

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА КОМПРЕССИОННОГО ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И СВОЙСТВА УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ, ЛЕГИРОВАННОЙ ЦИРКОНИЕМ

В.В. Углов¹⁾, В.М. Анищик¹⁾, Н.Н. Черенда¹⁾, Е.К. Стальмошенко¹⁾, В.М. Асташинский²⁾

¹⁾ Белорусский государственный университет, пр. Независимости 4,
220030 Минск, Беларусь, Тел. +375 17 2095512. E-mail: cherenda@bsu.by

²⁾ Институт молекулярной и атомной физики НАН Беларуси, пр. Независимости 70,
220072 Минск, Беларусь, Тел. +375 17 2841065. E-mail: ast@imaph.bas-net.by

Изучено влияние состава плазменного потока на структурно-фазовое состояние поверхностного слоя стали, легированного цирконием в результате жидкофазного перемешивания под действием компрессионного плазменного потока. При обработке плазменным потоком, формируемым в атмосфере азота, происходит насыщение поверхностного слоя азотом, что приводит к образованию твердых растворов на основе α - и γ -железа, а также нитрида ZrN. Установлено, что обработка компрессионными плазменными потоками обеспечивает улучшение механических характеристик поверхностных слоев.

Введение

В настоящее время не утрачивает своей актуальности использование концентрированных потоков энергии для модификации поверхностных свойств материалов. К рассматриваемому классу методов относится и воздействие компрессионных плазменных потоков (КПП) [1]. Преимуществом данного метода является сравнительно малое время обработки, так как для заметной модификации свойств достаточно одного импульса плазмы длительностью ~ 100 мкс. Ранее было показано, что комбинированный способ модификации, заключающийся в предварительном нанесении на поверхность мишени металлического покрытия и последующем воздействии КПП на систему «покрытие-подложка», позволяет эффективно легировать поверхностный слой обрабатываемого материала элементом покрытия [2-4]. Важным является исследование влияния режимов обработки на формирование конечной структуры модифицированного слоя. Поэтому целью данной работы являлось изучение особенностей изменения элементного состава, структурно-фазовых превращений и механических свойств низкоуглеродистой стали, легированной цирконием под действием потоков плазмы, сформированных в атмосфере азота и водорода.

Методика эксперимента

Объектом исследования являлась низкоуглеродистая сталь Ст3 (0,2 вес.% С), обладающая ферритно-перлитной структурой. Перед обработкой КПП на поверхность образцов наносилось покрытие Zr толщиной до 2 мкм методом вакуумно-дугового осаждения (ток горения дуги 100 А, напряжение смещения 120 В, время нанесения 10 мин). Обработку системы «покрытие-подложка» одним импульсом компрессионной плазмы осуществляли в газоразрядном магнитоплазменном компрессоре (МПК) компактной геометрии. Эксперименты проводили в режиме «остаточного газа», при котором предварительно откачанную вакуумную камеру МПК заполняли рабочим газом – азотом или водородом до давления 400 Па. Величина плотности мощности плазменного потока составляла $\sim 1,3 \cdot 10^5$ и $\sim 2,0 \cdot 10^5$ Вт/см² за импульс

для азотной и водородной плазмы, соответственно.

Поперечные сечения образцов изучались с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе LEO1455VP. Для определения распределения элементов по глубине использовалась Оже-электронная спектроскопия (ОЭС) на спектрометре PHI-660 (Perkin Elmer) при пошаговом распылении поверхностного слоя образца ионами аргона с энергией 3 кэВ, при этом скорость распыления мишени составляла $\sim 0,15$ мкм/мин. Элементный состав изучался также методом резерфордовского обратного рассеяния (РОР) ионов гелия с энергией 6 МэВ. Обработка полученных спектров РОР проводилась с помощью программы SIMNRA с учетом не резерфордовских сечений рассеяния. Фазовый состав исследовался методом рентгеноструктурного анализа (РСА) с помощью дифрактометра SEIFERT 3003 с приставкой HUBER SMC 9000 в излучении $\text{Cu K}\alpha$ при фиксированном угле падения излучения 3° . Измерения микротвердости по Виккерсу проводили на микротвердомере ПМТ-3 в диапазоне нагрузок 0,2-2,0 Н. Микротвердость исходной стали составляла $(1,9 \pm 0,1)$ ГПа. Фрикционные испытания по методу «палец-поверхность» выполнялись в условиях сухого трения при возвратно-поступательном скольжении закругленного индентора из твердого сплава ВК8 при нагрузке 1 Н.

