

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЙ, СОДЕРЖАЩИХ СИЛИЦИДЫ Ti И W, В СТАЛИ ВОЗДЕЙСТВИЕМ КОМПРЕССИОННЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ

В.М. Асташинский, Р.С. Кудактин, А.М. Кузьмицкий
Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси,
ул. П. Бровки, 15, Минск, 220072, Беларусь, ast@htmi.by

Представлены результаты исследования структуры и фазового состава поверхностного слоя стали, легированной титаном, вольфрамом и кремнием посредством воздействия компрессионным плазменным потоком. Методом растровой электронной микроскопии было установлено, что в зависимости от плотности поглощенной энергии (от 5 до 30 Дж/см²) в стали образуется модифицированный слой толщиной от 1 до 12 мкм. Методом рентгеновской дифракции было установлено, что в модифицированном слое формируются силициды TiSi и WSi₂. Методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии было установлено, что легирующие элементы равномерно распределены по всей толщине модифицированного слоя.

Введение

Одной из важнейших задач в разработке промышленных инструментов является упрочнение их рабочих поверхностей. Один из способов упрочнения стали – создание силицидосодержащих поверхностных слоев. Установлено, что силициды переходных металлов, в частности силицид титана Ti₅Si₃, являются упрочняющими материалами [1–5]. Для формирования модифицированных упрочненных слоев стали необходимы соответствующие методы высокоэнергетического воздействия. Один из типов такого воздействия – компрессионные плазменные потоки (КПП). Ранее было показано, что КПП могут использоваться для синтеза силицида Ti₅Si₃ [6]. Цель данной работы – сформировать силицидосодержащий поверхностный слой в стали.

Экспериментальная методика

Исходные системы для обработки изготавливались с помощью нанесения на сталь покрытий титана, кремния и вольфрама методом магнетронного распыления (рис. 1). Вместо верхнего слоя титана также напылялся вольфрам.

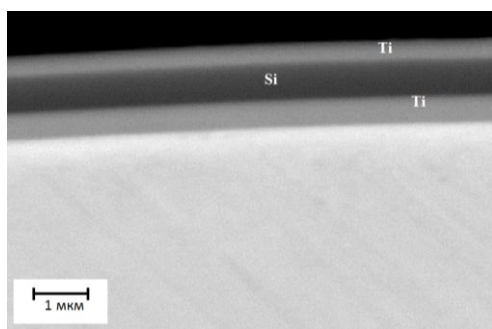


Рис. 1. Исходная структура: углеродистая сталь – слой титана (0,5 мкм), слой кремния (1 мкм) и слой титана (0,4 мкм).

Обработка компрессионным плазменным потоком проводилась в режиме остаточного газа при следующих значениях параметров: плотность поглощенной энергии – 5–30 Дж/см², рабочий газ – азот, давление азота – 400 Па, время воздействия ~ 100 мкс, плотность частиц плазмы в области максимального сжатия ~ 10¹⁷ см⁻³. Обработка

проводилась одним или двумя импульсами.

Структура поперечного сечения и морфологии поверхности исследовалась методом растровой электронной микроскопии. Фазовый состав исследовался методом рентгеновской дифракции. Концентрации элементов в поверхностном слое исследовались методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии.

Результаты и их обсуждение

Результаты исследования морфологии поверхности стали приведены на рис. 2. При плотности поглощенной энергии 9 Дж/см² исходные покрытия частично плавятся, но не перемешиваются со сталью, а на поверхности образуются островковые структуры. При увеличении плотности поглощенной энергии покрытия все более интенсивно перемешиваются со сталью и при плотности поглощенной энергии 25 Дж/см² наблюдается полное растворение покрытий с подложкой, а рельеф поверхности является гладким с незначительными поверхностными неровностями, характерными для быстро закристаллизовавшегося жидкого расплава.

