ФОРМИРОВАНИЕ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ВОЛЬФРАМА И МЕДИ С ПОМОЩЬЮ КОМПРЕССИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ

В.И. Шиманский, А.С. Довгалюк
Белорусский государственный университет,
пр. Независимости 4, Минск 220030, Беларусь, shymanskiv@mail.ru

В представленной работе показана возможность формирования сплавов на основе вольфрама и меди при воздействии компрессионными плазменными потоками. Для повышения содержания меди в сплаве, ограниченного их взаимной нерастворимостью, в работе используется трехкомпонентный сплав W-Nb-Cu. Импульсное воздействие плазменными потоками позволяет расплавить предварительно нанесенное покрытие меди ниобия и обеспечить растворение меди в расплаве ниобия. Последующий нагрев приповерхностного слоя в момент окончания импульса плазмы позволяет расплавить часть подложки вольфрама и растворить в ней жидкую фазу ниобия. Таким образом, после кристаллизации происходит формирование сплава W-Nb-Cu, представляющего собой твердый раствор W(Nb,Cu), в который внедрены частицы меди размером 100-200 нм.

Ключевые слова: вольфрам; ниобий; медь; компрессионные плазменные потоки; твердый раствор; композиционная структура.

TUNGSTEN AND COPPER BASED ALLOYS FORMATION BY COMPRESSION PLASMA FLOWS

V.I. Shymanski, A.S. Dovgalyuk
Belarusian State University,
4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus, shymanskiv@mail.ru

The presented work shows the possibility of forming alloys based on tungsten and copper under the action of compression plasma flows. To increase the copper content in the alloy, limited by their mutual insolubility, a three-component W-Nb-Cu alloy is used in the work. Pulsed exposure of plasma flows makes it possible to melt the previously deposited niobium-copper coating and ensure the dissolution of copper in the niobium melt. Subsequent heating of the near-surface layer at the end of the plasma pulse makes it possible to melt part of the tungsten substrate and dissolve the liquid phase of niobium in it. Thus, after crystallization, the W-Nb-Cu alloy is formed, which is a W(Nb,Cu) solid solution, in which copper particles 100–200 nm in size are embedded.

Keywords: tungsten; niobium; copper; compression plasma flows; solid solution; composite structure.

Введение

Вольфрам и его сплавы являются перспективными материалами в области термоядерной энергетике, в конструкциях камер реактора, где они применяются для изготовления первой стенки или дивертора. Именно область дивертора подвергается высоким термическим нагрузкам и характеризуется большими температурными градиентами, термонапряжениями, а также высокими радиационными нагрузками. При использовании вольфрама в качестве пластин дивертора такие мощные нагрузки могут привести к перегреву поверхности и даже ее плавлению. При циклических мощных тепловых нагрузках температура поверхности может превышать температуру рекристаллизации, что приводит к изменению микроструктуры вольфрама, росту зёрен, ухудшению механических свойств и охрупчиванию. Основной причиной таких эффектов является высокий градиент температуры, который связан с низкой теплопроводностью вольфрама, не позволяющей эффективно отводить тепло в объем пластин, а способствует существенному разогреву поверхности. Решение этой проблемы может быть достигнуто путем создания сплавов на основе вольфрама с добавлением элементов, повышающих коэффициент теплопроводности, например, спла-

вы на основе вольфрама и меди. Однако, ввиду большой разницы между температурами плавления вольфрама и меди, традиционные методы формирования сплавов, например, с помощью литейных технологий, для него малопригодны. Более того, вольфрам и медь характеризуются абсолютной несмешиваемостью в жидком состоянии в равновесных условиях. Эти обстоятельства существенным образом ограничивают способы формирования сплавов вольфрама и меди.

В настоящей работе предлагается использовать короткоимпульсное высокоэнергетическое воздействие компрессионным плазменным потоком на поверхность вольфрамовых пластин, осуществляемое в режиме плавления поверхностного слоя. Особенностью такого метода воздействия заключается в том, что он позволяет сформировать сплав не во всем объеме металлической пластины, а лишь в приповерхностном слое, толщина которого ограничивается толщиной расплавленного слоя. Подобные методы формирования сплавов в приповерхностных слоях были многократно использованы на других металлов и сплавов.

Помимо этого, в работе предлагается решить проблему внедрения меди в вольфрам путем добавления третьего элемента – ниобия или циркония, которые обладают промежуточной температурой плавления между вольфрамом и медью, а также обладают достаточно высокой растворимостью в вольфраме и меди. В связи с этим, основной целью работы являлось установление особенностей структурно-фазовых превращений в вольфраме, легированном медью и ниобием (сплав W-Cu-Nb) при воздействии компрессионными плазменными потоками.

