

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЙ С ТВЕРДЫМ ТЕЛОМ

INTERACTION OF RADIATION WITH SOLIDS



БИТТ-2007

Материалы
7-й Международной
конференции
Минск, Беларусь
26–28 сентября 2007

IRS-2007

Proceedings
of the 7-th International Con-
ference
Minsk, Belarus
September 26–28, 2007

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО НАУКЕ И ТЕХНОЛОГИЯМ
БЕЛОРУССКИЙ ИННОВАЦИОННЫЙ ФОНД
БЕЛОРУССКИЙ РЕСПУБЛИКАНСКИЙ ФОНД
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
БЕЛОРУССКОЕ ФИЗИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЙ С ТВЕРДЫМ ТЕЛОМ

INTERACTION OF RADIATION WITH SOLIDS

МАТЕРИАЛЫ
7-й Международной конференции
Минск, 26–28 сентября 2007 г.

Минск
«Издательский центр БГУ»
2007

УДК 537.5(043.2)
ББК 22.333
В40

Редакционная коллегия:
доктор физико-математических наук, профессор *В. М. Анищик*
(ответственный редактор);
кандидат физико-математических наук *С. И. Жукова*;
кандидат физико-математических наук *И. И. Азарко*;
О. Л. Дорожкина

Взаимодействие излучений с твердым телом = Interaction of radiation with solids :
В40 материалы 7-й Междунар. конф., Минск, 26—28 сент. 2007 г. / редкол. В. М. Анищик
(отв. ред.) [и др.]. — Минск : Изд. центр БГУ, 2007. — 411 с.
ISBN 978-985-476-530-3.

В сборнике приведены доклады, представленные на 7-й Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом», Минск, 26—28 сентября 2007 г., и охватывающие следующие тематики: процессы взаимодействия излучений с твердым телом, радиационные эффекты в твердом теле, взаимодействие плазмы с поверхностью, модификация свойств материалов, формирование, структура и свойства покрытий, оборудование для радиационных технологий.

УДК 537.5(043.2)
ББК 22.333

ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ЖЕЛЕЗА И СТАЛИ У8А В РЕЗУЛЬТАТЕ ОБРАБОТКИ КОМПРЕССИОННЫМ ПЛАЗМЕННЫМ ПОТОКОМ

В.В. Асташинский¹⁾, Ю.А. Федотова²⁾, J. Stanek³⁾

¹⁾ Белорусский государственный университет,

220080 Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 4, e-mail: vincuk@mail.by

²⁾ Национальный научно-учебный центр физики частиц и высоких энергий БГУ,

220040 Беларусь, г. Минск, ул. Богдановича, 153, e-mail: julia@hep.by

³⁾ Jagiellonian University, 4 Rejmonta Str., 30-059 Cracow, Poland

В результате воздействия компрессионным плазменным потоком (1 импульс длительностью 100 мкс, плазмообразующее вещество — азот, его давление в камере ускорителя 400 Па) структура приповерхностного слоя железа и стали У8А представляет собой мелкодисперсную зону оплавления и зону столбчатых фаз. В зоне оплавления армко-железа формируется нитрид $\epsilon\text{-Fe}_{3+x}\text{N}$, распадающийся на $\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$ и азотистый аустенит, который при дальнейшем понижении температуры превращается в феррит. В зоне оплавления стали У8А происходит растворение цементита в поверхностном слое, переход высвободившегося углерода в аустенит, который, в свою очередь, превращается в перлит, а также дополнительное легирование аустенита азотом и образование нитридных фаз.

Введение

Современные методы поверхностной обработки материалов позволяют получать новые структурно-фазовые состояния с физико-механическими характеристиками, представляющими интерес для практического применения. Среди них отдельный интерес представляет химико-термическая обработка, в том числе и азотирование, которое может быть особенно эффективно для уменьшения разрушения рабочих поверхностей деталей и узлов [1]. В методах, основанных на воздействии на мишень плазменными потоками азота, термическая обработка сочетается с одновременным легированием.

