

УДК 539.21

Черенда Н. Н.<sup>1</sup>, Углов В. В.<sup>1,2</sup>, Асташинский В. М.<sup>3,4</sup>, Кузьмицкий А. М.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Белорусский государственный университет. Беларусь, г. Минск

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Россия, г. Томск

<sup>3</sup> Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси. Беларусь, г. Минск

<sup>4</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ. Россия, г. Москва

### МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ ВОЗДЕЙСТВИЕМ КОМПРЕССИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ

*В работе исследовано влияние воздействия компрессионных плазменных потоков на структурно-фазовое состояние и микротвердость поверхностного слоя инструментальной стали с покрытиями ниобия и карбида ниобия. Установлено, что плазменное воздействие ведет к легированию поверхностного слоя стали элементами покрытия. Методом рентгеноструктурного анализа для обеих исследуемых систем обнаружено присутствие карбида ниобия в легированном слое. Предложенный в работе подход обеспечивает увеличение микротвердости углеродистой стали до ~10 ГПа.*

*Ключевые слова:* сталь; ниобий; карбид ниобия; компрессионный плазменный поток; микротвердость.

Синтез новых материалов с уникальными свойствами, а также целенаправленная модификация характеристик поверхности являются важнейшими научно-техническими задачами современного материаловедения. Прогресс в разработке и развитии таких направлений во многом связывается с методами воздействия концентрированными потоками энергии. Отличительной чертой компрессионных плазменных потоков (КПП), генерируемых квазистационарными плазменными ускорителями, является сравнительно большая длительность разряда (порядка сотен микросекунд) при сохранении высоких значений параметров плазмы [1]. Такие характеристики плазменных потоков позволяют эффективно их использовать для модификации поверхностных свойств различных материалов (металлы и их сплавы, порошковые покрытия, полупроводники и др.) [1–3].

Компрессионные плазменные потоки могут быть эффективно использованы для легирования поверхностного слоя материалов элементами, обеспечивающими существенное изменение свойств поверхности. Легирование осуществляется путем нанесения пленки или покрытия легирующего элемента на поверхность материала и последующего воздействия плазменными потоками. При воздействии происходит плавление покрытия и поверхностного слоя материала на глубину, определяемую теплофизическими характеристиками материалов покрытия и подложки, их жидкофазному перемешиванию в результате действия конвективных механизмов тепло- и массопереноса, и последующей кристаллизации в условиях сверхбыстрого охлаждения [1–3]. Воздействие КПП на материалы с предварительно осажденным многокомпонентным покрытием позволяет легировать поверхностный слой одновременно несколькими элемен-

тами. Такой подход представляет собой способ создания широкого круга различных соединений, в том числе метастабильных фаз или фаз, состоящих из несмешиваемых компонентов, а также представляет интерес для изучения неравновесных диаграмм состояния.

Объектом исследований являлись образцы инструментальной стали У9 следующего состава (в ат. %): 0,85–0,94 % С, 0,17–0,33 % Si, 0,17–0,33 % Mn, до 0,25 % Ni, до 0,028 % S, до 0,03 % P, до 0,2% Cr, до 0,25% Cu. Образцы представляли собой цилиндры высотой 5 мм и диаметром 15 мм. На исследуемые образцы наносилось покрытие Nb или NbC методом вакуумного катодно-дугового осаждения со следующими параметрами процесса: ток горения дуги – 190 А, напряжение смещения – 120 В, время нанесения покрытия – 1,5 минуты (NbC) и 10 минут (Nb). Толщина покрытия NbC составляла ~1 мкм, покрытия Nb – 2.5 мкм.

Обработку тремя импульсами компрессионных плазменных потоков осуществляли в газоразрядном магнитоплазменном компрессоре компактной геометрии. Длительность разряда составляла ~100 мкс. Эксперименты проводили в режиме «остаточного газа», при котором предварительно откачанную вакуумную камеру заполняли рабочим газом – азотом до давления 400 Па. Плотность поглощенной образцом энергии составляла ~23 Дж/см<sup>2</sup> за импульс.

