

ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И МИКРОТВЕРДОСТЬ ТИТАНА, ЛЕГИРОВАННОГО МОЛИБДЕНОМ И ЦИРКОНИЕМ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОМПРЕССИОННЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ

В. И. Шиманский¹, Н. Н. Черенда¹, В. В. Углов¹, В. М. Астапинский², А. М. Кузьмицкий²

¹Белорусский государственный университет
220030, Беларусь, Минск, пр. Независимости, 4, shymanskiv@mail.ru

²Институт тепло- и массообмена им. В.А. Лыкова НАН Беларуси
220072, Беларусь, Минск, ул. П. Бровки, 15

Модификации титана и его сплавов уделяется сегодня значительное внимание ввиду их широкого практического применения, которое требует сочетания высоких механических свойств, биосовместимости, коррозионной стойкости и пр. Эта задача, как правило, решается за счет многоэлементного легирования титана, что может быть эффективно реализовано при воздействии на титан компрессионных плазменных потоков (КПП) с предварительным нанесением соответствующих металлических покрытий. В данной работе рассмотрены особенности формирования фазового состава титана, легированного атомами циркония и молибдена в результате воздействия КПП.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

На поверхность отполированных образцов технически чистого сплава титана ВТ1-0 наносилось двухслойное покрытие циркония и молибдена, толщина каждого из покрытий составляла 1.0–1.5 мкм. Формирование покрытий осуществлялось вакуумно-дуговым методом при попеременной работе циркониевого и молибденового катодов при опорном напряжении на подложке — 120 В. Сформированные системы () подвергались воздействию КПП, генерируемых магнито-плазменным компрессором компактной геометрии в атмосфере азота. Варьируемым параметром являлась плотность энергии (Q), поглощаемая поверхностным слоем образца, которая изменялась от 19 до 23 Дж/см². Обработка осуществлялась тремя последовательными импульсами, длительностью 100 мкс и следовавшими друг за другом с интервалом 20 с.

Изучение фазового состояния модифицированных приповерхностных слоев титана осуществлялась с помощью рентгеноструктурного анализа на дифрактометре ДРОН-4 в $\text{CuK}\alpha$ излучении ($\lambda = 0.154178$ нм). Изменение механических свойств легированных слоев титана исследовалось на основе измерения их микротвердости по методике Виккерса на микротвердомере Wilson Instruments MVD 402 при нагрузках 0.1–0.5 Н.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Воздействие КПП на систему (Mo : Zr : Ti) при плотности поглощенной энергии 19–23 Дж/см² способствует расплавлению покрытий, а также

приповерхностного слоя титана, что, в конечном итоге, приводит к жидкофазному перемешиванию расплава [1] и формированию слоя титана, легированного атомами молибдена и циркония. Результаты РСМА позволили установить, что с повышением плотности поглощенной энергии плазменного потока от 19 до 23 Дж/см² происходит снижение концентрации молибдена от 6.1 до 4.1 ат. % и концентрации циркония — от 7.1 до 5.9 ат. %, являющегося следствием увеличением глубины расплавленного слоя.

Известно, что молибден относится к группе сильных β -стабилизаторов и позволяет стабилизировать высокотемпературную фазу титана (β — Ti) при комнатной температуре, присутствие которой выявлено в образцах титана после воздействия КПП при плотности поглощенной энергии 19 Дж/см² с помощью рентгеноструктурного анализа (рис. 1). Цирконий, являясь нейтральным элементом по отношению стабилизации фаз титана, способен неограниченно растворяться, как в низкотемпературной (α — Ti), так и высокотемпературной (β — Ti) фазах титана, однако отсутствие дифракционных рефлексов, принадлежащих цирконию и низкотемпературной фазе титана, можно предположить, что атомы циркония, так же как и молибдена, растворяются в ОЦК кристаллической решетке высокотемпературной фазы, образуя твердый раствор β — Ti(Mo, Zr) (рис. 1, а). Параметр решетки твердого раствора составляет 0.3259 нм.

При увеличении плотности поглощенной энергии КПП до 23 Дж/см² ввиду снижения

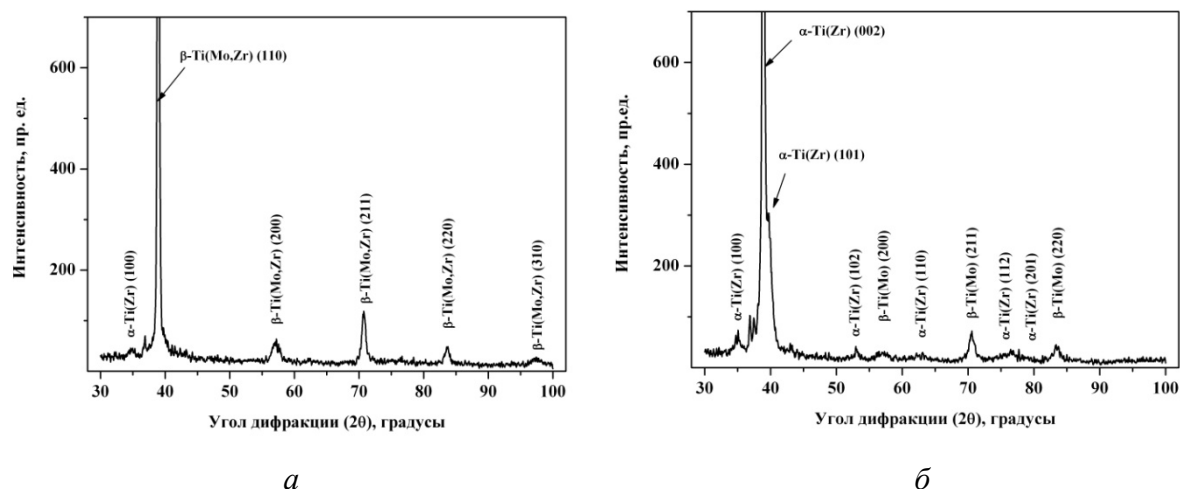


Рис. 1. Рентгенограммы системы после воздействия КПП при плотности поглощенной энергии 19 Дж/см² (а) и 23 Дж/см² (б)