Результаты и обсуждение

Легирование низкоуглеродистой стали цирконием под действием КПП происходит в результате плавления покрытия и слоя подложки и последующего жидкофазного перемешивания. После окончания действия плазмы идет этап охлаждения за счет теплоотвода на массу образца. Большие скорости охлаждения расплава ($\sim 10^7$ К/с) создают слой, обладающий всеми особенностями закалки из расплава.

РЭМ исследование поперечного сечения образцов показало, что толщина легированного слоя составляет ~ 5 и ~ 15 мкм после воздействия импульса азотной и водородной плазмы, соответственно. Большая толщина расплавленной области, полученная при обработке плазмой, формируемой в атмосфере водорода, связана с боль-

шей величиной плотности мощности потока, в отличие от случая азотной плазмы.

Исследования элементного состава методами ОЭС и POP выявили, что в результате воздействия азотной плазмы приповерхностный слой стали насыщается азотом до концентрации ~30 ат.% в максимуме своего распределения (рис. 1а). Глубина проникновения азота составляет ~600 нм.

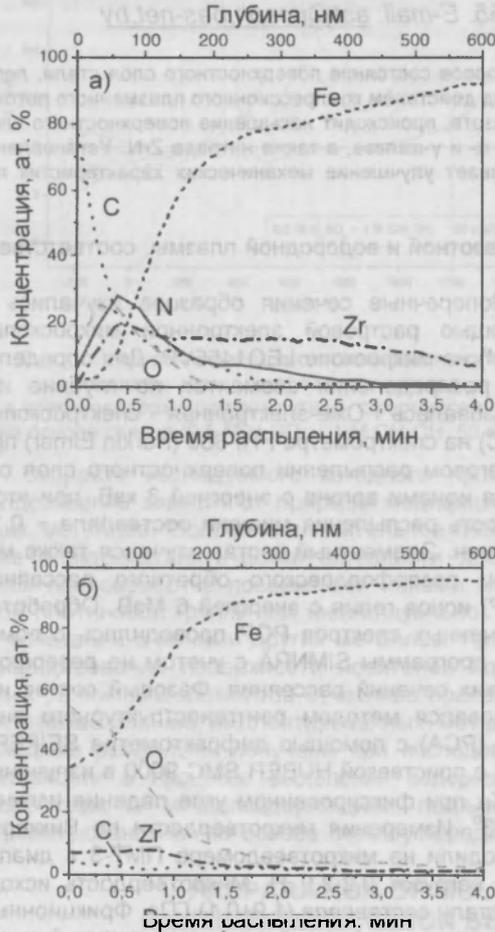


Рис. 1. Концентрационные профили элементов в поверхностных слоях стали, легированной под действием КПП при использовании в качестве рабочего вещества плазмы (а) – азота и (б) – водорода

Профили распределения циркония по глубине (рис. 1 и 2) показывают в обоих случаях обработки наличие на поверхности слоя толщиной ~200 нм с повышенной концентрацией циркония. Его формирование обуславливается как перераспределением циркония в процессе кристаллизации вследствие различной растворимости в жидкой и твердой фазах [5], так и влиянием насыщения поверхности азотом и кислородом и последующим формированием оксидной и нитридной фаз, выявленных рентгеноструктурным анализом (рис. 3). Далее следует область, содержащая в качестве основного легирующего элемента цирконий. Его концентрация после воздействия импульсом азотной плазмы составляет ~12 ат.% (рис. 1а). Концентрация циркония в слое, сформированном воздействием водородной плазмы, составляет ~4

ат.% (рис. 1б), что связано с увеличением толщины перемешанной области.

