

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ИМЕНИ Б.И.СТЕПАНОВА**

**ТРУДЫ VII СИМПОЗИУМА
БЕЛАРУСИ И СЕРБИИ ПО ФИЗИКЕ И ДИАГНОСТИКЕ
ЛАБОРАТОРНОЙ И АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ
(ФДП- VII'2008)**

22 – 26 сентября 2008 г., Минск, Беларусь

Под редакцией В.И.Архипенко, В.С. Буракова, А.Ф. Чернявского

**Минск
ООО «Ковчег»
2008**

УДК 533.9 (043.2)

Под редакцией
Архипенко В.И., Буракова В.С. и Чернявского А.Ф.

**ТРУДЫ VII СИМПОЗИУМА БЕЛАРУСИ И СЕРБИИ
ПО ФИЗИКЕ И ДИАГНОСТИКЕ ЛАБОРАТОРНОЙ И
АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ**

(ФДП- VII'2008): Минск, 22-26 сентября 2008 г. / Под ред.
Архипенко В.И., Буракова В.С. и Чернявского А.Ф. – Мн.: Ковчег,
2008 г. – 238 с.

Сборник трудов составлен по материалам докладов, представленных на VII симпозиуме Беларуси и Сербии «Физика и диагностика лабораторной и астрофизической плазмы», 22-26 сентября 2008 года, г. Минск. Тематика включенных в сборник статей охватывает широкий круг вопросов, касающихся способов получения плазмы, методов ее диагностики и их применения для решения актуальных практических задач.

The Proceedings have been compiled from materials of reports presented at VII Symposium of Belarus and Serbia “Physics and Diagnostics of Laboratory and Astrophysical Plasmas” (PDP-VII'2008), September 22 – 26, 2008, Minsk. The scope of papers covers a wide range of topics concerning techniques of plasma generation, methods of plasma diagnostics, and their application in solving real-world challenges of the present day.

УДК 533.9 (043.2)

СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В АРМКО-ЖЕЛЕЗЕ, СВЯЗАННЫЕ С ТЕРМОКИНЕТИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ КОМПРЕССИОННОГО ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА

В.В. Асташинский¹, И.Н. Румянцева²

¹Белорусский государственный университет, пр. Независимости 4,
220030 Минск, Беларусь, vincuk@mail.by

²Физико-технический институт НАН Беларуси, ул. Академика Купровича 10,
220141 Минск, Беларусь

Большое распространение в машиностроении получили технологии, основанные на плазменной модификации, обеспечивающей повышение износостойкости деталей машин и механизмов. Проведенные ранее исследования показали, что воздействие сверхзвуковыми компрессионными плазменными потоками на образцы приводит к плавлению их поверхности и формированию слоев, образующихся при быстрой кристаллизации из расплава, в результате чего их структура и состав претерпевают существенные изменения по сравнению с материалом до обработки /1-2/. Подобная модификация сопровождается протеканием совокупности сложных плазмодинамических и теплофизических процессов, таких как формирование ударно-сжатого плазменного слоя у поверхности мишени, нагрев, плавление и испарение обрабатываемого материала, разлет пароплазменного облака, формирование ударной волны, закалка из жидкого и осаждение из газообразного состояния и др. /3, 4/. С целью выделения из этих явлений тех процессов, которые непосредственно связаны с термокинетическим воздействием плазменного потока, были проведены исследования структурно-фазовых изменений в армко-железе в результате воздействия компрессионными потоками, плазмообразующим веществом которых являлся водород.

Обработку образцов компрессионными плазменными потоками осуществляли с помощью газоразрядного магнитоплазменного компрессора (МПК) компактной геометрии в Институте физики НАН Беларуси. Энергия конденсаторной батареи ускорителя составляет 9,6 кДж, что обеспечивает длительность разряда 100 мкс. Плотность мощности потока — $1,8 \cdot 10^5$ Вт/см². МПК работал в режиме «остаточного газа», при котором предварительно откачанная вакуумная камера заполнялась рабочим газом (водородом) до давления 400 Па.