Фазовый состав исследовался методом рентгеноструктурного анализа (РСА) с помощью дифрактометра RIGAKU ULTIMA IV в излучении Cu K $\alpha$ . Морфология и элементный состав поверхности образцов изучался с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе LEO1455VP с энергодисперсионным рентгеновским микроанализатором Oxford Instruments. Элементный анализ также проводился с помощью Оже-электронной спектроскопии (ОЭС) при рас-

пылении поверхности образца ионами аргона с энергией 3 кэВ на спектрометре РНИ-660.

Анализ поперечного сечения образцов системы Nb/сталь после воздействия КПП, проведенный с помощью РЭМ, показывает формирование легированного Nb слоя толщиной ~35 мкм с равномерным распределением атомов по глубине и с дисперсной структурой. Средняя концентрация Nb в легированном слое составляла 4 ат.%, что совпадает с данными ОЭС. Кроме того, результаты ОЭС показывают формирование на поверхности образца пленки, содержащей до 30 ат.% Nb, а также легкие элементы: С, N. Рост пленки может происходить в результате формирования на поверхности Nb(C,N) на стадии кристаллизации и последующего охлаждения образца в результате диффузии атомов углерода и ниобия из легированного слоя и атомов азота из остаточной атмосферы вакуумной камеры [3]. В системе NbC/сталь при воздействии КПП также происходит перемешивание материала покрытия и подложки, однако в модифицированном слое присутствуют нерастворенные участки покрытия. Таким образом, поверхностный модифицированный слой этой системы представляет собой композит сталь-NbC.

Результаты фазового анализа исходных образцов с покрытием до и после воздействия КПП представлены на рисунках 1 и 2. В системе Nb/сталь после воздействия КПП наблюдается формирование пересыщенного твердого раствора на основе  $\alpha$ -Fe(Nb, C). Поскольку максимальная растворимость Nb в  $\alpha$ -Fe не превышает 2.8 ат.%, что выше его концентрации в легированном слое, то часть атомов Nb может формировать дисперсные включения NbC внутри легированного слоя. В легированном слое присутствуют Nb-содержащие включения размером ~100 нм, согласно данным РЭМ. Однако из-за недостаточного разрешения энергодисперсион-

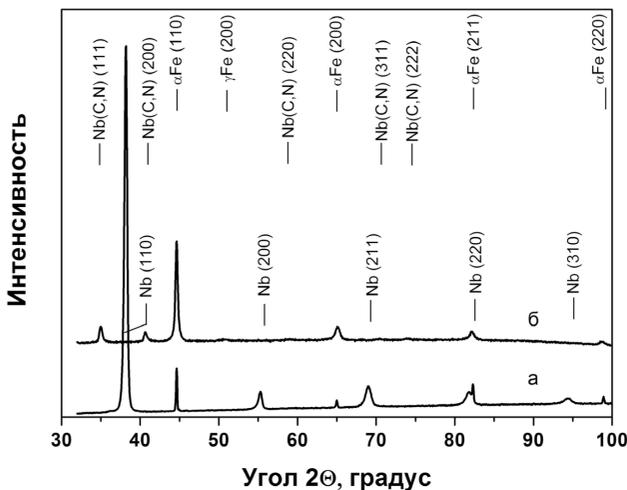


Рис. 1. Участок рентгенограммы образцов стали с покрытием Nb до (а) и после (б) обработки КПП

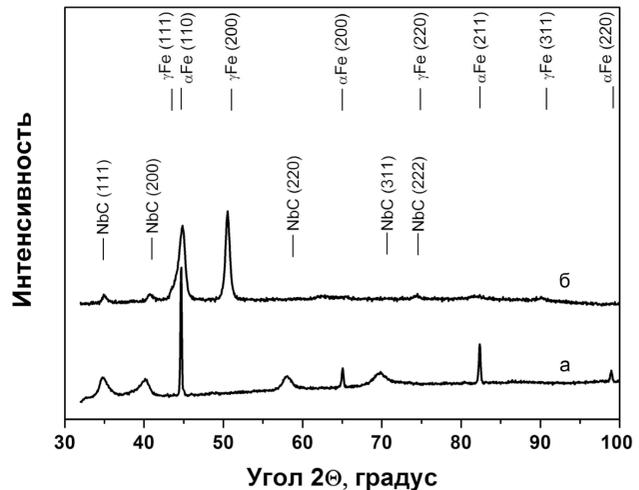


Рис. 2. Участок рентгенограммы образцов стали с покрытием NbC до (а) и после (б) обработки КПП

ного анализа нельзя достоверно утверждать о формировании NbC внутри легированного слоя. Присутствующие на рентгенограмме (рисунок 1) дифракционные линии Nb(C,N) могут быть отнесены как к поверхностной пленке карбонитрида, так и карбиду, который может формироваться внутри легированного слоя.

