

## ЛЕГИРОВАНИЕ СТАЛИ У9 АТОМАМИ КРЕМНИЯ И ЦИРКОНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ КОМПРЕССИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ

Д. В. Литвин

В последнее время пристальное внимание уделяется разработке новых методов повышения эксплуатационных характеристик материалов. Особое место отводится обработке поверхности материалов концентрированными пучками частиц, такими как лазерные, ионные, электронные и плазменные пучки, применение которых в последнее время получило большое распространение.

Одним из способов модификации свойств поверхности является легирование поверхностного слоя дополнительными легирующими элементами путем воздействия концентрированными пучками частиц на систему «покрытие/подложка». Такое воздействие приводит к плавлению покрытия и поверхностного слоя подложки, жидкофазному перемешиванию и последующему сверхбыстрому охлаждению.

Целью данной работы являлось исследование влияния параметров воздействия компрессионного плазменного потока (КПП) на структуру, фазовый состав, элементный состав и микротвердость поверхностного слоя инструментальной стали У9 с покрытиями Si и Zr. Выбор легирующих элементов (Si и Zr) обусловлен тем, что они могут формировать в поверхностном слое силициды с высокой температурой плавления, повышая тем самым жаростойкость поверхностного слоя, что является актуальной задачей для инструментальных сталей. На исследуемые образцы сначала наносилось покрытие Zr методом вакуумного катодно-дугового осаждения со следующими параметрами процесса: ток горения дуги – 180 А, напряжение смещения – 120 В, время нанесения покрытия – 10 минут. Затем наносилось покрытие Si методом магнетронного распыления.

Обработку образцов стали с покрытиями Zr и Si компрессионными плазменными потоками проводили в газоразрядном магнитоплазменном компрессоре компактной геометрии в режиме «остаточного газа», при котором предварительно откачанную вакуумную камеру заполняли рабочим газом (азотом) до давления 3 тор (400 Па). Длительность разряда составляла 100 мкс. Плотность энергии, поглощенной образцом за импульс составляла 13 Дж/см<sup>2</sup>. Количество импульсов изменялось от 1 до 6.

Результаты исследования сканирующей электронной микроскопии показали, что увеличение количества импульсов приводит к увеличению однородности распределения циркония в поверхностном слое, а также уменьшению количества трещин (рис. 1 и рис. 2).

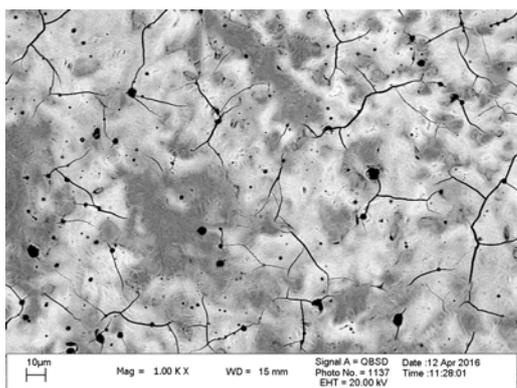


Рис.1. РЭМ-изображение морфологии поверхности системы Si/Zr/U9 после воздействия КПП (1 импульс)

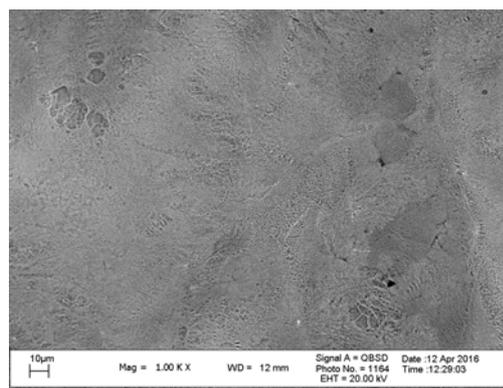


Рис.2. РЭМ-изображение морфологии поверхности системы Si/Zr/U9 после воздействия КПП (6 импульсов)

На рис. 3 представлена зависимость концентрации железа, циркония, кремния в поверхностном слое, полученная по результатам энергодисперсионного микроанализа, от количества импульсов КПП.

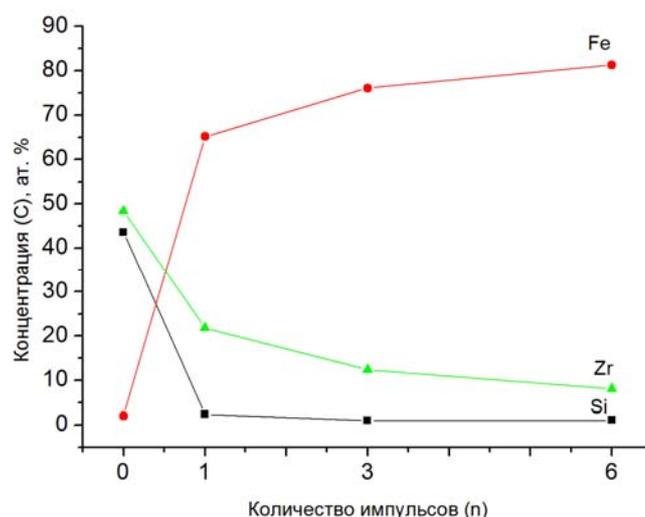


Рис. 3. Зависимость концентрации железа, циркония, кремния от количества импульсов в образце стали U9 под действием КПП

Из зависимости видно, что с увеличением количеством импульсов концентрация легирующих элементов, уменьшается. Это может быть связано с эрозией поверхности образца при воздействии на него плазменным потоком с давлением 10–15 атм.