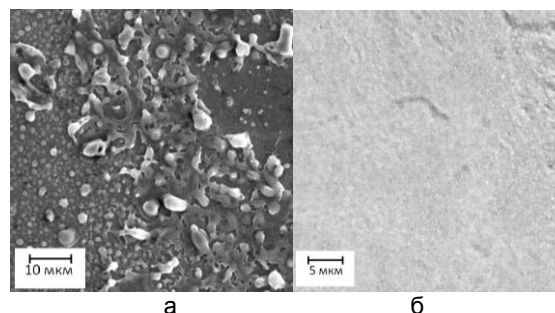


Рис. 2. РЭМ-изображения поверхности стали, обработанной компрессионными плазменными потоками с плотностью поглощенной энергии 9 Дж/см² (а) и 25 Дж/см² (б).

Результаты исследования поперечного сечения стали показаны на рис. 3. При плотности поглощенной энергии 10 Дж/см² наблюдается образование островкового слоя на поверхности, который является результатом частичного расплавления нанесенных покрытий.

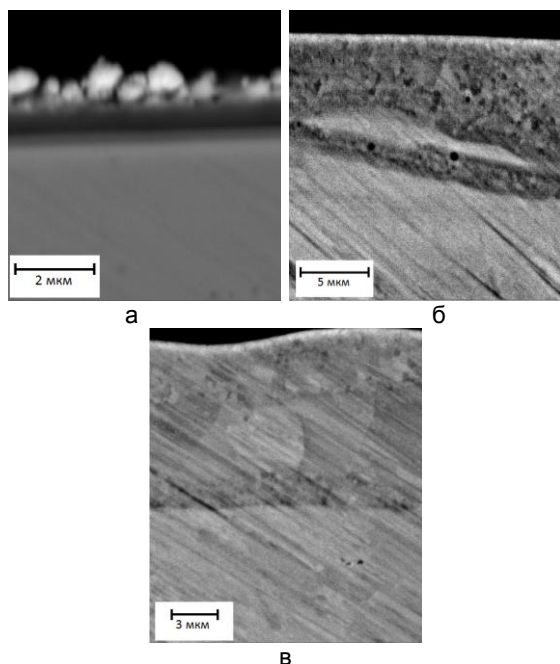


Рис. 3. РЭМ-изображения поперечного сечения стали, обработанной компрессионными плазменными потоками с плотностью поглощенной энергии 10 Дж/см² (а), 20 Дж/см² (б) и 20 Дж/см² (два импульса) (в).

При плотности поглощенной энергии 20 Дж/см² покрытия полностью перемешиваются со сталью с образованием модифицированного слоя толщиной до 10 мкм. При обработке двумя импульсами толщина слоя незначительно увеличивается до 12 мкм, а контраст модифицированного слоя становится менее заметным, что свидетельствует об уменьшении концентрации легирующих элементов в стали, что может быть связано как с их распределением на большую глубину, так и с их большим испарением при большем количестве импульсов. С ростом количества импульсов также улучшается однородность модифицированного слоя по толщине.

Результаты исследования фазового состава методом рентгеновской дифракции приведены на рис. 4. При воздействии компрессионных плазменных потоков образуются силициды TiSi и WSi₂. Однако при увеличении количества импульсов доля силицидов уменьшается или они исчезают вовсе. Это связано с тем, что после второго импульса концентрация легирующих элементов в поверхностном расплаве уменьшается, в результате чего силицид не образуется, а элементы покрытий просто растворяются в поверхностном слое стали. Следует отметить, что в при данных параметрах покрытий образуется силицид TiSi, а не Ti₅Si₃. Дальнейшие исследования будут направлены на подбор толщины покрытий и параметров воздействия, обеспечивающих формирование именно данного силицида.