На рентгенограмме образца системы NbC/сталь после воздействия КПП также наблюдается присутствие дифракционных линий твердого раствора на основе  $\alpha$ -Fe, а также линий карбида или карбонитрида (рисунок 2). Кроме того, на рентгенограмме присутствуют интенсивные дифракционные линии твердого раствора на основе  $\gamma$ -Fe.

Структурно-фазовые изменения в поверхностном слое обуславливают изменение его свойств. В частности, происходит существенное увеличение микротвердости поверхностного слоя стали (исходное значение микротвердости при нагрузке 100 г —  $2.4 \pm 0.5$  ГПа). Для образца системы Nb/сталь после воздействия КПП значение микротвердости составило  $5.3 \pm 0.6$  ГПа, а для образца системы NbC/сталь —  $9.9 \pm 0.8$  ГПа.

Таким образом, легирование поверхностного слоя углеродистой стали У9 элементами предварительно нанесенного покрытия при воздействии компрессионных плазменных потоков позволяет существенно улучшить прочностные характеристики, что связывается с диспергированием структуры и формированием упрочняющих фаз.

### Литература

- [1] Углов В.В., Черенда Н.Н., Анищик В.М., Асташинский В.М., Квасов Н.Т. Модификация материалов компрессионными плазменными потоками. Минск: БГУ, 2013. 248 с.
- [2] Ласковнев А.П., Иванов Ю.Ф., Петрикова Е.А., Коваль Н.Н., Углов В.В., Черенда Н.Н., Бирик Н.В., Асташинский В.М. Модификация структуры и свойств эвтектического силумина электронно-ионно-плазменной обработкой. Минск: Беларуская навука, 2013. 287 с.
- [3] В.М. Асташинский, В.В. Углов, Н.Н. Черенда, В.И. Шиманский. Модификация титана при воздействии компрессионными плазменными потоками. Минск: Беларуская навука, 2016.-179 с.

*Cherenda N. N.<sup>1</sup>, Uglov V. V.<sup>1,2</sup>, Astashynski V. M.<sup>3,4</sup>, Kuzmitski A. M.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Belarusian State University. Belarus, Minsk

<sup>2</sup> National Research Tomsk Polytechnic University. Russia, Tomsk

<sup>3</sup> A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of National Academy of Sciences of Belarus. Belarus, Minsk

<sup>4</sup> National Research Nuclear University «MEPhI». Russia, Moscow

### MODIFICATION OF INSTRUMENTAL STEEL SURFACE LAYER STRUCTURAL-PHASE STATE BY COMPRESSION PLASMA FLOWS IMPACT

*The influence of compression plasma flows impact on the structural-phase state and microhardness of steel surface layer preliminary coated with niobium and niobium carbide was investigated in this work. The findings showed that plasma treatment led to the alloying of steel surface layer with coating elements. Presence of niobium carbide in the alloyed layer in both systems was found by means of X-ray diffraction. The approach described in this work allows to increase microhardness of carbon steel surface layer up to 10 GPa.*

*Keywords:* steel; niobium; niobium carbide, compression plasma flow; microhardness.

### References

- [1] Uglov V.V., Cherenda N.N., Anischchik V.M., Astashynski V.M., Kvasov N.T. Modification of materials by compression plasma flows. Minsk: BSU, 2013, 248 p. (in Russian)
- [2] Laskovnev A.P., Ivanov Yu.F., Petrikova E.A., Koval N.N., Uglov V.V., Cherenda N.N., Bibik N.V., Astashynski V.M. Modification of structure and properties of eutectic silumin by electron, ion and plasma treatment. Minsk: Belaruskaya navuka, 2013, 287 p. (in Russian)
- [3] Astashynski V.M., Uglov V.V., Cherenda N.N., Shymanski V.I. Titanium modification under compression plasma flows impact. Minsk: Belaruskaya navuka, 2016, 179 p. (in Russian)