На рисунке 4 представлены результаты анализа фазового состава (рентгеноструктурный анализ) образцов до и после воздействия.

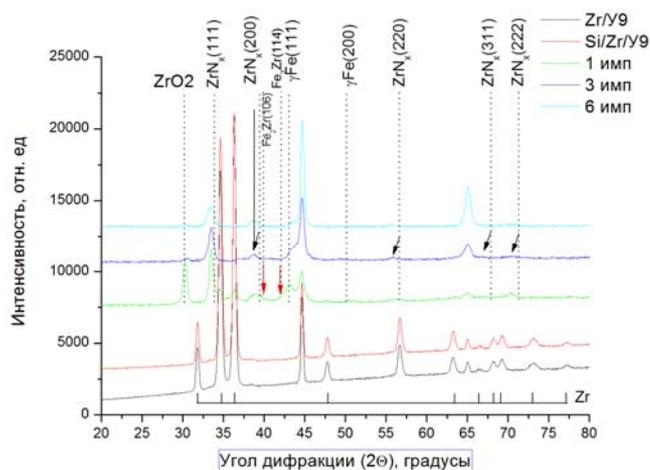


Рис. 4. Рентгенограммы образцов систем

Из представленных данных видно, что после воздействия на систему Si/Zr/Y9 компрессионными плазменными потоками (1 импульс) появились фазы  $ZrO_2$  и  $Zr(C,N)$ , дифракционные линии которой смещены в сторону меньших углов от нитридов циркония. Формирование этих фаз связано с взаимодействием циркония с атомами атмосферы камеры. Также происходит образование  $\gamma$ -Fe и  $Fe_2Zr$ .

С увеличением количества импульсов воздействия интенсивность дифракционных линий  $ZrO_2$ ,  $\gamma$ -Fe и  $Zr(C,N)$  уменьшается.

Происходящие при воздействии структурно-фазовые изменения **обуславливают** изменение прочностных свойств поверхностного слоя. Результаты измерения микротвердости представлены на рисунке 5.

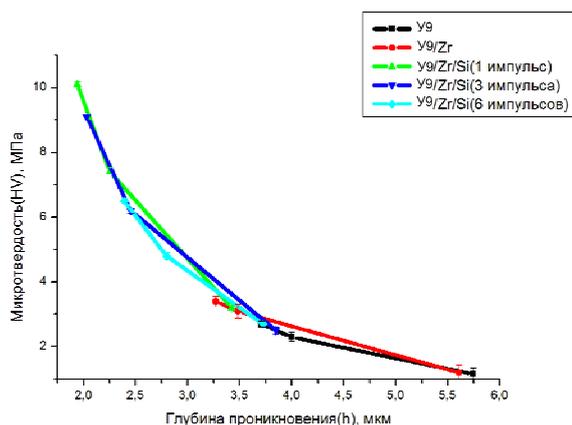


Рис. 5. Микротвердость образцов

Видно, что после воздействия 1 импульсом КПП микротвердость образца системы Si/Zr/Y9 возрастает и максимальна в поверхностном слое  $\sim 10$  МПа. С увеличением числа импульсов она уменьшается. Такое поведение микротвердости можно связать с концентрацией карбонитрида

Zr(C,N) в поверхностном слое, которая уменьшается при увеличении числа импульсов.

Таким образом, установлено, что воздействие компрессионных плазменных потоков на систему Si/Zr/Y9 приводит к легированию поверхностного слоя стали атомами Zr и Si. В легированном слое формируются интерметаллид Fe<sub>2</sub>Zr, карбонитрид Zr(C,N) и твердый раствор на основе  $\gamma$ -Fe. Показано, что с увеличением количества импульсов концентрация Zr и Si уменьшается, что ведет к уменьшению объемной доли цирконий-содержащих фаз. Легирование приводит к увеличению микротвердости. Максимальная микротвердость (10 МПа) наблюдается при одном импульсе воздействия КПП. С увеличением количества импульсов микротвердость поверхностного слоя уменьшается.

#### Литература

1. Мрочек Ж. А., Логвин В. А. Ионная имплантация и структурно-фазовое состояние материалов // Минск: БНТУ. 2012. 206 с.
2. Погребняк А. Д., Базыль Е. А., Свириденко Н. В. Влияние облучения электронными и ионными пучками на физико-механические свойства титановых сплавов // Успехи физики металлов. Сумы. 2004. С. 257–281.
3. Григорьев С. В., Коваль Н. Н., Иванов Ю. Ф., Девятков В. Н., Тересов А. Д., Колубаева Ю. А. Электронно-пучковая модификация стали и твердых сплавов // Томск. 2006. 8 с.
4. Анищик В. М., Углов В. В. Модификация инструментальных материалов ионными и плазменными пучками // Минск: Издательство БГУ 2003. 176 с.

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СИЛЬНОТОЧНЫМ ПУЧКОМ В МНОГОПОЛОСТНЫХ РЕЗОНАТОРАХ

И. В. Мороз

### ВВЕДЕНИЕ

Получение мощных импульсов сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения является важной областью технических и научных исследований, так как такие импульсы являются хорошим инструментом для научных исследований и практического применения. В статье [1] было предложено использовать для модуляции электронного пучка и последующей генерации СВЧ излучения систему связанных цилиндрических резонаторов (Split Cavity Oscillator (SCO)). В данной работе найдено аналитическое решение для энергетических потерь электронного пучка для несимметричной системы с учетом объемного заряда. Также рассмотрена