

04;05;10;12

## **Модифицирование и легирование $\alpha$ -Fe с помощью воздействия высокоскоростной импульсной плазменной струи**

© А.Д. Погребняк, Ю.Н. Тюрин, А.П. Кобзев

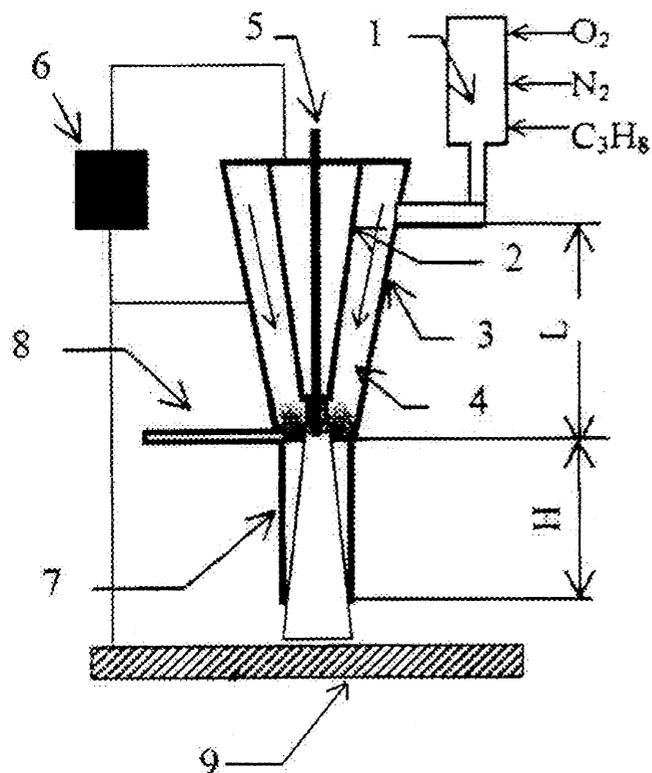
Сумский институт модификации поверхности, Украина  
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев, Украина  
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

*В окончательной редакции 20 марта 2001 г.*

С помощью специально выбранных режимов работы плазмотрона с эродирующим (испаряющимся) электродом из Мо были обработаны образцы  $\alpha$ -Fe импульсной плазменной струей, обладающей высокой скоростью до 6 km/s.

Обнаружено, что с увеличением числа импульсов в поверхностном слое  $\alpha$ -Fe толщиной до 10  $\mu\text{m}$  концентрация Мо изменяется немонотонным образом, при этом наблюдается увеличение концентрации кислорода до 50 at.% в слое толщиной до 2  $\mu\text{m}$ , а концентрация углерода и азота не превышает 10 at.%. Результатом такого воздействия в поверхностном слое является формирование ОЦК (объемно-центрированная кристаллическая) Fe и фазы  $\text{Fe}_7\text{Mo}_6$ , FeMo. Легирование поверхностного слоя железа молибденом и образование оксидов, карбидов увеличивает твердость образцов  $\alpha$ -Fe в 2.5 раза, а также уменьшает износ при сухом трении.

В последнее время для улучшения служебных характеристик металлов, сплавов широко используют импульсные потоки заряженных частиц [1–4] и плазмы [5–7]. При таких воздействиях происходит быстрый разогрев поверхностного слоя металлов и быстрый отвод тепла



**Рис. 1.** Схема плазматрона для высокоскоростной импульсно-плазменной обработки.

в глубь мишени (закалка), образуются нанодисперсные выделения, фазы метастабильные, аморфные слои и пр. [4–5], в результате такого модифицирования изменяются механические характеристики. В качестве концентрированных потоков энергии используют лазерные, электронные, ионные пучки и потоки плазмы [1–7].

Кроме вышперечисленных потоков энергии используют также детонационную и плазмодетонационную обработку поверхности твердых тел [6–9] с целью улучшения механических характеристик изделий из металлов и сплавов.

Для осуществления данной технологии разработан плазмотрон (рис. 1), который состоит из детонационной камеры 1, где осуществляется формирование горючей газовой смеси и инициирование детонационной ее сгорания, центрального электрода-анода 2, конического электрода-катода 3, межэлектродного зазора 4, расходуемого электрода 5, источника питания электрическим током 6.

В детонационную камеру 1 подают компоненты горючей газовой смеси, а затем продукты сгорания поступают из детонационной камеры 1 в межэлектродный зазор 4 и замыкают электрическую цепь источника 6. Образуется электропроводящий газовый слой продуктов сгорания 7. Слой 7 под влиянием газодинамической и электромагнитной силы ускоряется. По оси центрального электрода 2 закреплен металлический расходуемый стержень 5, конец которого при нагреве испаряется и обеспечивает ввод в плазменную струю легирующих элементов. При выбросе импульсной струи 8 из плазмотрона она замыкает электрическую цепь между электродом-анодом и поверхностью изделия — катодом 9. В результате прохождения по этой струе электрического тока плазма нагревается за счет джоулева тепловыделения  $Q = \sigma E^2$  ( $\text{W}/\text{m}^3$ ). Газообразные легирующие элементы вводятся в межэлектродный зазор плазмотрона.

