

## СТРУКТУРИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ ПРИ МНОГОИМПУЛЬСНОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

А.Н. Чумаков<sup>1</sup>, Н.А. Босак<sup>1</sup>, И.С. Никончук<sup>1</sup>, П.И. Веренич<sup>1</sup>,  
В.В. Углов<sup>2</sup>, Е.А. Крутилина<sup>2</sup>, Д.Д. Ху<sup>3</sup>, З.Х. Гуо<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт физики НАН Беларуси, пр. Независимости 68, 220072 Минск, Беларусь,  
chumakov@imaph.bas-net.by

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, 220050 Минск, Беларусь

<sup>3</sup>The Key Lab of Automobile Materials, Ministry of Education, College of Materials Science  
and Engineering, Jilin University, 130025 Changchun, China

Исследования разрушения поверхности материалов при воздействии лазерного излучения (ЛИ), выявили образование разнообразных структур, в том числе упорядоченных, среди которых можно выделить два класса – резонансные периодические структуры, период которых определяется длиной волны  $\lambda$ , поляризацией и углом падения ЛИ, а также нерезонансные периодические структуры, характеристики которых явно не связаны с длиной волны и степенью поляризации ЛИ. Предложены различные механизмы и модели для объяснения образования поверхностных периодических структур (ППС) при лазерном воздействии на широкий круг материалов [1-2].

В последние годы были получены структуры на поверхности различных материалов [3-7], облученных ЛИ наносекундной и пикосекундной длительности, которые характеризуются наномасштабной периодичностью с размером нередко на порядок меньшим длины волны ЛИ, что трудно объяснить в рамках ранее предложенных моделей. Такие ППС на самых различных материалах интересны тем, что наномасштабная периодичность нередко придает поверхности необычные физические или физико-химические свойства, непрерывно изменяющиеся в зависимости от периода  $\Lambda \ll \lambda$ . Определенный вклад в наноструктурное модифицирование поверхностного слоя лазерно-облучаемого материала может вносить ряд процессов, включая также обратное осаждение конденсата, кластеров и аблированных частиц из плазменного облака [6, 7]. Поэтому установление основных механизмов и оптимальных режимов наноструктурной лазерной модификации материалов и покрытий является важной задачей, имеющей практическое значение.

В настоящей работе исследованы особенности образования микро- и наноструктур на поверхности ряда металлов и сплавов (сталь 9ХС, Х12, AISI 304, магниевый сплав с Al–С–Ti- покрытием, дюралюминий Д16Т и др.) в воздухе при одно- и многоимпульсном воздействии ЛИ наносекундной длительности на длинах волн 1064, 532, 355 и 266 нм в

условиях образования приповерхностной плазмы. Методами оптической и электронной микроскопии изучена зависимость морфологии и структуры модифицированной поверхности от материала облученных образцов, длины волны лазерного излучения, параметров и условий лазерного облучения.

Выявлено, что лазерное облучение исследованных металлов и сплавов при плотностях мощности излучения вблизи порога приповерхностного плазмообразования ( $q \sim (2\div 3) \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>) на указанных выше длинах волн приводит к образованию слабоструктурированной окисной пленки (рис. 1,а). С дальнейшим ростом плотности мощности воздействующего ЛИ формируется приповерхностная лазерная плазма, а в области пятна лазерного облучения на поверхности мишени образуется зернистая структура (рис. 1,б), тогда как окисная пленка сохраняется лишь на краю пятна лазерного облучения. Размеры зерен образующейся структуры изменяются в диапазоне от 30 нм до 10 мкм и зависят от плотности мощности и длины волны ЛИ, от числа воздействующих лазерных импульсов и облучаемого материала.

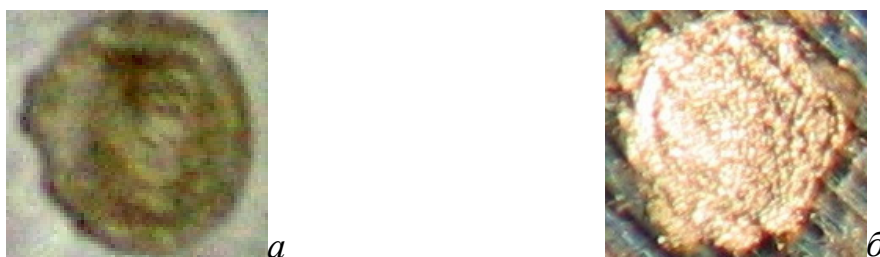


Рис. 1. Микрофотографии лазерно-модифицированного образца дюралюминия Д16Т с окисной пленкой (а,  $\lambda = 266$  нм,  $q \sim 3 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>) и зернистой структурой (б,  $\lambda = 266$  нм,  $q \sim 3 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>)

С ростом числа импульсов воздействующего лазерного излучения уменьшаются размеры отдельных структурных элементов, а их распределение становится квазирегулярным (рис. 2).