В случае обработки азотной плазмой в поверхностном слое, содержащем азот и повышенную концентрацию циркония, происходит формирование преципитатов нитрида циркония ZrN (рис. 3). В модифицированном слое содержатся также твердые растворы легирующих элементов в α - и γ -железе, цирконий и оксид ZrO_2 , образование которого связано с насыщением поверхностного слоя кислородом, присутствующим в остаточной атмосфере. На рентгенограмме стали, легированной цирконием под действием водородной плазмы, наблюдается наличие только твердого раствора на основе α -Fe (рис. 3). Отсутствие γ -фазы в этом случае свидетельствует о том, что в результате перемешивания под действием азотной плазмы формирование γ -фазы обусловлено преимущественно стабилизацией азотом.

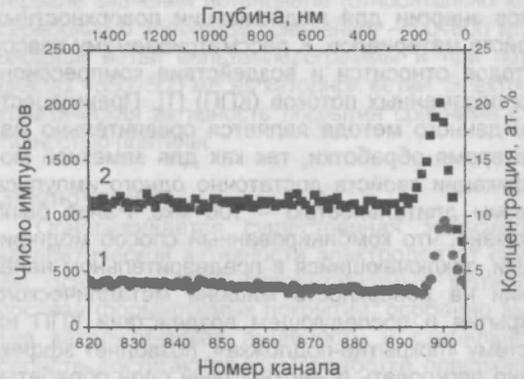


Рис. 2. Распределение циркония по глубине, определенное методом POP, в поверхностных слоях стали, легированной под действием КПП при использовании в качестве рабочего вещества плазмы (1) – водорода и (2) – азота

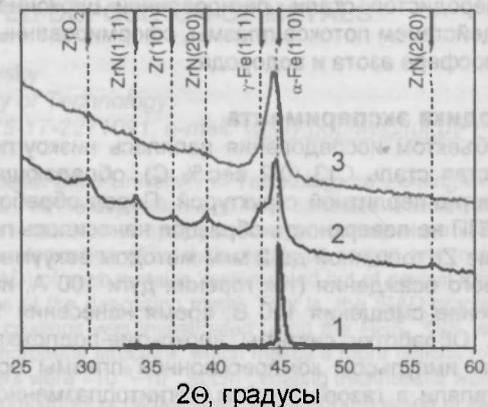


Рис. 3. Участки рентгенограмм исследуемых образцов: (1) исходная сталь; (2) сталь, легированная цирконием под действием КПП при использовании в качестве рабочего вещества плазмы азота; (3) – водорода

Изменения элементного и фазового состава стали, подвергнутой модификации предлагаемым комбинированным способом, приводят к улучше-

нию механических свойств. Микротвердость поверхностного слоя стали, легированного цирконием под действием водородного КПП, увеличивается до $(3,7 \pm 0,2)$ ГПа, что в 2 раза больше микротвердости исходной стали. Повышение микротвердости обусловлено образованием твердого раствора и другими эффектами, связанными с закалкой из расплава. В случае легирования под действием азотной плазмы микротвердость увеличивается до $(5,9 \pm 0,4)$ ГПа, что в 3 раза больше микротвердости исходной стали. Большее упрочнение в данном случае обусловлено большей концентрацией циркония в твердом растворе, а также формированием азот-содержащих фаз. Представленные значения микротвердости получены при глубине индентирования 3,5 мкм, что соответствует толщине слоя, где происходят основные изменения элементного и фазового состава.