Воздействие сверхзвуковыми компрессионными плазменными потоками на поверхность образцов, приводящее к существенной их модификации, сопровождается протеканием совокупности сложных плазмодинамических и теплофизических процессов, таких, как формирование ударно-сжатого плазменного слоя у поверхности мишени, а также нагрев, плавление, испарение, разлет пароплазменного облака (абляция), закалка из жидкого и газообразного состояния и т. д. обрабатываемого материала [2]. С целью разделения этих явлений были проведены исследования, связанные с изучением влияния на материалы плазменных потоков с различным плазмообразующим веществом — водородом и азотом.

Основная часть

Обработку образцов компрессионными плазменными потоками осуществляли с помощью газоразрядного магнитоплазменного компрессора (МПК) компактной геометрии в институте физики НАН Беларуси. Концентрация электронов плазмы — $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, длительность разряда 100 мкс, а ее температура — 3 эВ. МПК работал в режиме «остаточного газа», при котором предварительно откачанная вакуумная камера заполнялась рабочим газом (плазмообразующим веществом) до заданного давления 400 Па.

В ходе проведенных металлографических исследований обнаружено, что у обрабатываемой

поверхности формируется модифицированный слой. При воздействии на образцы железа потоком, плазмообразующим веществом которого являлся водород, общая толщина этого слоя составила 20 мкм. Непосредственно у поверхности образца обнаружены ферритные зерна, размер которых примерно в 10 раз меньше исходной структуры.

Процесс ионного азотирования оказывает существенное влияние на структуру и состав модифицированного слоя. В случае, когда плазмообразующим веществом являлся азот, по данным металлографических исследований модифицированный слой представляет собой мелкодисперсную зону оплавления, толщина которой увеличивается с возрастанием энергии набегающего потока и зону столбчатых фаз. При воздействии серий импульсов, толщина этих зон остается постоянной, но изменяется дисперсность их составляющих. Наблюдаемая микроструктура модифицированного слоя образца формируется в результате скоростного охлаждения. Каждая из модифицированных зон, по видимому, имеет примерно один и тот же набор фазовых составляющих, но в различных соотношениях [3].

Изучение фазового состава зоны оплавления проводили методом мессбауэровской конверсионной электронной спектроскопии (МКЭС), в котором регистрируются конверсионные электроны с длиной свободного пробега в железе $\sim 0,1 \text{ мкм}$. Экспериментальный спектр образца армко-железа, обработанного компрессионным потоком, плазмообразующим веществом которого являлся водород, представляет собой преимущественно секстет $H_{\text{эфф}} = 33,4 \text{ Тл}$ (рис. 1, а) относящийся к $\alpha\text{-Fe}$ фазе, который нельзя представить в виде суммы простого секстета феррита и сложного секстета мартенсита.

МКЭС спектр образца, обработанного в режиме, когда плазмообразующим веществом являлся азот, может быть разложен на пять составляющих: синглет, центральный дублет, и три магнитных секстета (рис. 1, б). Синглет с изомерным сдвигом $\Delta = 0,21 \text{ мм/с}$ (относительная доля — 30 %) вероятнее всего относится к азотистому

аустениту (γ_N). Исходя из данных рентгеноструктурного анализа [4], наиболее вероятным является формирование фазы $\varepsilon\text{-Fe}_{3-x}\text{N}$, которая соответствует квадрупольному дублету ($\Delta = 0,26$ мм/с, квадрупольное расщепление $\Delta E = 0,68$ мм/с), несмотря на то, что параметры дублета не совпадают с литературными значениями [5] для этой фазы. По-видимому, наблюдаемый дублет, относительный вклад которого в спектр составляет 16 %, соответствует $\text{Fe}_{2,5}\text{N}$ с сильным отклонением от стехиометрического состояния. Подобное отклонение может происходить из-за внедрения примесей или из-за неомогенности азота в процессе плазменного воздействия. Секстет с $H_{\text{эфф}} = 33,0$ Тл (относительный вклад — 14 %) соответствует $\alpha\text{-Fe}$ без примесных атомов (азот или углерод) в ближайшем окружении. Параметры двух других секстетов ($H_{\text{эфф}} = 21,1$ и $23,8$ Тл) совпадают в пределах погрешности с параметрами $\varepsilon\text{-Fe}_{3,2}\text{N}$ [6]. Относительное содержание этих фаз можно оценить, как 40 %.