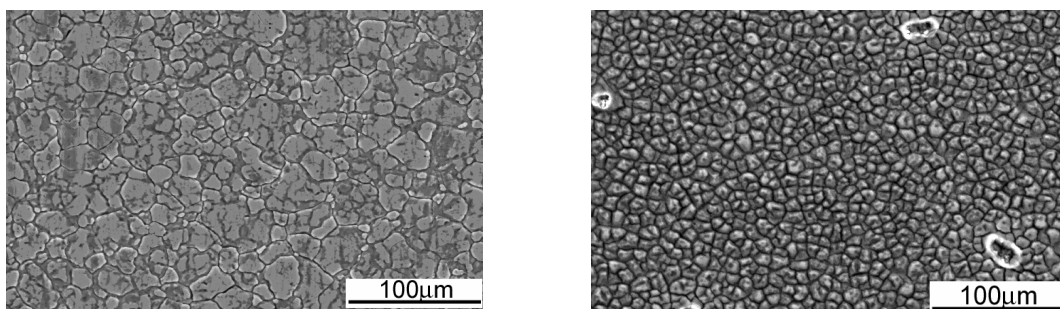


Рис. 2. Микрофотографии сканирующей электронной микроскопии поверхности стали AISI 304, облученной одним (а) и серией из 10000 импульсов (б) ЛИ ( $\lambda = 532$  нм,  $\tau = 20$  нс,  $q \sim 4 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>)

При этом с уменьшением длины волны ЛИ регулярность получаемой зернистой структуры лазерно-модифицированного поверхностного слоя заметно возрастает. По результатам энергодисперсионного рентгеновского анализа компонентного состава лазерно-модифицированных образцов стали установлен пятикратный рост количества оксидов в области пятна лазерного облучения (27,96%) по сравнению с периферией (4,85%).

Для стимулирования образования регулярной зернистой структуры на лазерно-облученной поверхности была использована бипризма Френеля, обеспечившая формирование интерференционных структур в пятне лазерного облучения и соответствующее уменьшение размеров зерен образующейся структуры.



Рис. 3. Оптические микрофотографии поверхности образца, облученного лазером через бипризму Френеля (а) и без нее (б)

Для оценки прочностных характеристик лазерно-облученных образцов были выполнены измерения твердости ряда модифицированных материалов в зависимости от длины волны и плотности мощности ЛИ. Твердость исследуемых образцов определялась по методике Виккерса с использованием прибора MVD-402 (USA). Результаты выполненных измерений приведены в таблице, свидетельствующей о выраженной зависимости твердости материалов от условий облучения.

Образец	Область измерений	Твердость HV, $\pm 0,2$ ГПа ( $d$ – глубина внедрения зонда)
Д16	Вне пятна облучения	<b>2,77</b> ( $d=2,5$ мкм)
	В пятне облучения $\lambda = 266$ нм, $q = 100$ МВт/см <sup>2</sup>	<b>1,84</b>
	$\lambda = 532$ нм, $q = 100$ МВт/см <sup>2</sup>	<b>1,66</b> ( $d=3,2$ мкм)
сталь Х12	Вне пятна облучения	<b>6,75</b> ( $d=1,7$ мкм)
	В пятне облучения $\lambda = 266$ нм, $q = 20$ МВт/см <sup>2</sup>	<b>6,44</b>
	$\lambda = 266$ нм, $q = 100$ МВт/см <sup>2</sup>	<b>5,57</b> ( $d=1,9$ мкм)
	$\lambda = 532$ нм, $q = 20$ МВт/см <sup>2</sup>	<b>5,80</b>
	$\lambda = 532$ нм, $q = 100$ МВт/см <sup>2</sup>	<b>4,99</b>

Выявленное уменьшение на 15-30% микротвердости лазерно-модифицированных материалов, скорее всего, обусловлено обратным осаждением из плазмы на облучаемую поверхность нано- и микрочастиц конденсата, увеличивающих пористость поверхностного слоя.

Таким образом, установлены условия лазерно-плазменного формирования регулярной зернистой нано- и микроструктуры на поверхности ряда металлов и сплавов (сталь, дюралюминий, и др.) с управляемым размером зерен в диапазоне от 30 нм до 10 мкм и их зависимость от режимов лазерного облучения, длины волны и плотности мощности воздействующего ЛИ, длительности и числа лазерных импульсов, что может найти практическое использование для модификации поверхностных свойств ряда материалов, включая повышение их стойкости к коррозии и износу.

Показано, что формирование регулярной зернистой структуры на металлах и сплавах облегчается с увеличением числа воздействующих лазерных импульсов и использованием лазерных пучков с периодической неоднородностью пространственной структуры. Выявленное уменьшение микротвердости лазерно-облученных металлов свидетельствует о существенном влиянии процессов обратного осаждения частиц конденсата из лазерной плазмы на формирование наноразмерной структуры модифицируемой поверхности.

## Список литературы

1. Кособукин В.А., Либенсон М.Н., Румянцев А.Г. Оптика и спектроскопия, **63** (1988) 948-951.
2. Емельянов В.И., Семиногов В.Н. ЖТФ, **86** (1984) 1026–1036.
3. Xie Q.Q., Guo Z.X., Hu J.D., Chumakov A.N., Bosak N.A. V Int. Conf. Plasma Physics and Plasma Technology. Contr. Papers. Vol. II. Minsk (2006) 487-490.
4. Trtica M., Gakovic B., Batani D., Desai T., Panjan P., Radak B. Applied Surface Science, **253** (2006) 2551-2556.
5. Liu Y.H., Hu J.D., Zhao L., Guo Z.X., Chumakov A.N., Bosak N.A. Optics & Laser Technology, **42** (2010) 647-652.
6. Chumakov A.N., Berjeza N.A., Bosak N.A., Hu J.D., Guo Z.X., Xie Q.Q., Publ. Astron. Obs. Belgrade. **89** (2010) 135–138.
7. Riabinina D. [et al]. J. Appl. Phys., **108** (2010) 034322-1–034322-6.
8. Чумаков А.Н., Берёза Н.А., Ху Дз.Д., Босак Н.А., Гуо З.Х., Хиэ К.К. // Инженерно-физический журнал, **84** (2011) 524–530.