Поверхность изделия испытывает в первый момент упругодетонационное взаимодействие с ударной волной и импульсной струей плазмы, затем поверхность подвергается воздействию электрического тока. Амплитудное значение тока 5 кА. В результате образуется импульсное магнитное поле напряженностью до 2000 Ое. В дальнейшем в течение 3–5 м/с на поверхность натекают продукты сгорания и эрозии электродов. Обработка  $\alpha$ -Fe импульсной плазмой, содержащей легирующие элементы, сопровождается комплексным (тепловым, электромагнитным, деформационным) импульсным воздействием. Это обеспечивает легирование составляющими элементами плазмы поверхностного слоя и его упрочнение. Температура плазменной струи достигает до  $2 \cdot 10^3$  К, а плотность мощности составляет около  $10^7$   $\text{W}/\text{cm}^2$  при скорости струй около 6 км/с. Параметры режимов обработки образцов приведены в таблице, а электрод выполнен из Мо.

Результаты рентгенофазового анализа показали, что основной фазой после облучения является ОЦК-Fe (объемно-центрированная кристаллическая решетка с  $d = 2.866$ ), а также образуется фаза  $\text{Fe}_7\text{Mo}_6$  с параметрами решетки 2.157 (2.15), 2.086 (2.08), 1.811 (1.80) и возможно образование фазы  $\text{FeMo}$  2.157 (2.14), 2.086 (2.09).

1\* Письма в ЖТФ, 2001, том 27, вып. 15

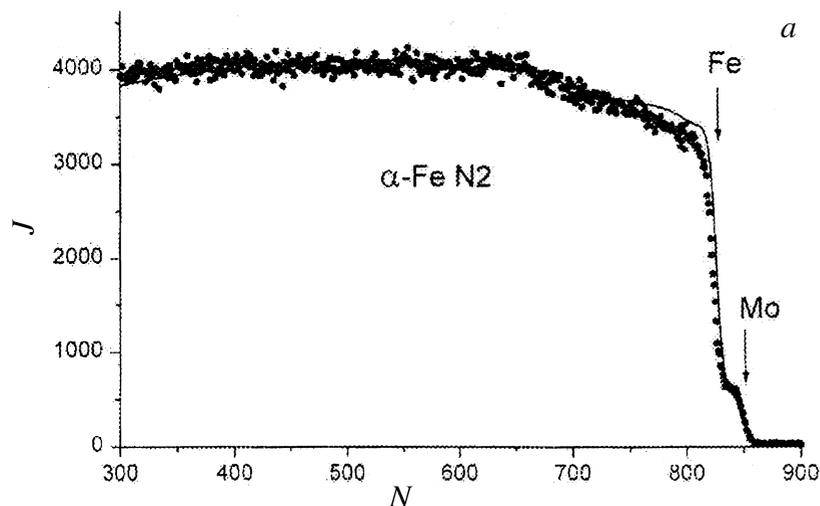
## Режимы обработки образцов электрод–Мо

№ образца	Материал	Количество импульсов	Дистанция, mm	Частота, Hz	Углубление электрода, mm	Емкость, $\mu\text{F}$
1	$\alpha\text{-Fe}$	4	40	1.5	30	800
2	$\alpha\text{-Fe}$	10	40	1.5	30	800
3	$\alpha\text{-Fe}$	15	40	1.5	30	800
4	$\alpha\text{-Fe}$	20	40	1.5	30	800

На рис. 2, *a, b, c* представлены энергетические спектры резерфордского обратного рассеяния (РОР) ионов (*a*), полученные для  $\alpha\text{-Fe}$  после воздействия плазменной струи, и спектр упругого резонанса на протонах в районе 1745 KeV (*b, c*), полученный для этого же образца. На спектре мы видим границу (кинетического фактора) Fe и для Mo, пик которого находится с правой стороны, образование небольшой полочки свидетельствует о том, что вблизи поверхности в слое толщиной около 300 nm образуется соединение с таким составом, как  $\text{FeMo}_2$ . Кроме того, на спектре, полученном с помощью резонанса на протонах, четко виден пик углерода.