Результаты исследования концентрации титана в поверхностном слое методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии приведены на рис. 5. Как видно из рисунка, титан распределен по всей глубине модифицированного слоя,

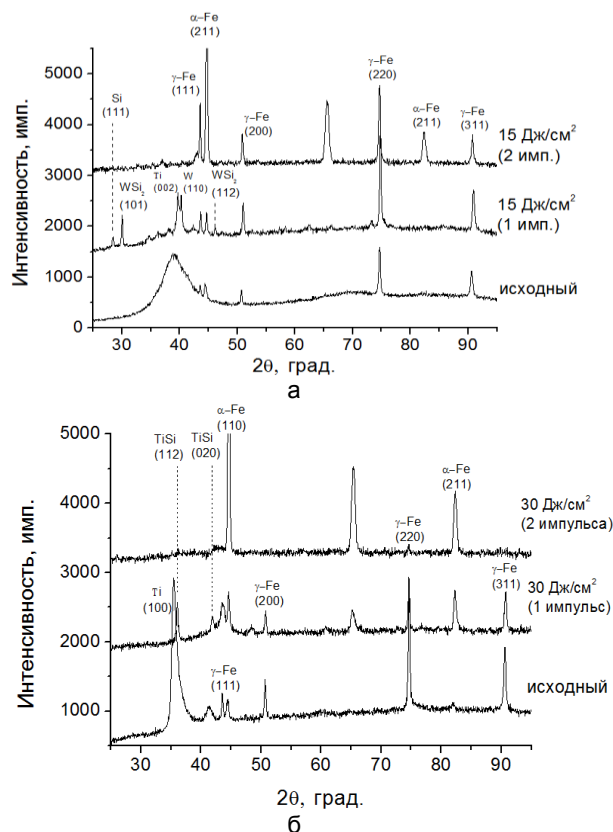


Рис. 4. Рентгенограммы стали, легированной титаном, вольфрамом и кремнием (а) и легированной титаном и кремнием (б).

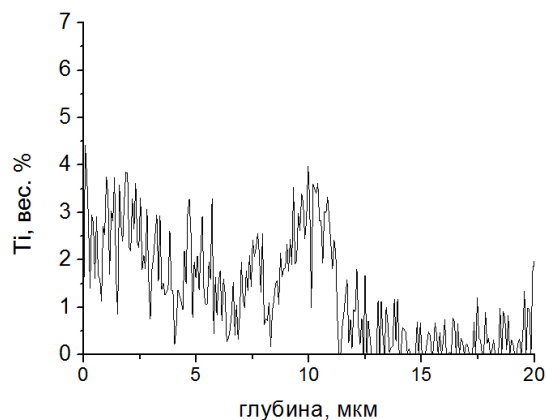


Рис. 5 Концентрационный профиль титана в стали, обработанной одним импульсом компрессионного плазменного потока с плотность поглощенной энергии 25 Дж/см².

которая составляет 11 мкм, а его концентрация составляет примерно 2 – 3 вес. %.

Заключение

В результате воздействия компрессионного плазменного потока на сталь с нанесенными покрытиями титана, кремния и вольфрама происходит равномерное легирование вещества покрытия на глубину до 12 мкм, при этом формируются силициды TiSi и WSi₂.

Список литературы

1. Zou X., Lu X., Zhou Z. et al. // *Electrochemistry Communications*. 2012. V. 21. P. 9–13.
2. Zou X., Lu X., Li C. et al. // *Electrochimica Acta*. 2010. V. 55. № 18. P. 5173–5179.
3. Zou X., Lu X., Zhou Z. et al. // *Electrochimica Acta*. 2010. V. 56. № 24. P. 8430–8437.
4. Guan Q.L., Wang H.Y., Li S.L. et al. // *Journal of Alloys and Compounds*. 2008. V. 456. № 1. P. 79–84.
5. Kishida K., Fujiwara M., Adachi H. et al. // *Acta Materialia*. 2010. V. 58. № 3. P. 846–857.
6. Uglov V.V., Kvasov N.T., Kudaktsin R.S. et al. // *Surf. and Coat. Tech.* 2013. V. 235. P. 685–690.

