

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ КРАТЕРА, ОБРАЗОВАВШЕГОСЯ НА ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОТОКА УСКОРЕННЫХ ИОНОВ

А.Е. Лигачев¹⁾, М.В. Жидков²⁾, Ю.Р. Колобов^{2, 3)}, Г.В. Потемкин⁴⁾, С.С. Манохин^{2, 3)}, Г.Е. Ремнев⁴⁾

¹⁾Институт общей физики имени А.Н. Прохорова РАН, Москва, Россия, carbin@yandex.ru

²⁾Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Белгород, Россия, zhidkov@bsu.edu.ru

³⁾Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия, kolobov@bsu.edu.ru

⁴⁾Томский политехнический университет, Томск, Россия, er.gvp@yandex.ru

В настоящей работе методом растровой электронной микроскопии исследована топография поверхности стали 12Х18Н10Т после воздействия мощного импульсного ионного пучка. С использованием сфокусированного ионного пучка в колонне двухлучевого электронно – ионного микроскопа подготовлена тонкая фольга из поперечного сечения кратера. Методом просвечивающей электронной микроскопии исследована микроструктура и элементный состав поперечного сечения кратера.

Введение

Поверхностная модификация материалов потоками ускоренных ионов успешно применяется в технологических целях для улучшения свойств их поверхностных и приповерхностных слоев. Наиболее характерной особенностью рельефа поверхности образцов, обработанных потоком ускоренных частиц, является наличие дефектов типа кратеров, которые относят к отрицательным последствиям такой обработки. Известно, что кратеры возникают в результате комплекса сложных физических процессов, однако в настоящее время еще не найден окончательный ответ на вопрос о механизмах и причинах образования кратеров на облученной поверхности. Таким образом, экспериментальные исследования структуры кратеров представляют не только технологический, но и общенаучный интерес.

В настоящей работе проведены исследования микроструктуры кратера, образовавшегося на поверхности стали после облучения мощным импульсным ионным пучком (МИИП).

Материал и методика эксперимента

В качестве исследуемого материала использовалась нержавеющая сталь 12Х18Н10Т. Образец стали размером 10х10 мм перед облучением подвергался механической шлифовке и полировке до «зеркального блеска» на установке LaboPol-5 (Struers).

Поверхностная обработка образца стали проводилась на установке «ТЕМП» [1] потоком ионов C^{n+} при давлении остаточных газов внутри камеры $(4-5) \cdot 10^{-2}$ Па. Режим облучения: энергия однозарядных частиц 250 кэВ, длительность импульса ~100 нс, плотность тока в импульсе 150 - 200 А/см². Была проведена обработка 10 импульсами при плотности энергии в импульсе ~3 Дж/см².

Топографию поверхности облученного образца исследовали с помощью растрового электронного микроскопа Zeiss Ultra plus.

Подготовка тонкой фольги (поперечное сечение кратера) для просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) осуществлялась с помощью ионного утонения сфокусированным ионным пучком на растровом электронно-ионном микроскопе FEI Helios 660.

Структуру поперечного сечения кратера исследовали с использованием просвечивающего электронного микроскопа Tescan G2 20F S-T (FEI).

Результаты и их обсуждение

Топография поверхности стали после воздействия импульсного ионного пучка представлена на рисунке 1. Для образовавшихся на поверхности стали кратеров характерна центральная симметрия и наличие кольцевой структуры. Встречаются кратеры как с ярко выраженной кольцевой структурой, так и кратеры со слабыми и размытыми периферийными кольцами, при этом в центре кратера может находиться или впадина, или выступ. Все это создает видимое разнообразие форм и размеров поверхностных дефектов. Поверхностная плотность кратеров составляет не менее $1 \cdot 10^4$ шт/см².