На рис. 2, *c* приведен также спектр упругого резонанса на протонах для образца Fe, обработанного большим числом импульсов. Мы видим, что наряду с ростом концентраций углерода и азота в поверхностном слое имеется высокая концентрация кислорода вблизи поверхности (около 40 at. %). Дальнейшее увеличение числа импульсов приводит к еще большему росту кислорода на поверхности. В то же время наблюдается другая картина для легирующего элемента (продукта эрозии и испарения электрода) (рис. 3). Наибольшая концентрация Mo обнаружена вблизи поверхности (т. е. в слое толщиной  $D$  до 10  $\mu\text{m}$ ). При 10 импульсах предельная концентрация Mo составляет около 8 at. %, а максимум расположен на глубине около 7  $\mu\text{m}$  от поверхности.

Показано, что с увеличением числа импульсов концентрация углерода растет незначительно, а кислорода — уже после 15 импульсов достигает 40 at. %. Легирование Mo поверхностного слоя происходит через максимум при увеличении числа импульсов от 4 до 20 и достигает максимальной концентрации около 8 at. % после воздействия 10 импульсов на поверхность  $\alpha\text{-Fe}$  высокоскоростной импульсной струей.



**Рис. 2.** *a* — энергетический спектр POF, полученный при использовании  $^{4}\text{He}$  с энергией 1.847 MeV для образца  $\alpha$ -Fe после импульсной плазменной обработки (число импульсов — 10,  $\Theta = 170^\circ$ ,  $\nu = 60^\circ$ ); *b* — энергетический спектр, полученный методом упругого резонанса протонов с  $E_p = 1.745$  MeV, для определения концентрации углерода, азота на образце  $\alpha$ -Fe (режим тот же); *c* — энергетический спектр, полученный методом упругого резонанса протонов с  $E_p = 1.745$  MeV, для определения концентрации углерода, кислорода для  $\alpha$ -Fe, обработанного импульсной плазменной струей (число импульсов — 20).  $N_0$  — номер канала.

Анализируя структуру поперечного шлифа образца  $\alpha$ -Fe, можно обратить внимание на то, что область оплавления поля после воздействия 10 импульсами плазменной струи достигает  $50 \mu\text{m}$ .

Измерения твердости, проведенные по поверхности модифицированного слоя  $\alpha$ -Fe (20 импульсов), показали увеличение твердости в отдельных участках  $750 \pm 40 \text{ kg/mm}^2$ , в то же время измерение твердости по поперечному шлифу показало увеличенное значение твердости  $250 \pm 27 \text{ kg/mm}^2$  на глубине свыше  $70 \mu\text{m}$ , при твердости исходного образца  $90 \pm 12 \text{ kg/mm}^2$ . Среднее значение твердости, усредненное по глубине модифицированного слоя, примерно в 2.5 раза выше, чем в исходном состоянии.

