

МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СТАЛИ МОЩНЫМ ИМПУЛЬСНЫМ ИОННЫМ ПУЧКОМ

Н.И. Поляк¹⁾, В.М. Анищик¹⁾, А.Е. Лигачев²⁾, Г.В. Потемкин³⁾, С.К. Павлов³⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь,
n.poliak@mail.ru, anishchik@bsu.by

²⁾Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия, *carbin@yandex.ru*

³⁾Томский политехнический университет, Томск, Россия,
ep.gvp@yandex, lab.sergey@gmail.com

С помощью рентгеноспектрального микроанализа, растровой электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа исследовано влияние облучения мощным импульсным пучком ионов C_n^+ и H^+ с энергией $E=250$ кэВ при плотностях тока $j=25$ и 65 А/см², длительностью импульса 100 нс на морфологию поверхности, структуру и фазовый состав образцов стали 65. Показано, что облучение приводит к переплавлению поверхностного слоя образцов, формированию выделений новых фаз и образованию на поверхности кратеров.

Ключевые слова: мощные импульсные ионные пучки; сталь; морфология поверхности; рентгеноструктурный анализ, кратеры.

MODIFICATION OF THE STRUCTURE AND PHASE COMPOSITION OF THE STEEL SURFACE LAYER BY A POWERFUL PULSED ION BEAM

N.I. Poliak¹⁾, V.M. Anishchik¹⁾, A.E. Ligachev²⁾, G.V. Potemkin³⁾, S.K. Pavlov³⁾

¹⁾Belarusian State University, Minsk, Belarus, *n.poliak@mail.ru, anishchik@bsu.by*

²⁾A.M. Prokhorov General Physics Institute RAS, Moscow, Russia, *carbin@yandex.ru*

³⁾Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia,
ep.gvp@yandex, lab.sergey@gmail.com

Using X-ray spectral microanalysis, scanning electron microscopy and X-ray analysis, the effect of irradiation with a powerful pulsed beam of C_n^+ and H^+ ions with energy $E=250$ keV at current densities $j=25$ and 65 A/cm², pulse duration 100 ns on the surface morphology, structure and phase composition of samples of steel 65. It is shown that irradiation leads to remelting of the surface layer of samples, the formation of precipitates of new phases and the formation of craters on the surface.

Keywords: powerful pulsed ion beams; steel; surface morphology; X-ray analysis, craters.

Введение

Модификация свойств твердых тел мощными импульсными ионными пучками (МИИП) в последнее время находит все большее применение. При воздействии МИИП поверхность металла расплавляется, а затем кристаллизуется с достаточно высокими скоростями $\sim 10^7 - 10^{11}$ К/с. Под действием перепада температур за короткий промежуток времени ($10^{-6} - 10^{-3}$ с) в поверхностном слое развиваются сложные процессы, сопровождающиеся созданием термоупругих напряжений и

образованием дефектов, эволюция которых приводит к изменению структурно-фазового состояния и свойств. [1-3] Возможность вариации параметров МИИП и экспрессность позволяют более эффективно применять данный метод для модификации свойств поверхности материалов.

Целью настоящей работы являлось выявление влияния облучения МИИП ионов углерода на изменение структуры и фазового состава стали 65.

Материалы и методы исследования

В работе исследовались закаленные образцы стали 65 с химическим составом, соответствующим ГОСТ 14959-79 (вес. %): 0,62-0,7 С, 0,50 – 0,80 Мн, 0,17 – 0,37 Si, <0,25 Cr, остальное – Fe [4]. Образцы размером 10x10x2 мм вырезались из прокатанного листа и механически шлифовались.

Облучение образцов импульсным пучком ионов C_n^+ и H^+ с энергией $E=250$ кэВ при давлении остаточных газов внутри камеры $(4-5) \cdot 10^{-2}$ Па проводилось на установке TEMP-4 при плотностях тока $j=25$ и 65 А/см² (длительность импульса $\tau=100$ нс, количество импульсов облучения $N=1$).

Моделирование с помощью программы TRIM показало, что величина среднего проецированного пробега ионов углерода в исследуемых образцах $R_p=0.36$ мкм, максимальная концентрация вакансий залегает на глубине 0.26 мкм, что составляет примерно $0.7 \cdot R_p$.

Исследование морфологии поверхности образцов проводилось на растровом электронном микроскопе (РЭМ) LEO – 1455 VP, определение элементного состава – с помощью энергодисперсионного безазотного спектрометра Aztec Energy Advanced X-Max 80.