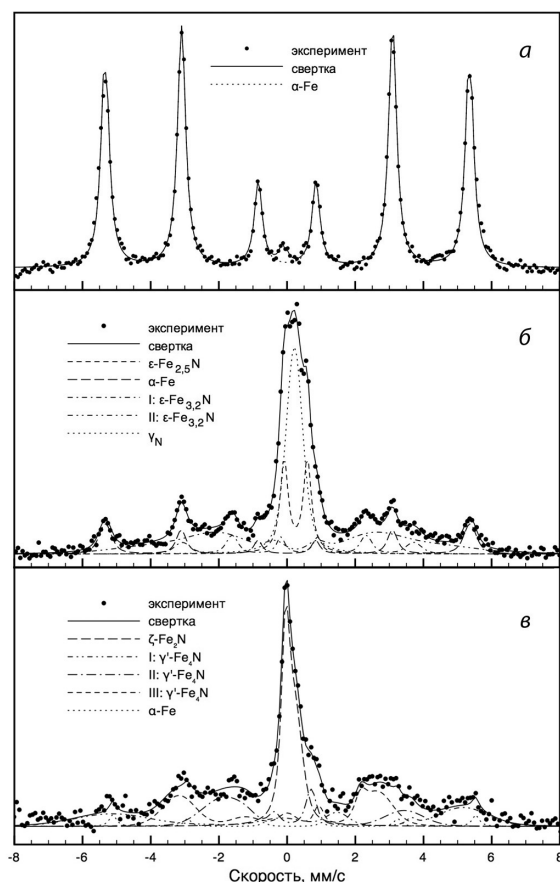


Рис. 1 — МКЭС спектры обработанного армко-железа

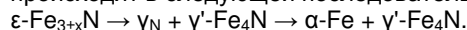
Анализ фазового состава образцов железа, обработанных в режиме, когда в экспериментах использовали начальное давление рабочего газа (азота) в камере МПК 6,5 кПа, выявил существенные отличия по сравнению с режимом стандартной обработки. Соответствующий МКЭС спектр (рис. 1, в) состоит из центрального синглета, соответствующего $\zeta\text{-Fe}_2\text{N}$ ($\Delta = 0,10$ мм/с, $\Delta E =$

0,28 мм/с) с относительным вкладом 29 %, трех магнитных секстетов ($H_{\text{эфф}} = 32,0, 15,9$ и $18,1$ Тл), параметры которых совпадают с литературными данными для фазы $\gamma'\text{-Fe}_4\text{N}$ [6] и секстета $H_{\text{эфф}} = 33,0$ Тл, соответствующего $\alpha\text{-Fe}$ (относительный вклад — менее 5 %).

Таким образом, основной составляющей зоны оплавления образцов армко-железа является высокодисперсный феррит с включениями остаточного азотистого аустенита и нитридов. Неравномерное распределение легирующего элемента обуславливает появление как фаз $\alpha\text{-Fe}$ (там, где концентрация азота менее 8 ат. %), так и фазы γ_N (концентрация азота превышает 8 ат. %).

При обработке в режиме, использующем повышенное начальное давление азота, увеличивается однородность распределения легирующего элемента, и зона оплавления состоит преимущественно из $\gamma'\text{-Fe}_4\text{N}$ с включениями $\zeta\text{-Fe}_2\text{N}$.

