис. 4 представлена динамика разрушения структуры с увеличением длительности воздействия. Снимки получены с помощью сканирующего электронного микроскопа РНЕNOM PRO-Х. Так, при воздействии на образец в течение времени t=5 с со средней мощностью *P*=1.9 Вт (рис. 2d) видна сформированная периодическая структура - параллельные дорожки модифицированного металла, направленные перпендикулярно плоскости поляризации излучения, а также зарождающаяся в центре облучаемой области разупорядочная структура. В результате воздействия излучения длительностью t=10 с и мощностью Р=1.9 Вт сформированные ранее дорожки «распухают» (рис. 4а), на них появляются поперечные трещины, затем они дробятся на отдельные возвышенности, а периодичность нарушается. После облучения длительностью *t*=60 с прослеживаются отдельные островки разрушенных дорожек и проявляется последующая модификация структуры поверхности металла, сопровождаемая образованием термоиндуцированных трещин (рис. 4b). Увеличение длительности воздействия до 300 с приводит к формированию еще более развитой структуры и росту трещин на поверхности (рис. 4с и 4d). Образование данных особенностей сопровождается непрерывным вертикальным ростом облученного участка за счет ма-



Рис. 3. Изображение облученной поверхности, полученное методами АСМ



**Рис. 4.** Модификация структуры поверхности образцов стали 9XC со временем лазерного облучения t: а –10с, b–60с, с, d–300с

териала близлежащих областей, особенности топологии данной структуры, восстановленные при помощи сканирующего электронного микроскопа PHENOM PRO-Х представлены на рисунке 5. Трехмерное изображение восстановленное с помощью инструментария электронного микроскопа подтверждает, что в результате обработки «вырастает» новая структура. Профиль структуры, представленный на вкладке, позволяет заключить, что структура 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 с имела высоту порядка 150 нм (рис. 3), то увеличение времени обработки до 2 минут привело к увеличению её высоты 6.5 мкм (рис. 5), сопровождающейся нарушением периодичности и зарождением трещин.

Полученные результаты качественно согла-

суется с результатами работ [6, 7], в которых наблюдается формирование периодической структуры на поверхности различных веществ, облучённых лазерными импульсами фемтосекундной длительности. Так, в работе [6] отмечается, что на поверхности облучаемого образца формируется периодическая структура, период которой меньше длины волны падающего излучения. По мнению авторов работы [6] данный эффект связан со взаимодействием подающего импульса с возникающей под действием этого импульса поверхности поверхностной плазмонной волной. Параметры образующейся структуры при этом зависят как от параметров падающего импульса (энергия, длительность), так и от свойств вещества (показатель преломления). Определение данных зависимостей для различных веществ является предметом дальнейших исследований.

Таким образом, на основании полученных экспериментальных результатов можно сделать



Рис. 5. Изображение топологии облученной области.

следующие выводы: лазерное облучение металлических образцов, может приводить к формированию трех типов (периодических, непериодических и высокопористых) поверхностных структур, в зависимости от числа воздействующих импульсов и мощности излучения. Для формирования периодической структуры оптимальным является облучение образца импульсами со средней мошностью Р=1.4 Вт в течение 5-10 с. Полное разрушение сформированных дорожек происходит после облучения длительностью от 60 до 200 с, при этом, на поверхности образуется равномерно распределенная структура, представленная образованиями, возвышающимися над основной поверхностью металла. Дальнейшее увеличение длительности воздействия лазерного излучения приводит к кардинальной перестройке поверхности с образованием высокопористой структуры, сопровождающейся зарождением и ростом термоактивированных микротрещин. Анализ физико-механических свойств образующихся структур представляет особый интерес и является задачей наших дальнейших исследований.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Макаров Г. Н. Применение лазеров в нанотехнологии: получение наночастиц и наноструктур методами лазерной абляции и лазерной нанолитографии // УФН. 2013. Т.183, №7. С. 673–718.
- Григорьянц А.Г., Сафонов А.Н. Лазерная техника и технология. Методы поверхностной лазерной обработки. М. Машиностроение, 1985
- Vorobyev A.Y. Guo Chunlei. Femtosecond laser nanostructuring of metals // Optics express. 2006. V.14. № 6, P. 2164-2169.
- Yang Y., Yang J., Liang C., Wang H., Zhu X., and Zhang N. Surface microstructuring of Ti plates by femtosecond lasers in liquid ambiences: a new approach to improving biocompatibility // Opt. Express. 2009. Vol.17. P.21124-21133.
- 5. Vorobyev Y., Chunlei Guo. Nanochemical effects in femtosecond laser ablation of metals// Applied Physics Letters. 2013. Vol.102. №7 P. 074107
- Shuji Sakabe, Masaki Hashida, Shigeki Tokita, Shin Namba, and Kiminori Okamuro. Mechanism for self-formation of periodic grating structures on a metal surface by a femtosecond laser pulse // Phys. Rev. 2009. B Vol.79, P. 033409.
- Godai Miyaji and Kenzo Miyazaki // Optics Express. Vol.16. No.20. P.16265.

## EXPERIMENTAL RESEARCH OF METAL SURFACE STRUCTURING VIA HIGH POWER FEMTOSECOND LASER PULSES

### © 2013 I.O. Yavtushenko, A.S. Kadochkin, S.G. Novikov, A.V. Berintsev, D.A. Stolyarov

### Technological Research Institute of Ulyanovsk State University

In this paper the results of the tool steel 9XC surface modification via high power femtosecond laser pulses are presented. Conditions of obtaining the three types of surface structures namely periodic, uniform and highly porous are determined. It is shown that power and time of laser irradiation have an effect on the metal structure surface.

Key words: the surface structuring, laser irradiation, femtosecond pulses.

Igor Yavtushenko, Candidate of Physics and Mathematics, Senior Research Fellow. E-mail: yavigor@mail.ru Alex Kadochkin, Candidate of Physics and Mathematics, Senior Research Fellow. E-mail: askadochkin@svulsu.ru Sergey G. Novikov, Candidate of Technics, Head of Laboratory of Solid State Electronics. E-mail: novikovsg@ulsu.ru Alexey Berintsev, Designer. E-mail: berints@mail.ru Dmitry A. Stolyarov, Associate Research Fellow, Graduate Student. E-mail: dmitreyst@gmail.com