Рентгеноструктурные исследования осуществлялись на дифрактометре Rigaku Ultima IV с использованием $CuK\alpha$ -излучения и геометрии скользящего пучка ($\alpha=1^\circ$). Параметр решетки a определялся по угловому положению дифракционной линии (211) α -Fe, размер областей когерентного рассеяния D и величина микродеформаций ε оценивались по уширению β дифракционных линий (110) и (211) α -Fe, соответственно.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 и 2 приведены РЭМ-изображения поверхности стали до и после воздействия МИИП, полученные в режиме фазового контраста (BSD). Можно отметить, что до облучения на поверх-

ности образцов присутствуют следы шлифовки, а после облучения рельеф поверхности сглаживается, более заметно для большей плотности тока (рис. 1б, в).

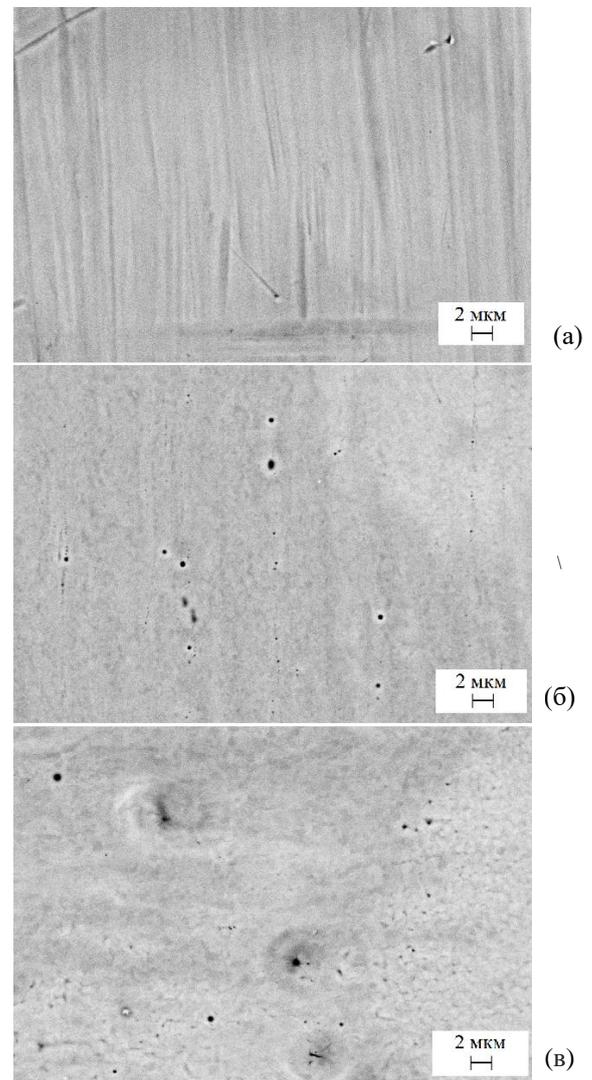


Рис. 1. Морфология поверхности исходного (а) и облучённых МИИП при плотностях тока 25 (б) и 65 А/см² образцов стали (в)

Рентгеноспектральный анализ показал равномерное распределение легирующих элементов в поверхностном слое для исходного образца (рис. 2а). После воздействия МИИП появляются локальные области размерами $d=0.5-1$ мкм, в которых содержание атомов Fe возрастает, а С – убывает (рис. 2б, в). Кроме этого, на поверхности образца, облученного с большей плотностью тока, можно наблюдать округлые углубления – кратеры диаметром около 3-6 мкм, в которых увеличива-

ется содержание атомов С, Мп, Сг (рис. 1в, 2в). Вокруг них видна зона деформированного материала образцов, во внутренней части - полости и микротрещины (рис. 1в).

