

МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ 65, ОБРАБОТАННОЙ МОЩНЫМ ИМПУЛЬСНЫМ ПУЧКОМ ИОНОВ

Н.И. Поляк¹⁾, В.М. Анищик¹⁾, Д.В. Жигулин²⁾, В.А. Пилипенко²⁾, Н.А. Радашкевич¹⁾,
А.Е. Лигачев³⁾, В.А. Тарбоков⁴⁾

¹⁾Белорусский государственный университет,
пр. Независимости 4, Минск 220030, Беларусь,
n.poliak@mail.ru, anishchik@bsu.by

²⁾ОАО «ИНТЕГРАЛ» - управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,
ул. Казинца 121А, Минск 220108, Беларусь, *office@bms.by*

³⁾Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
ул. Вавилова 38, Москва 119991, ГСП 1, Россия, *carbin@yandex.ru*

⁴⁾Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
ул. Ленина 30, Томск 634050, Россия, *lab.sergey@gmail.com*

Исследована морфология поверхности образцов стали 65, облученной мощным импульсным пучком ионов C^+ (70%) + H^+ (30%) с энергией 250 кэВ и плотностью энергии 0,6 и 1,6 Дж/см² одним импульсом длительностью 100 нс. Облучение приводит к формированию ультрамелкозернистой структуры, появлению газовых пузырьков, образованию на поверхности кратеров и микротрещин. Наблюдаемые изменения вызваны нагревом, плавлением, сверхбыстрой кристаллизацией приповерхностного слоя мишени и действием локальных напряжений.

Ключевые слова: мощный импульсный ионный пучок; сталь; морфология поверхности.

SURFACE MORPHOLOGY OF STEEL 65 TREATED BY POWERFUL PULSED ION BEAM

N.I. Poliak¹⁾, V.M. Anishchik¹⁾, D.V. Zhyhulin²⁾, V.A. Pilipenko²⁾, N.A. Radashkevich¹⁾,
A.E. Ligachev³⁾, V.A. Tarbokov⁴⁾

¹⁾Belarusian State University,
4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus,
n.poliak@mail.ru, anishchik@bsu.by

²⁾JSC «INTEGRA» – «INTEGRAL» Holding Managing Company,
121A Kazintsa Str., 220108 Minsk, Belarus, *office@bms.by*

³⁾Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences,
38 Vavilova Str., 119991 Moscow, Russia, *carbin@yandex.ru*

⁴⁾National Research Tomsk Polytechnic University,
30 Lenina Ave., 634050 Tomsk, Russia, *lab.sergey@gmail.com*

The morphology of the surface of samples of steel 65, irradiated with a powerful pulsed beam of C^+ (70%) + H^+ (30%) ions with an energy of 250 keV and energy density of 0.6 and 1.6 J/cm² in a single pulse lasting 100 ns, was studied. The irradiation leads to the formation of an ultrafine-grained structure, the appearance of gas bubbles, and the formation of craters and microcracks on the surface. The observed changes are caused by heating, melting, ultrafast crystallization of the near-surface layer of the target, and the action of local stresses.

Ключевые слова: powerful pulsed ion beams; steel; surface morphology; craters; microcracks.

Введение

Углеродистые стали широко используются в машиностроении и нефтегазовой промышленности для изготовления дета-

лей, к которым предъявляются требования повышенной износостойкости и эксплуатируемых при высоких статических и вибрационных нагрузках.

Для модификации структуры и свойств металлов и сплавов в последнее время часто используют мощные импульсные пучки ионов, в частности углерода и водорода [1-4], однако информации о влиянии водорода на состояние поверхности образцов при таком способе обработки в литературе явно недостаточно. Водород имеет малый атомный радиус и поэтому высокую диффузионную подвижность. В то же время растворимость водорода в железе невелика. Водород в сталях является нежелательной примесью, так как вызывает процессы водородного охрупчивания и растрескивания [5, 6]. В связи с этим целью настоящей работы являлось изучение влияния мощного импульсного пучка ионов углерода и водорода на морфологию поверхности стали 65.

Материалы и методы исследования

В работе исследовались образцы стали 65 с химическим составом, соответствующим ГОСТ 14959-79 [7]. Образцы вырезались из прокатанного листа, после шлифовки и полировки закаливались в воду от температуры 830 °С.