FORMATION OF STRUCTURE-PHASE STATES CONTAINING SILICIDES OF Ti AND W IN STEEL BY COMPRESSION PLASMA FLOW

Valyantin Astashinsky, Raman Kudaktsin, Anton Kuzmitsky
A.V. Lykov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences,
P. Brovka str. 15, Minsk, 220072, Belarus, ast@htmi.by

The results of study of structure and phase composition of surface layer in carbon steel, doped with titanium, silicon and tungsten by compression plasma flow are reported. It was found by scanning electron microscopy that modified layer forms in steel. Its thickness is 1–12 μm depending on absorbed energy density (5–30 J/cm^2). It was found by means of X-ray diffraction that silicides TiSi and WSi_2 form in modified layer. It was found by energy dispersion X-ray spectroscopy that doping elements are uniformly distributed throughout the thickness of modified layer.

ВОЗДЕЙСТВИЕ НАНОИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТОНКИЕ ПЛЕНКИ TiAlN/Si

Г.Д. Ивлев, В.А. Зайков, И.М. Климович, О.Р. Людчик
Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, Минск, 220030, Беларусь, ivlev-1947@mail.ru

Методом оптической микроскопии исследовано воздействие интенсивного наносекундного (70 нс) излучения рубинового лазера ($\lambda = 0.69$ мкм) на состояние тонкоплёночной системы TiAlN/Si . Получены данные о динамике отражательной способности зон лазерной обработки на длине волны зондирующего излучения 1.06 мкм. Исследуемые образцы приготавливались методом магнетронного распыления мишени с сопутствующим формированием тонкой (0.5 мкм) плёнки TiAlN на кремниевой подложке и облучались при плотностях энергии 0.5–1.6 $\text{Дж}/\text{см}^2$.

Введение

Импульсная лазерная обработка (ИЛО) является эффективным методом модификации свойств различных материалов и исследования изменений их физических свойств в условиях высокоэнергетического воздействия лазерного излучения. В этом плане представляет научный интерес изучение эффектов ИЛО тонких плёнок бинарного нитрида TiAlN - материала, используемого для формирования износостойких упрочняющих слоёв в технологии производства режущих инструментов [1, 2] и защитных покрытий [3]. Цель данной работы заключается в исследовании поведения собственно тонкой плёнки TiAlN , сформированной на неметаллической подложке – Si (100), под действием интенсивного лазерного излучения наносекундной длительности.

Основная часть

Тестируемые образцы приготавливались путём магнетронного распыления составной $\text{Ti} - \text{Al}$ мишени в аргон-азотной атмосфере при давлении около $7 \cdot 10^{-2}$ Па, сопровождаемого образованием на кремниевой подложке, находящейся в рабочей камере, субмикронной (0.5 мкм) плёнки TiAlN с примерно одинаковым процентным соотношением Ti и Al и столбчатой структурой в попе-

речном сечении (рис. 1). Измерение элементного состава плёнки методом резерфордовского обратного рассеяния (установка AN-2500 HVEE) показало атомарное содержание $\text{Ti} - 34.69\%$, $\text{Al} - 31.61\%$, азота – 33.69 и кислорода – 0.01%.

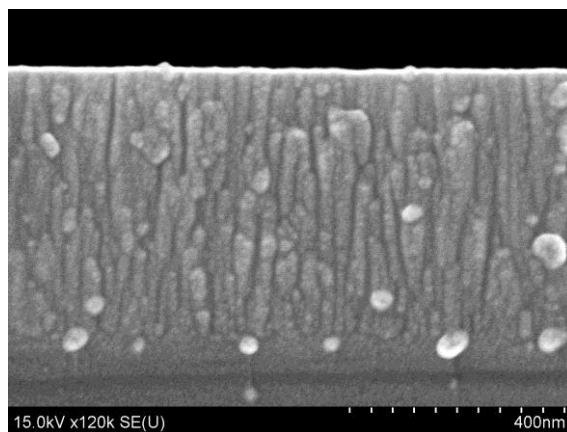


Рис. 1. Вид пленки на сколе образца TiAlN/Si (растровый электронный микроскоп Hitachi S-4800).

Исследование эффектов ИЛО подготовленных образцов проводилось в экспериментальных условиях [4, 5] с применением рубинового лазера,