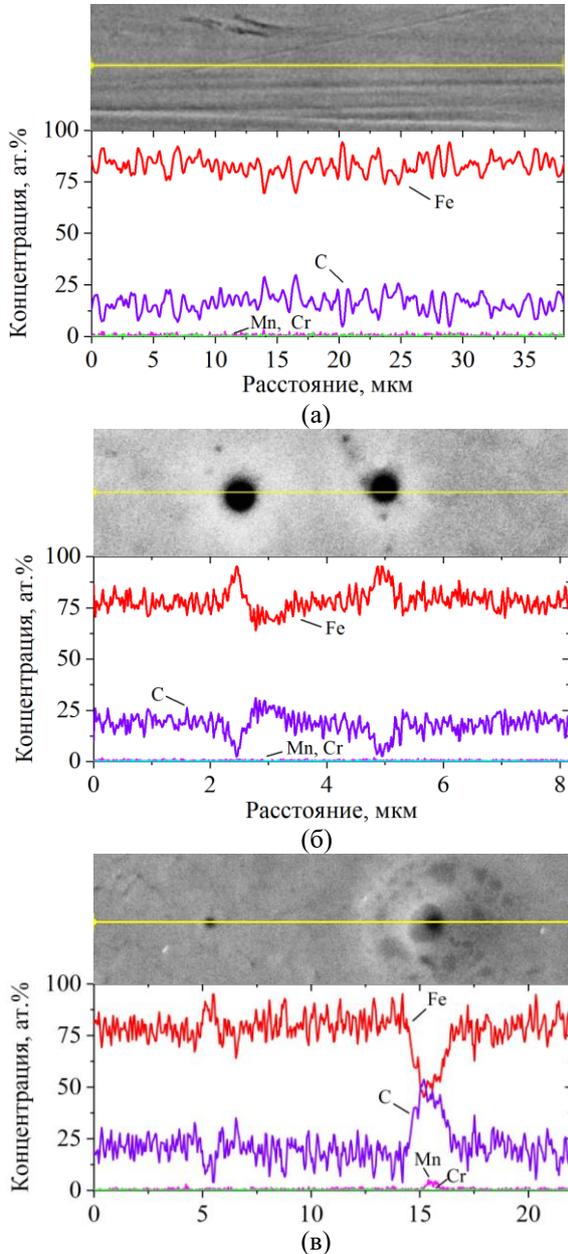


Рис. 2. Распределение вдоль произвольной линии химических элементов (Fe, С, Мп, Сг) на поверхности исходного образца (а) и после облучения МИИП при плотностях тока 25 (б) и 65 А/см² (в)

Известно [1-3], что концентрированные потоки энергии могут создавать в локальных объемах условия, приводящие к закалке расплавленного слоя поверхности металла, при этом ее рельеф может изме-

няться. Отсутствие следов шлифовки в данном случае указывает на то, что при воздействии МИИП происходит оплавление поверхности мишени и ее последующее затвердевание.

Образование кратеров является достаточно частым явлением при обработке поверхности металлов и сплавов МИИП и обусловлено оплавлением слоя с испарением материала мишени [1-3, 5, 6]. Определяющим фактором в образовании кратеров является также наличие инородных включений и пузырьков газа [2]. В [6] отмечается, что при воздействии МИИП на поверхность стали AISI 321 с режимом облучения, близким нашему (ионы C_n^+ и H^+ , $E = 250$ кэВ, $\tau=100$ нс, $N = 1-50$), образуются кратеры, предпочтительными местами для этого являются сульфидные или титаново-карбосульфидные включения. В нашем случае рентгеноспектральный анализ показал присутствие следов примеси S во включениях с Мп и Сг.

Результаты рентгенофазового анализа и оценки параметров тонкой структуры стали приведены на рис. 3-5.

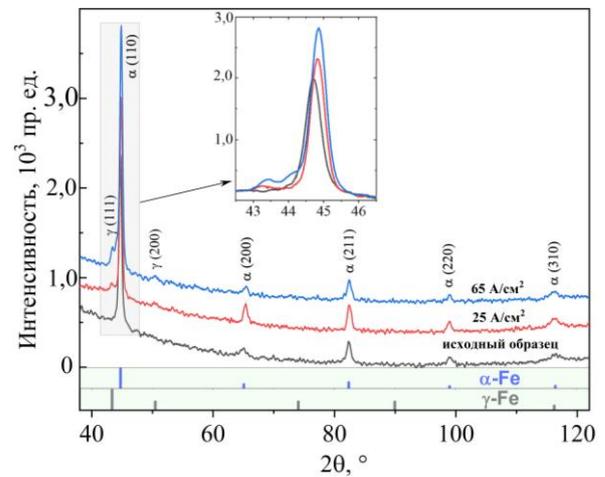


Рис. 3. Дифрактограммы образцов стали до и после облучения МИИП

На дифрактограмме исходного образца (рис. 3) присутствуют рефлексы α -Fe. После воздействия МИИП возле рефлекса (110) α -Fe можно заметить появление дифракционных линий принадлежащих предположительно γ -Fe и карбидным фазам (рис. 4). С увеличением дозы облуче-

ния наблюдается рост интенсивности дифракционных максимумов, соответствующих новым фазам, что указывает на увеличение их объемной доли. Наблюдаемое перераспределение интегральной интенсивности линий α -Fe свидетельствует об изменении текстуры модифицированного поверхностного слоя.