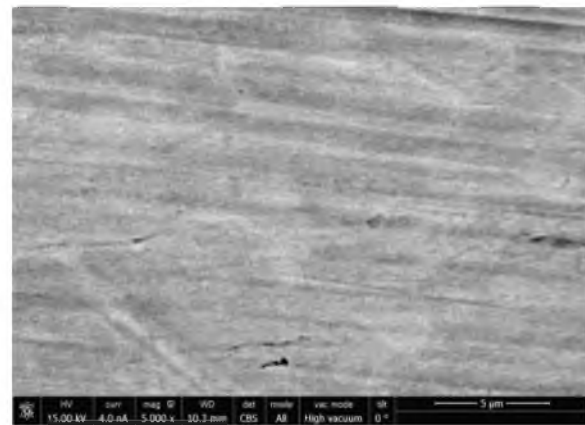
Облучение пучком ионов C^+ (70%) + H^+ (30%) при давлении остаточных газов внутри камеры $(4-5) \cdot 10^{-2}$ Па проводилось на установке ТЕМР-4 (энергия ионов $E=250$ кэВ, плотность энергии $J=0.6$ и 1.6 Дж/см², длительность импульса $\tau=100$ нс, один импульс).

Изображения поверхности образцов получены с помощью растрового электронно-ионного микроскопа FEI Versa 3D (США) с применением детектора обратно-рассеянных электронов. Для получения поперечного среза образцов использовался режим ионного травления.

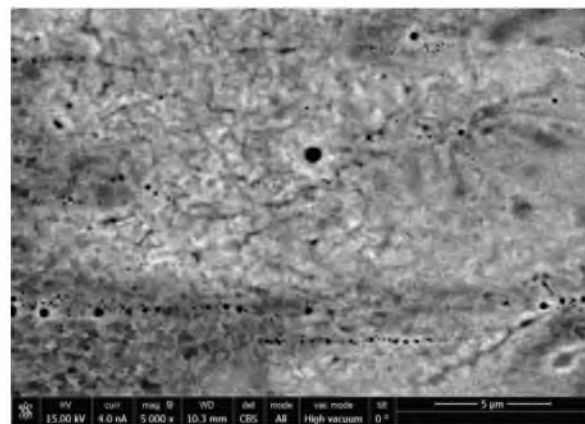
Результаты и их обсуждение

Обработка мощным импульсным ионным пучком существенно влияет на морфологию поверхности образцов (рис. 1, 2): наблюдается изменение микрорельефа, формирование ультрамелкозернистой структуры, образование кратеров, микро-

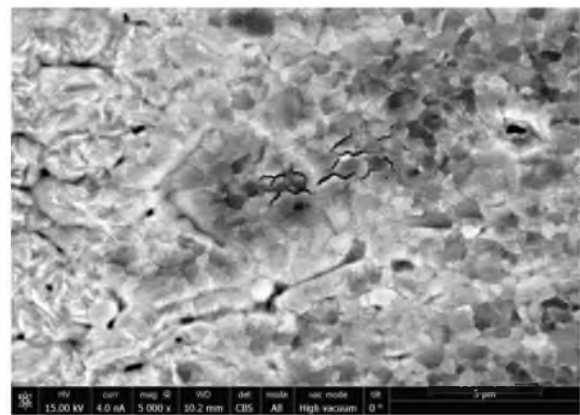
трещин, появление газовых пузырьков.



(a)



(б)



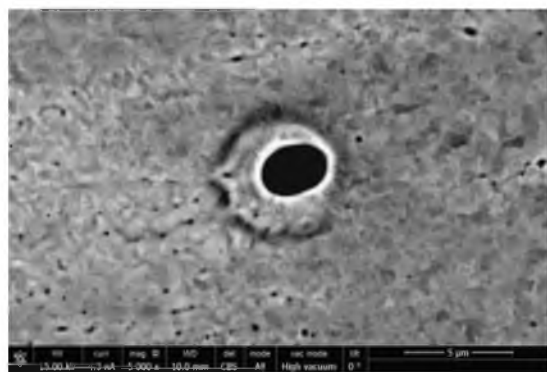
(в)

Рис. 1. Морфология поверхности исходного (а) и облученных с плотностью энергии 0.6 (б) и 1.6 (в) Дж/см² образцов

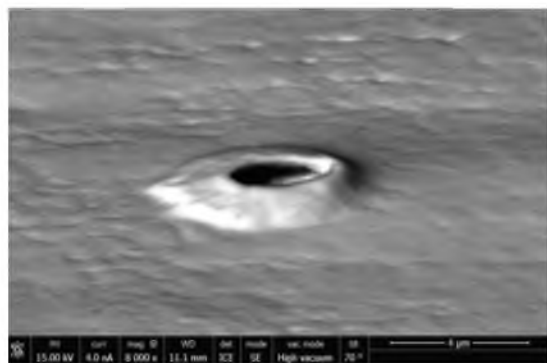
Микроцарапины, присутствующие на поверхности исходного образца (рис. 1а), возникли при предварительной подготовке поверхности, а после ее облучения они практически исчезли (рис. 1б, в), что свидетельствует об эрозии, абляции и/или

плавлении приповерхностного слоя мишени.