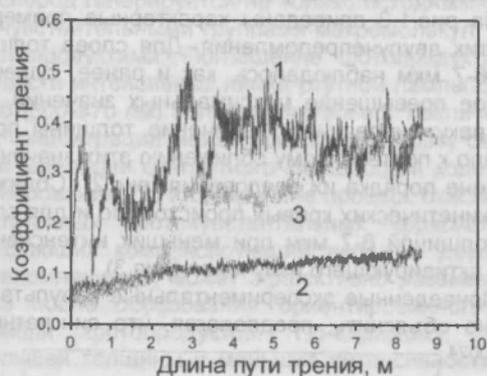


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения от длины пути трения исследуемых образцов: (1) исходная сталь; (2) сталь, легированная цирконием под действием КПП при использовании в качестве рабочего вещества плазмы азота; (3) – водорода

Фрикционные испытания (рис. 4) показали значительное уменьшение коэффициента сухого трения стали, легированной под действием азот-

ной плазмы. Это связано с большей микротвердостью поверхностного слоя.

Заключение

Проведено легирование углеродистой стали цирконием комбинированной обработкой, заключающейся в предварительном нанесении на поверхность покрытия циркония и последующей обработке компрессионным плазменным потоком. Установлено, что использование в качестве плазмообразующего вещества химически-активного газа – азота приводит к дополнительному легированию поверхностного слоя азотом и формированию азот-содержащих фаз, что обеспечивает улучшение механических характеристик по сравнению с механическими характеристиками поверхностного слоя стали, легированного под действием водородной плазмы.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Ухову В.А. за получение Оже-электронных спектров. Работа частично поддержана грантом БРФФИ №Т06М-193.

Список литературы

1. Cherenda N.N., Uglov V.V., Anishchik V.M., Stalmashonak A.K., Astashinski V.M., Kuzmickii A.M., Punko A.V., Thorwath G., Stritzker B. // Surface and Coatings Technology. – 2006. – V. 200. – P. 5334.
2. Углов В.В., Черенда Н.Н., Стальмошенко Е.К., Кононов А.Г., Тарасюк Н.С., Асташинский В.М., Кузьмицкий А.М., Ковязо А.В. // Вакуумная техника и технология. – 2006ю – Т. 16, №2. – С. 123.
3. Углов В.В., Черенда Н.Н., Стальмошенко Е.К., Тарасюк Н.С., Асташинский В.М., Кузьмицкий А.М., Ухов В.А. // Физика и химия обработки материалов. – 2007. – № 1. – С. 40.
4. Uglov V.V., Cherenda N.N., Anishchik V.M., Stalmashonak A.K., Astashinski V.M., Mishchuk A.A. // Vacuum. – 2007. – V. 81. – P. 1341.
5. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справ.: В 3 т.: Т.2 / Под ред. Н.П.Лякишева. – М.: Машиностроение, 1997. – 1024 с

THE INFLUENCE OF COMPRESSION PLASMA FLOW COMPOSITION ON THE STRUCTURE-PHASE STATE AND PROPERTIES OF A CARBON STEEL ALLOYED BY ZIRCONIUM

V.V. Uglov¹, V.M. Anishchik¹, N.N. Cherenda¹, A.K. Stalmashonak¹, V.M. Astashynski²

¹Belarussian State University, pr. Nezavisimosti 4, 220030 Minsk, Belarus.

Tel. +375 17 2095512. E-mail: cherenda@bsu.by

²Institute of molecular and atomic physics of Belarus NAS, pr. Nezavisimosti 70, 220072 Minsk, Belarus.

Tel. +375 17 2841065. E-mail: ast@imaph.bas-net.by

The influence of plasma flow composition on the structure-phase state of a steel surface layer alloyed by zirconium as a result of liquid phase mixing under the action of compression plasma has been investigated. Treatment by the plasma flow formed in nitrogen atmosphere resulted in surface layer saturation by nitrogen, thus leading to the formation of solid solutions on the basis of α - and γ iron, and ZrN nitride. It was found that compression plasma flows treatment provided the improvement of mechanical characteristics of surface layers.