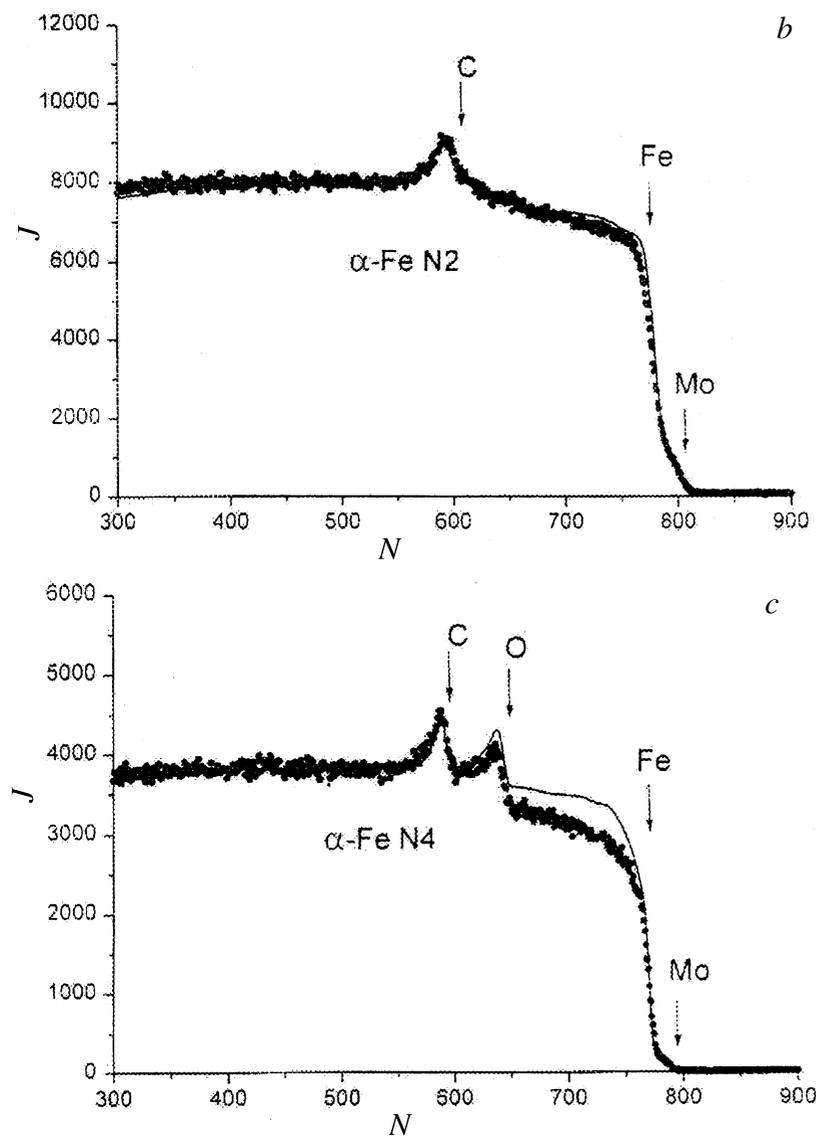
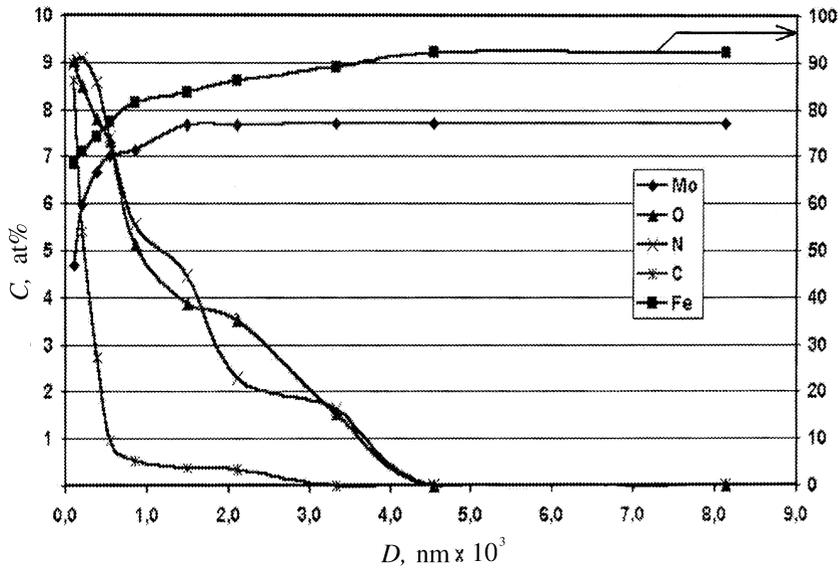


Рис. 2 (продолжение).



**Рис. 3.** Концентрационные профили, полученные из энергетических спектров элементов Mo, Fe, O, C, N в образце  $\alpha$ -Fe, обработанном импульсной плазменной струей (10 импульсов).

Таким образом, в работе показано, что, используя плазмотрон с эродирующим электродом Mo, мы можем легировать приповерхностный слой по крайней мере глубиной до  $10 \mu\text{m}$ , а поверхностный слой образца насытить (легировать) не только Mo, но и кислородом, углеродом, а также оплавливать поверхностный слой толщиной, намного большей области легирования.

Работы были частично финансированы по проекту УНТЦ № 1472 и проекту 2М/076–2000 ГКНТ Украины.

Авторы выражают признательность О. Колисниченко за облучение (обработку) образцов, В.С. Кшнякину, О.П. Кульментьевой — за помощь в проведении экспериментов по рентгенофазовому анализу и измерению микротвердости.

## Список литературы

- [1] *Poate J.M., Foti G., Jacobsen D.C.* Surface Modification and Compounding by Laser, Ion and Electron Beams. New York and London: Plenum Press, 1983.
- [2] *Hirvonen J.K.* Ion Implantation into Metals. Moscow: Metallurgia, 1985.
- [3] *Бойко В.И., Валяев А.Н., Погребняк А.Д.* // Успехи физических наук. 1999. Т. 163. С. 1243–1271.
- [4] *Валяев А.Н., Погребняк А.Д., Наоки Кишимото.* Модификация свойств материалов и синтез тонких пленок при облучении интенсивными электронными и ионными пучками. Усть-Каменогорск, Казахстан: Восточно-Казахстанский технический университет, 2000. 345 с.
- [5] *Pogrebnyak A.D., Bratushka S., Boyko V.I., Shamanin I.V., Tsvintarnaya Yu.V.* // Nucl. Instrum. and Meth. 1998. V. 145. P. 373.
- [6] *Тюрин Ю.Н., Погребняк А.Д.* // Surface and Coating Technology. 1999. V. 111. P. 269.
- [7] *Погребняк А.Д., Тюрин Ю.Н., Иванов Ю.Ф.* и др. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. В. 21. С. 53–60.
- [8] *Хасуй А.* Техника напыления. М.: Машиностроение, 1985. 288 с.
- [9] *Кудинов В.В.* Плазменные покрытия. М.: Наука, 1977. 184 с.