Исследования элементного состава образцов проводили методом вторично-ионной масс-спектропии (ВИМС) на приборе Atomica Instruments Ion Microprobe 4100 при распылении ионами цезия. Площадь сканирования при распылении составляла 200×200 мкм, а угол

распыления – 45 градусов. Ток ионов цезия – 1,5 нА. С помощью оптического микроскопа «Neophot 21» изучали структуру микрошлифов образцов при увеличении до 2000 раз. Более детальное изучение структуры проводили методом растровой электронной микроскопии на микроскопе LEO1455VP. Фазовый состав изучали методами мессбауэровской конверсионной электронной спектроскопии и рентгеноструктурного анализа. Измерение микротвердости проводили на приборе ПМТ-3 в диапазоне нагрузок 0,02-0,1 Н, а исследования фрикционных характеристик — на трибометре ТАУ-1М.

Как показали результаты ВИМС исследований, в процессе воздействия на образцы компрессионным плазменным потоком происходит внедрение водорода в тонкий приповерхностный слой. В результате сопоставления полученного спектра с литературными данными [5], описывающими зависимость глубины кратера распыления от времени при аналогичных условиях, установлено, что глубина проникновения водорода не превышает 0,5 мкм. Таким образом, процесс воздействия компрессионным потоком, плазмообразующим веществом которого являлся водород, можно рассматривать только как термическое воздействие плазменного потока на приповерхностные слои толщиной более 1 мкм.

Металлографические исследования поперечного сечения обработанных образцов армко-железа показали формирование у поверхности модифицированного слоя толщиной 20 мкм, за которым следует переходная зона, выявляющаяся после травления 6 % раствором азотной кислоты в спирте и незначительно отличающаяся от структуры в объеме образца дисперсностью ферритных зерен.

Структуру приповерхностного слоя выявили после дополнительного травления спиртовым раствором 4 % пикриновой кислоты. Данный слой состоит из ферритных зерен, размер которых уменьшается примерно в 10 раз по сравнению с исходной структурой. Более детальный анализ поверхности, проведенный с помощью растровой электронной микроскопии, позволил выявить характерную структуру мартенсита в пределах бывшего аустенитного зерна, имеющую ярко выраженное игольчатое строение с примерным расположением игл под углом ~ 60 градусов друг к другу (рис. 1 а). Данная структура формируется в результате перераспределения поверхностного углерода в процессе кристаллизации. Спустя длительный промежуток времени (несколько месяцев) после обработки водород, содержащийся в поверхностной области, по-видимому, покидает решетку железа, оставляя характерные ямки травления — темные области, показанные на рис. 1 б.

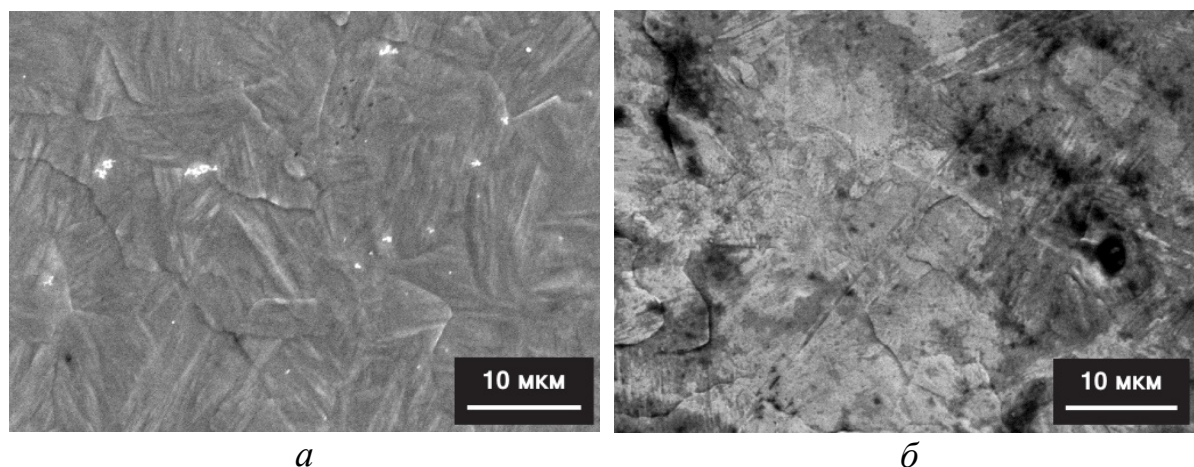


Рис. 1. Поверхность образца железа непосредственно после обработки плазменным потоком (а) и спустя несколько месяцев (б)