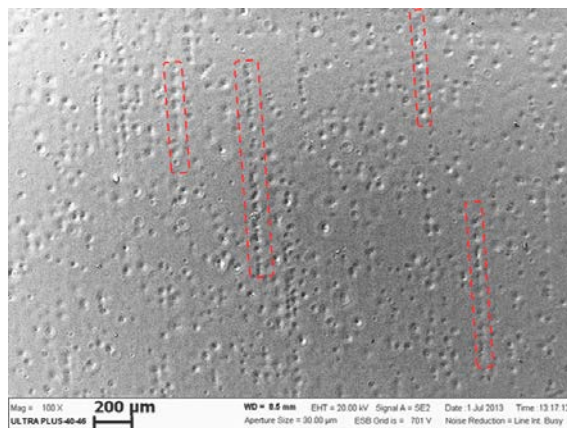


Рис. 1. Топография поверхности стали 12Х18Н10Т после воздействия 10 импульсами МИИП при плотности энергии в импульсе 3 Дж/см². Красным цветом выделены области со строчечным расположением кратеров.

На облученной поверхности также наблюдаются участки с направленным (строчечным) расположением кратеров (рис. 1). Образовавшиеся строчки из кратеров параллельны направлению деформации, а также совпадают с направлением шлифования и полирования на последней стадии подготовки образца к поверхностной модифика-

ции. Строчечное расположение кратеров показано нами ранее и для титановых сплавов, облученных МИИП [2].

Для исследования внутренней структуры нами был выбран кольцевой одиночный кратер размером порядка 40 мкм с впадиной в центре (рис. 2). В результате последовательного ионного утонения была получена тонкая фольга (~90 нм) поперечного сечения кратера с областью интереса 10x3 мкм² (вставка на рис. 2).

На рисунке 3 представлена структура поперечного сечения кратера. Согласно данным просвечивающей растровой электронной микроскопии (ПРЭМ), поверхностный слой кратера представлен вытянутыми по направлению к поверхности столбчатыми зёрнами со средним размером

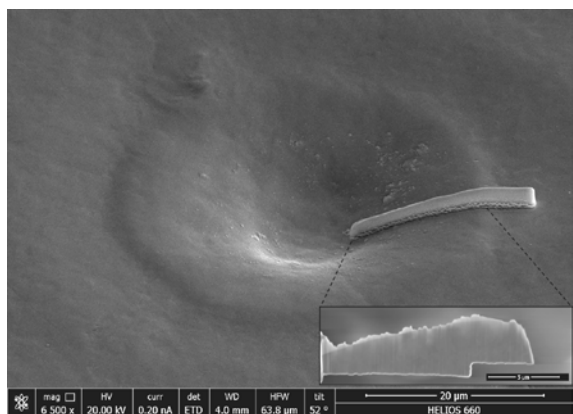


Рис. 2. Кратер, выбранный для исследований с участком (область интереса), покрытым защитным слоем (платиной). Образец наклонен в колонне микроскопа под углом 52°. На вставке изображена извлеченная из образца и утоненная до толщины ~ 90 нм фольга.

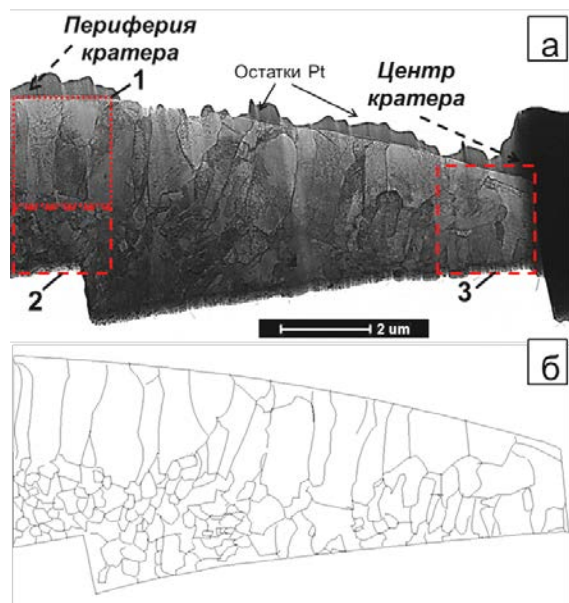


Рис. 3. Микроструктура поперечного сечения кратера (а) и ее схематический рисунок (б).