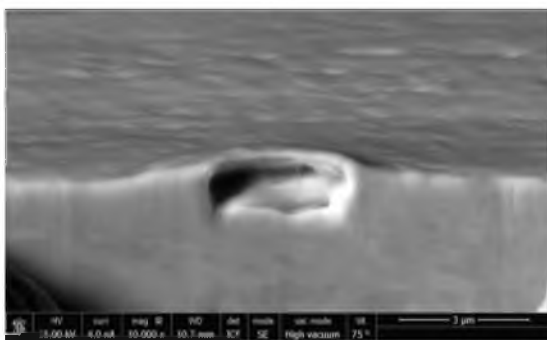
Сверхбыстрая кристаллизация приводит и к изменению дисперсности зерен (рис. 1б, в). Определяющим фактором в образовании кратеров (рис. 1в, 2) является наличие включений примесных атомов и пузырьков газа [3, 8].



(а)



(б)



(в)

Рис. 2. Кратер на поверхности образца, облучённого с плотностью энергии 1,6 Дж/см²: вид сверху (а), под углом 70° (б), поперечное сечение (в)

После воздействия МИИП можно видеть скопления сферической формы размерами 0.1-0.5 мкм, которые являются газовыми пузырьками [4]. При кристаллиза-

ции расплавленного слоя растворимость водорода существенно уменьшается, что может приводить к образованию газовых пузырьков (рис. 1б). Кроме того, углерод (в том числе имплантированный) также понижает растворимость водорода в железе.

Образование газовых пузырьков возможно также и вследствие протекания реакции гидрирования цементита с синтезом метана [5, 6]. Метан, образовавшийся при взаимодействии водорода с карбидом железа Fe₃C или в результате реакции между водородом и углеродом, формирует подобно водороду газовые пузырьки. Под действием сильного давления продуктов реакции, скопившихся в несовершенствах кристаллической решетки, и температурных напряжений, происходит разрушение поверхностного слоя мишени в виде микротрещин и кратеров.

Закключение

В результате облучения смешанным мощным пучком ионов C⁺ (70%) + H⁺ (30%) с энергией E=250 кэВ (J=0.6 и 1.6 Дж/см², τ=100 нс, один импульс) обнаружено изменение морфологии поверхности стали 65: сглаживание ее рельефа, образование ультрамелкозернистой структуры, формирование кратеров и микротрещин, появление в приповерхностном слое газовых пузырьков.

Библиографические ссылки

1. Remnev G.E., Tarbokov V.A., Pavlov S.K. Material modification by high-intense pulsed ion beams. *Inorganic Materials: Applied Research* 2022; (13): 626-640.
2. 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.
3. Ремнев Г.Е. Модификация материалов с использованием мощных ионных пучков. *Известия Томского политехнического университета* 2000; 303(2): 59-70.
4. Поляк Н.И., Анищик В.М., Лигачев А.Е., Потемкин Г.В., Павлов С.К. Модификация структуры и фазового состава поверхностного слоя стали

- мощным импульсным ионным пучком. В кн.: Углов В.В., гл. ред. Материалы 15-й Междунар. конф. «Взаимодействие излучений с твердым телом» (26-29 сент. 2023 г.), г. Минск. Минск: БГУ; 2023. С. 294-297.
5. Справочник нефтехимика. В двух томах. Т. 1. Под ред. Огородникова С.К. Ленинград: Химия; 1978. 496 с.
6. Л.Н. Горчаков, А.М. Добротворский, Л.М. Романова, С.А. Вальковская. Влияние давления водорода на механизм водородной коррозии углеродистой стали. *Химическая техника* 2016; (1): 16-19.
7. Прокат из рессорно-пружинной углеродистой и легированной стали. Технические условия: ГОСТ 14959-79. М.: Изд-во стандартов; 1979. 14 с.
8. 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.
6. Л.Н. Горчаков, А.М. Добротворский, Л.М. Романова, С.А. Вальковская. Влияние давления водорода на механизм водородной коррозии уг-