Информацию о фазовом составе приповерхностного слоя толщиной 0,1 мкм получали из расшифровки соответствующего мессбауэровского спектра, представляющего собой преимущественно секстет (эффективное магнитное поле — 33,4 Тл), относящийся к α -Fe фазе, который нельзя представить в виде суммы простого секстета феррита и сложного секстета мартенсита. Отсутствие сигнала от мартенсита позволяет говорить о его формировании в поверхностном слое толщиной существенно меньшей, чем 0,1 мкм. Данные рентгеноструктурного анализа также указывают, что фазовый состав не претерпел существенных изменений по сравнению с исходным состоянием. На дифрактограммах различима лишь серия линий, соответствующая α -Fe с параметром решетки 0,286 нм.

Таким образом, дисперсная структура и незначительно изменившийся фазовый состав приповерхностного слоя позволяют заключить, что по своей природе этот слой является зоной оплавления, формирующейся в результате термокинетического влияния воздействующего плазменного потока.

Результаты измерения твердости образцов согласуются с данными о структуре модифицированного слоя. В результате воздействия плазменным потоком происходит увеличение значения микротвердости с $3,5 \pm 0,2$ ГПа до $5,2 \pm 0,6$ ГПа. Как было описано выше, спустя несколько месяцев после воздействия водород покидает поверхностные слои, что сказывается также и на твердости поверхности, уменьшающейся до $4,0 \pm 0,5$ ГПа. Данные трибологических испытаний согласуются с результатами измерения микротвердости и показывают уменьшение коэффициента трения поверхностных слоев обработанных водородной плазмой образцов более чем в два раза по сравнению с исходными до

значения 0,15. С увеличением пройденного индентором пути коэффициент трения увеличивается до значения 0,25, после чего остается неизменным в пределах погрешности измерений. Спустя несколько месяцев после воздействия коэффициент трения поверхностной области снижается до значения 0,08 и остается ниже коэффициента трения поверхности непосредственно после обработки. Коэффициент трения более глубоких слоев, так же как и их твердость, остается неизменным.

Анализ процесса термокинетического воздействия плазменного потока на образец показывает, что в процессе плавления и кристаллизации на границе кристалл-расплав возникает существенный градиент температур, что приводит к появлению термоупругих напряжений как сжатия, так и растяжения, которые, в свою очередь, способствуют генерации дислокаций в приповерхностном слое. Известно, что области сжатия и растяжения, связанные с дислокациями, притягивают атомы примесей, в результате чего движение дислокации затрудняется. Таким образом, внедренный в поверхностные слои водород препятствует движению дислокаций, что оказывает влияние на увеличение твердости. Когда водород покидает поверхность, дислокации становятся более подвижными и могут выйти на поверхность с образованием ямок травления, подобных представленным на рис. 1 б. Одновременно с этим, увеличение подвижности дислокаций приведет к уменьшению твердости поверхности.

Авторы благодарят сотрудников лаборатории физики плазменных ускорителей Института физики НАН Беларуси за обработку образцов компрессионными плазменными потоками.

Список литературы

1. V.V. Uglov, V.M. Anishchik, V.V. Astashynski, et al., Surface and Coatings Technology, **180-181** (2004) 633-636.
2. V.M. Anishchik, V.V. Uglov, V.V. Astashynski, et al., Vacuum, **70** (2-3) (2003) 269-274.
3. В.М. Асташинский, Г.И. Баканович, Л.Я. Минько, Физика плазмы, **10** (5) (1984) 1058-1063.
4. V.V. Uglov, V.M. Anishchik, V.V. Astashynski, et al., Surface and Coatings Technology, **158-159** (2002) 272-275.
5. M.P. Fewell, Stainless Steel 2000: Proceedings of an International Current Status Seminar on Thermochemical Surface Engineering of Stainless Steel, Osaka, Japan, November, 2000, Maney Publishing (2001) 177-200.