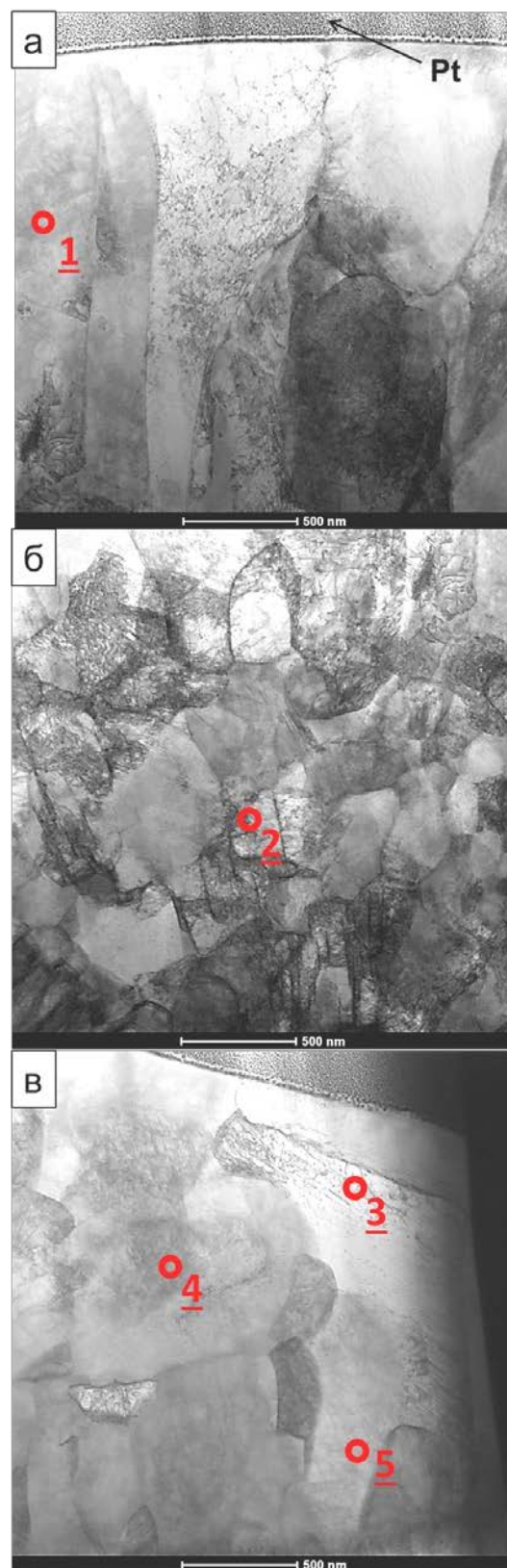


Рис. 4. Микроструктура различных областей кратера: а - периферия (область 1 рис. 3а); б - периферия (область 2 рис. 3а); в - центр (область 3 рис. 3а). Красными маркерами с цифрами обозначены области для элементного микроанализа (ЭДС)

(длина) ~ 2 мкм ($K_{H3} > 3$) (рис. 3 область 1 и рис. 4а). Коэффициент неравноосности зерен (K_{H3}) снижается по мере смещения от периферийного кольца кратера к его центральной части (рис. 3 область 3 и рис. 4в). Под слоем вытянутых кристаллитов в кратере находится область с равноосными субмикроструктурно (СМК) зернами со средним размером порядка 250 нм (рис. 3 область 2 и рис. 4б).

Характер сформированной структуры определенно свидетельствует о протекании процессов плавления и сверхбыстрой кристаллизации в тонком поверхностном слое в процессе образования кратера. Формирование СМК зерен с достаточно высокой плотностью дислокаций (под слоем столбчатых кристаллов) может свидетельствовать в том числе и об ударно – волновом воздействии на приповерхностный слой.