Фазовые превращения в зоне оплавления происходят в следующей последовательности:



Как показали металлографические исследования поперечного сечения образцов стали У8А, обработанных компрессионным потоком, модифицированный слой образца, как и в случае обработки железа, состоит из двух зон. Следовательно, наличие в обрабатываемом материале примесей (в данном случае — 0,8 вес. % углерода) несущественным образом влияет на структуру модифицированной поверхности, однако определяет ее фазовый состав.

Анализ мессбауэровских спектров образцов стали У8А до и после обработки азотной и водородной плазмой позволяет выявить закономерности фазовых превращений в поверхностном слое.

МКЭС спектр исходного образца раскладывается на два магнитных секстета с $H_{\text{эфф}} = 18,7$ и $33,0$ Тл — цементит (относительный вклад — 20 %) и феррит (рис. 2, а). Анализ центральной части соответствующего спектра показывает, что при обработке потоком с плазмообразующим веществом — водородом, содержание цементита снижается до 16 %, а феррита — до 72 %, за счет появления остаточного аустенита, который проявляется на соответствующем спектре в виде квадрупольного дублета (рис. 2, в).

МКЭС спектр образца стали У8А обработанного компрессионной плазмой (плазмообразующее вещество — азот) имеет принципиально другой вид: два центральных дублета и два секстета (рис. 2, б). Параметры дублета ($\Delta = -0,07$ мм/с и $\Delta E = 0,21$ мм/с), относительное содержание которого составляет 18 %, в пределах погрешности совпадают с параметрами аустенитной фазы. Еще один квадрупольный дублет с $\Delta = 0,28$ мм/с (относительное содержание — 32 %) вероятнее всего характеризует фазу $\text{Fe}_{2,5}\text{N}$. Две другие магнитные фазы (секстеты с $H_{\text{эфф}} = 16,4$ и $33,1$ Тл) представляют собой сильно напряженный цементит и феррит с относительным содержанием 26 % и 24 %, соответственно. Следовательно, при обработке образца стали У8А азотной плазмой в поверхностном слое первой зоны происходит насыщение азотом, приводящее к формированию ε -нитридной фазы и перераспределение углеро-

да, проявляющееся в увеличении доли карбидной фазы.

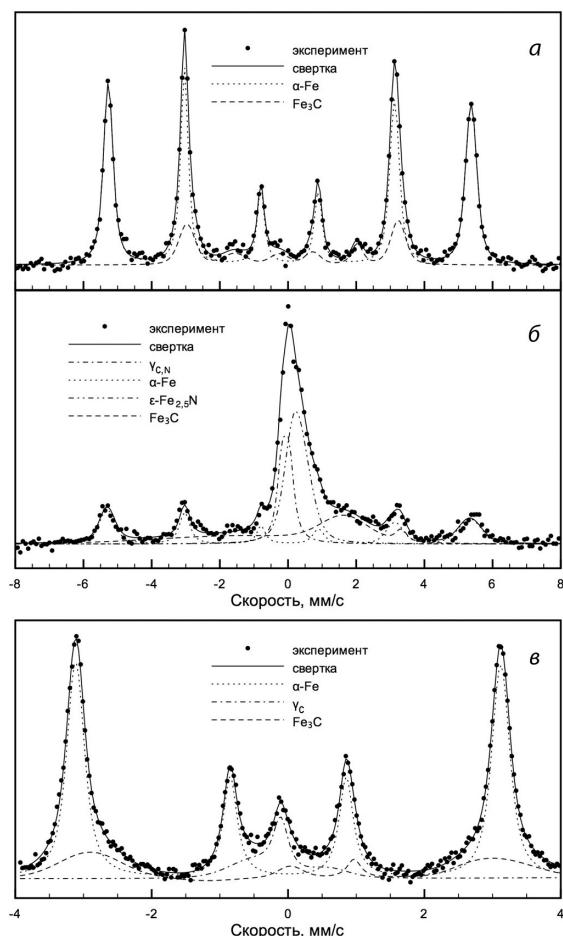


Рис. 2 — МКЭС спектры стали У8А

Таким образом, термическое воздействие компрессионного плазменного потока на образцы стали У8А приводит к растворению цементита в поверхностном слое, причем высвободившийся углерод переходит в аустенит. Воздействие потоками с плазмообразующим веществом — азотом приводит к дополнительному легированию аустенита азотом, а также образованию нитридных фаз.