Методика эксперимента

В качестве объектов исследования использовались образцы технически чистого вольфрама в виде пластин толщиной 1 мм и латеральными размерами 10×10 мм. На поверхности пластин методом вакуумно-дугового осаждения было сформировано двухкомпонентное покрытие Cu-Nb (осаждение осуществлялось при одновременном распылении металлических катодов). Толщина покрытия составляла 2-3 мкм. В качестве образцов для сравнения были сформированы покрытия меди такой же толщины без добавления второго компонента.

Впоследствии образцы вольфрама с нанесенными покрытиями подвергались воздействию компрессионных плазменных потоков (КПП), генерируемых в остаточной атмосфере азота в магнитоплазменном компрессоре компактной геометрии. Обработка КПП осуществлялась при напряжении на системе накопительных конденсаторов 4.0 кВ. Изменяя расстояние между образцами и электродом от 8 до 10 см, удавалось варьировать плотность энергии, поглощаемую поверхностным слоем образцов, от 55 до 35 Дж/см^2.

Элементный состав поверхностного слоя после воздействия КПП исследовался с помощью рентгеноспектрального микроанализа с использованием микроанализатора Oxford Max^N, работающего совместно с растровым электронным микроскопом LEO1455 VP. Определение фазового состава проводился с помощью рентгеноструктурного анализа на дифрактометре Rigaku Ultima IV в медном излучении с использованием геометрии параллельного пучка.

Результаты и их обсуждение

Воздействие КПП с выбранными энергетическими режимами на образцы вольфрама с предварительно нанесенными покрытиями Cu, Cu-Nb позволяет расплавить сформированные покрытия и часть подложки вольфрама. Оценки на основе теоретического расчета температуры и анализа микроструктуры модифицированного слоя показывает, что глубина расплавленного слоя достигает 5 мкм при максимальной плотности поглощенной энергии 55 Дж/см^2. Так как воздействие КПП носит импульсный характер, то рас-

плав существует исключительно в течение длительности импульса, которая составляет 100 мкс, после чего начинается процесс кристаллизации. Тем не менее этого времени существования расплава достаточно для реализации режима гидродинамического перемешивания расплава, приводящего к созданию многокомпонентного сплава.

О внедрении меди в кристаллическую решетку вольфрама после кристаллизации поверхностного слоя можно судить по изменению параметра решетки самого вольфрама. Так, согласно результатам рентгеноструктурного анализа в поверхностном слое вольфрама, легированном медью, наблюдается две фазы – вольфрам и медь, что свидетельствует о их разделении и несмешиваемости в жидком состоянии. Однако параметр решетки вольфрама составляет 0.3154-0.3157 нм, что ниже его стандартного значения (0.3165 нм). Такое уменьшение параметра решетки вольфрама, зависящее также от величины плотности поглощенной энергии, можно объяснить внедрением атомов меди, обладающих меньшим атомным радиусом, в кристаллическую решетку вольфрама и образованием твердого раствора W(Cu). Однако результаты элементного анализа показывают, что концентрация меди при максимальной плотности поглощенной энергии составляет 1.3 ат. %.

В сплаве WCuNb, сформированном при аналогичных энергетических параметрах плазменного потока, концентрация меди достигает 16-19 ат. % при концентрации ниобия около 40 ат. %. Анализ фазового состава позволил обнаружить два типа твердых растворов – двухкомпонентный раствор на основе вольфрама и ниобия W(Nb) и трехкомпонентный раствор W(Nb,Cu). При всех использованных режимах воздействия также обнаруживается отдельная фаза меди, которая не растворилась в кристаллической решетке вольфрама. С помощью растровой электронной микроскопии показано, что медь, которая не входит в состав твердого раствора, локализована в виде отдельных частиц размером 100-200 нм в матрице твердого раствора.

Заключение

В работе продемонстрирована возможность синтеза сплавов на основе вольфрама и меди с помощью компрессионных плазменных потоков. Показано, что в результате воздействия КПП с плотностью поглощенной энергии 35-55 Дж/см^2 на вольфрам с предварительно сформированным покрытием Nb-Cu позволяет сформировать композиционную структуру, представляющую собой наночастицы меди, внедренные в матрицу твердого раствора.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект Т23КИ-039).