К настоящему времени существуют различные предположения о природе и механизмах образования кратеров: наличие неоднородностей плотности пучка ионов в импульсе, в том числе в результате его филаментации [3]; наличие газовых примесей в материале и выход на расплавленную поверхность пузырьков газа [4]; влияние импульса отдачи, возникающего при локальном плавлении и испарении мишени [5]; образование плазменного факела с последующим возникновением неустойчивости границы плазма – расплав [6]. В рамках модели [6] также показано, что в процессе формирования кратера под его поверхностью возникают поля напряжений (превышающие предел текучести), которые могут быть ответственны за структурные изменения в приповерхностном слое.

Согласно данным ЭДС (таблица 1) в центральной области кратера происходит перераспределение легирующих элементов с возникновением областей с высоким содержанием никеля и низким содержанием хрома. Стоит отметить, что в процессе образования кратера возможно также предпочтительное испарение хрома из-за его высокой упругости паров.

Таблица 1. Элементный состав различных областей кратера. Соответствующие области выделены на рисунке 4 красными маркерами. Содержание элементов указано в весовых %

Область	Ni	Cr	Fe
1	9.3	14.6	73.2
2	7.0	15.7	75.9
3	19.6	2.7	76.3
4	15.5	4.3	78.8
5	9.5	4.8	84.2

Закключение

При облучении стали 12Х18Н10Т МИИП (3 Дж/см², 10 импульсов) на ее поверхности формируются кратеры, поверхностная плотность которых составляет не менее 10^4 шт/см². Исследования структуры поперечного сечения кратера методом ПЭМ показали, что приповерхностный слой (глубиной ~ 2 мкм) кратера представлен зоной столбчатых зерен, вытянутых по направлению к поверхности. Под слоем столбчатых зерен располагается область с равноосными СМК зернами.

Список литературы

1. Isakov I.F., Kolodii V.N., Opekunov M.S., Matvienko V.M., Pechenkin S.A., Remnev G.E., Usov Yu.P. // Vacuum. 1991. V. 42. № 1-2. P.159-162.
2. Жидков М.В., Колобов Ю.Р., Лигачев А.Е., Потемкин Г.В., Газизова М.Ю., Ремнев Г.Е. // FRITME-2015. С. 101-103.
3. Погребняк А.Д., Кульментьева О.П. // ФИП. 2003. Т. 1. № 2. С. 110-136.
4. Чернов И.П., Белоглазова П.А., Березнева Е.В., Куреева И.В., Пушилина Н.С., Ремнев Г.Е., Степенова Е.Н. // ЖТФ. 2015. Т. 85. № 7. С. 95-99.
5. Korotaev A.D., Tyumentsev A.N., Pinzhin Yu.P., Remnev G.E. // Surface & Coatings Technology. 2004. V. 185. С. 38-49.
6. Волков Н.Б., Майер А.Е., Яловец А.П. // ЖТФ. 2002. Т. 72. № 8. С. 34-43.

STUDY OF THE STRUCTURE OF A CRATER AT THE SURFACE OF STEEL 12CR18NI10TI IRRADIATED BY HIGH-POWER PULSED ION BEAM

A.E. Ligachev¹, M.V. Zhidkov², Yu.R. Kolobov^{2,3}, G.V. Potemkin⁴, S.S. Manokhin^{2,3}, G.E. Remnev⁴

¹Institute of general physics by A.M. Prohorov of the RAS, Moscow, Russia, carbin@yandex.ru

²Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia zhidkov@bsu.edu.ru

³Institute of Problems of Chemical Physics of RAS, Chernogolovka, Russia

⁴Tomsk politechnical university, Tomsk, Russia, ep.gvp@yandex.ru

The topography of surface layers of steel 12Kh18N10T (AISI 321) after pulse ion irradiation was investigated by scanning electron microscopy. Thin foil was prepared from cross – section of crater using a focused ion beam column of a two-beam electron – ion microscope. The microstructure and chemical composition of the crater have been studied by transmission electron microscopy.