Заключение

Проведенные исследования показали, что конечная структура приповерхностной области обработанного компрессионным плазменным потоком железа формируется в результате эвтектидного распада при охлаждении из ϵ -области. При этом фазовые превращения в зоне оплавления происходят в следующей последовательности: ϵ -Fe_{3.5}N распадается на γ' -Fe₄N и азотистый аустенит, который при дальнейшем понижении температуры, в зависимости от содержащегося в нем азота, превращается в феррит.

Также установлено, что в результате термического воздействия плазменного потока (воздействие компрессионным плазменным потоком, плазмообразующим веществом которого является водород) в поверхностном слое стали У8А, происходит растворение цементита, сопровождающееся переходом высвободившегося углерода в аустенит. При воздействии компрессионным плазменным потоком, плазмообразующим веществом которого является азот, кроме вышеописанных процессов происходит дополнительное легирование аустенита азотом и образование нитридных фаз.

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории физики плазменных ускорителей Института физики НАН Беларуси за обработку образцов компрессионными плазменными потоками.

Работа выполнена в рамках проекта БРФФИ № T06M-192.

Список литературы

1. Lampe Th., Eisenberg S., Cabeo E. // Surf. and Coat. Tech. — 2003. — Vol. 174-175. — P. 1-7.
2. Anishchik V.M., Uglov V.V., Astashynski V.V., et al. // Vacuum. — 2003. — Vol. 70, iss. 2-3. — P. 269-274.
3. Углов В.В., Анищик В.М., Асташинский В.В. и др. // Физика и химия обработки материалов. — 2004. — №4. — С. 37-42.
4. Anishchik V.M., Astashynski V.V., Uglov V.V., Fedotova J.A., Stanek J. // Vacuum. — 2005. — Vol. 78, iss. 2-4. — P. 589-592.
5. Kopcewicz M., Jagielski J., Turos A., Williamson D.L. // J. Appl. Phys. — 1992. — Vol. 71. — P. 4217-4226.
6. Jiraskova Y. et al. // J. Magn. Magn. Mater. — 2001. — Vol. 234. — P. 477-488.

PHASE TRANSFORMATIONS IN NEARSURFACE LAYER OF IRON AND U8A STEEL UNDER THE ACTION OF COMPRESSION PLASMA FLOW

V.V. Astashynski¹⁾, J.A. Fedotova²⁾, J. Stanek³⁾

¹⁾ Belarusian State University, 4 Nezalezhnastsi Ave., 220080 Minsk, Belarus, e-mail: vincuk@mail.by

²⁾ National Center for Particle and High Energy Physics BSU, 153 Bogdanovich Str., 220040 Minsk, Belarus

³⁾ Jagiellonian University, 4 Rejmonta Str., 30-059 Cracow, Poland

The structure of nearsurface layer of Armco-Fe and U8A steel (0.8 wt. % of C) is represented by the fine-dyspersated melting zone and the zone of columnar phases as a result of the action of compression plasma flow (1 pulse of 100 μ s duration, pressure of employing nitrogen as plasma-forming gas — 400 Pa). The ϵ -Fe_{3.5}N nitride formed in the melting zone of Armco-Fe decomposed into γ' -Fe₄N and nitrous austenite which turned into ferrite under the following decrease of temperature. The cementite dissolution in surface layer, the transition of released carbon into austenite which in turn changed in the perlite as well as additional nitriding of the austenite and the formation of nitride phases were happened in melting zone of U8A steel.