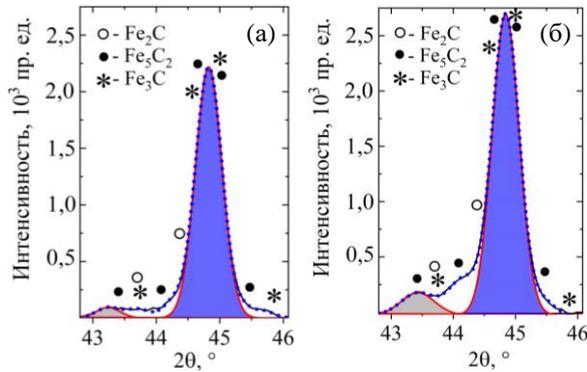


Рис. 4. Разделение профиля линии (110) α -Fe образцов стали после облучения МИИП с плотностью тока $j=25$ (а) и 65 A/cm^2 (б)

Структура и фазовый состав при воздействии МИИП в значительной степени зависят от скорости охлаждения в процессе кристаллизации с образованием пересыщенного твердого раствора, что может привести к его распаду с выделением метастабильных фаз [1-3]. Появление новых фаз при импульсном ионном облучении (рис. 4) можно объяснить совместным радиационным, тепловым и ударно-механическим воздействием с повышением концентрации углерода в поверхностном слое стали.

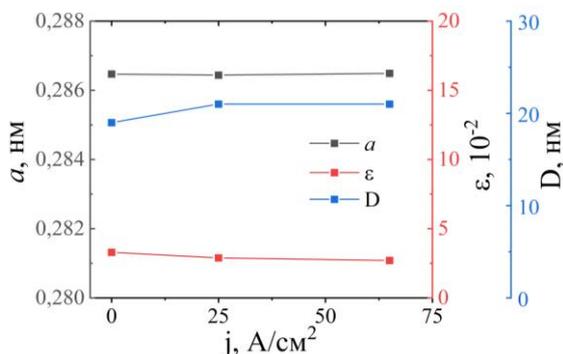


Рис. 5. Параметр решетки a , величина микродеформаций ε и размер областей когерентного рассеяния D стали, подвергнутой воздействию МИИП

Отсутствие изменений параметров тонкой структуры (рис. 5) может быть следствием повторной закалки при охлаждении расплавленного поверхностного слоя.

Заключение

В результате облучения мощным импульсным пучком ионов C_n^+ и H^+ с энергией $E=250 \text{ кэВ}$ ($j=25$ и 65 A/cm^2 , $\tau=100 \text{ нс}$, $N=1$) обнаружено изменение структуры и фазового состава стали 65, что обусловлено протеканием процессов оплавления и кристаллизации ее приповерхностного слоя. Процессы перераспределения химических элементов, накопление дефектов, развитие термоупругих напряжений способствует перестройке структуры под облучением и появлению новых фаз.

Библиографические ссылки

1. Ремнев Г. Е., Тарбоков В. А., Павлов С. К. Модифицирование материалов при воздействии мощных ионных пучков. *Физика и химия обработки материалов* 2021; (2): 5-26.
2. Ремнев Г.Е. Модификация материалов с использованием мощных ионных пучков. *Известия Томского политехнического университета* 2000; 303(2): 59-70.
3. Погребняк А.Д., Кульментьева О.П. Структурно-фазовые превращения в поверхностных слоях и свойства металлических материалов после импульсного воздействия пучков частиц. *Физическая инженерия поверхности* 2003; 1(2): 108-136.
4. Прокат из рессорно-пружинной углеродистой и легированной стали. Технические условия: ГОСТ 14959-79. М.: Изд-во стандартов; 1979. 14 с.
5. Потемкин Г.В., Лигачев А.Е., Жидков М.В., Колобов Ю.Р., Ремнев Г.Е., Бобрышев Б.Л. и др. Топография поверхности магния после обработки мощным импульсным пучком ионов углерода. В кн.: Углов В.В., редактор. Материалы 14-й Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом». (21-24 сентября 2021 года), г. Минск. Минск: Издательский центр БГУ; 2021. С. 345-348.
6. Zhidkov M.V., Ligachev A.E., Golosov E.V., Gazizova M.Y., Pavlov S.K., Remnev G.E. Study of craters formed on surface of AISI 321 stainless steel after high power ion-beam exposure. *Vacuum* 2022; 198: 1-8.