концентрации легирующих элементов, происходит частичный переход из высокотемпературной фазы в низкотемпературную при охлаждении. В данном случае обнаружено формирование твердого раствора на основе β – Ti, параметр которого увеличивается до 0.3267 нм. Помимо этого в легированном слое присутствуют рефлексы, соответствующие низкотемпературной фазе α – Ti, параметры гексагональной решетки которой, однако, составляют 0.2948 нм (а) и 0.4690 нм (с), отличаясь от параметров решетки нелегированной фазы α – Ti ($a = 0,2951$ нм, $c = 0,4683$ нм). Это свидетельствует о присутствии в ней легирующих элементов, в первую очередь, атомов циркония.

Следует также отметить, что дифракционные максимумы низкотемпературной фазы титана характеризуются достаточно большой шириной на полувысоте (0.028 рад для линии (102); 0.054 рад для линии (110)), что свидетельствует о мелкокристаллической структуре данной фазы, а также о внутренних микронапряжениях в ней. Обнаруженные значения ширины дифракционных линий существенно выше соответствующих значений для твердого раствора α – Ti(Zr), сформированного при воздействии КПП на систему [2], при аналогичных полученных концентрациях циркония, отвечающих преимущественно за внутренние микронапряжения в решетке. Следо-

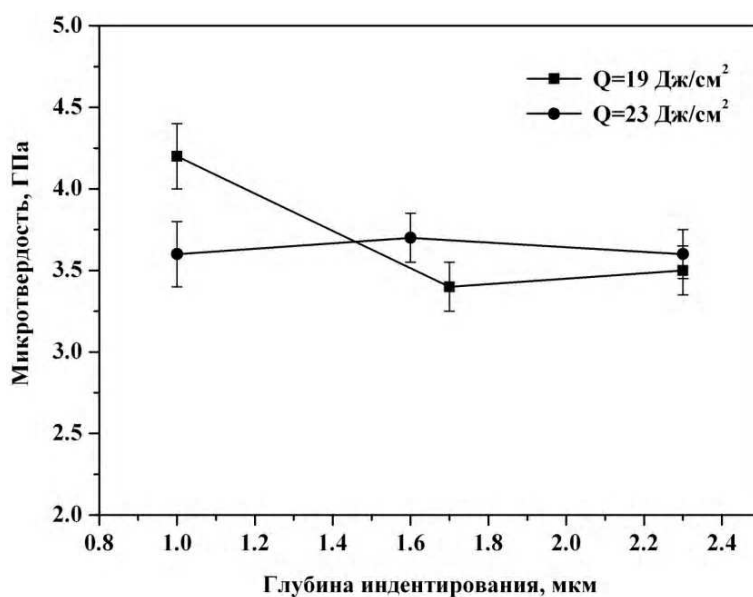


Рис. 2. Зависимость микротвердости приповерхностного слоя титана, легированного молибденом и цирконием в результате воздействия КПП

вательно, уширение дифракционных линий твердого раствора, сформированного в системе Mo : Zr : Ti, предположительно является следствием дисперсности структуры.

Формирование твердых растворов β – Ti(Mo, Zr), β – Ti(Mo) и α – Ti(Zr) в приповерхностном слое титана после воздействия КПП на систему Mo : Ti : Zr позволяет повысить его микротвердость (рис. 2). Из полученных данных видно, что микротвердость приповерхностного слоя составляет 3.5 – 3.7 ГПа, превышая почти в 1.5 раза микротвердость нелегированного титана (2.0 ГПа). По-видимому, основным механизмом упрочнения в данном случае может служить твердорастворный механизм, связанный с формированием вышеперечисленных твердых растворов. Более того, упрочнение приповерхностного слоя, легированного при воздействии КПП при $Q=23$ Дж/см² может происходить также за счет наличия межфазных границ между твердыми растворами β – Ti(Mo) и α – Ti(Zr), характеризующимися различными кристаллическими структурами.

ВЫВОДЫ

В системе Mo : Ti : Zr обнаружено формирование твердого раствора на основе высокотемпературной фазы титана β – Ti(Mo, Zr) при воздействии компрессионными плазменными потоками с плотностью поглощенной энергии 19 Дж/см², повышение которой до 23 Дж/см² обуславливает снижение концентрации молибдена и циркония, в результате чего происходит формирование двух твердых растворов β – Ti(Mo) и α – Ti(Zr), что в совокупности позволяет повысить микротвердость легированного слоя до 3.5 ГПа.

Литература

1. Конвективный массоперенос в поверхностных слоях титана, подвергнутого воздействию компрессионными плазменными потоками / Углов В. В., Шиманский В. И., Черенда Н. Н. и др. // ФХОМ. 2012. №6. С. 31.
2. Формирование твердых растворов в системе «цирконий-титан» под воздействием компрессионных плазменных потоков и сильноточных электронных пучков / Черенда Н. Н., Шиманский В. И., Углов В. В. и др. // Перспективные материалы. 2012. С. 16.