

5.1;13.2

Влияние нанокристаллической структуры на ионно-электронную эмиссию сплава Al + 6% Mg

© Р.Х. Хисамов, Ю.М. Юмагузин, Р.Р. Мулюков, К.С. Назаров,
И.М. Салимов, И.М. Сафаров, Л.Р. Зубаиров

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа
E-mail: lundr@rambler.ru

Поступило в Редакцию 2 ноября 2012 г.

Исследована ионно-электронная эмиссия нанокристаллического алюминиевого сплава Al + 6% Mg. Нанокристаллическая структура в сплаве была получена деформационным методом кручения под квазигидростатическим давлением. Установлено, что коэффициент ионно-электронной эмиссии для нанокристаллического образца сплава имеет повышенные значения по сравнению с крупнокристаллическим образцом. Повышение коэффициента обусловлено изменением электронной структуры металлов при их деформации. В частности, показано, что величина работы выхода электрона для сплава Al + 6% Mg с нанокристаллической структурой имеет пониженное на 0.4 eV значение по сравнению с крупнокристаллической структурой.

Повышенный интерес к нанокристаллическим (НК) материалам (структурные составляющие которого, например, средний размер зерен, менее 100 nm) обусловлен тем, что их конструкционные и функциональные свойства значительно отличаются от свойств крупнокристаллических материалов [1,2]. НК-материалы часто получают деформационными методами. Формирование НК-структуры такими методами позволяет снизить средний размер зерен, повысить долю границ зерен со специфическим неравновесным состоянием [3]. Не так давно было установлено, что электронная структура в материале изменяется при формировании НК-структуры в нем [4–8]. Обнаруженные в работах [4,5] изменения энергетического распределения автоэлектронов по полным энергиям позволили предположить, что плотность и работа выхода электронов в границах зерен НК-металлов имеют пониженные значения. Исследования эффективной работы выхода электронов показали, что величина работы выхода для НК-металлов понижается до 0.8 eV по

сравнению с крупнометаллическими металлами [4–8]. Это открывает перспективы использования НК материалов в эмиссионной электронике (электронных источниках), например в качестве материала для холодных катодов. Холодные катоды, работающие по принципу ионно-электронной эмиссии, широко применяются и в ионных источниках. При прочих равных условиях эффективность ионного источника будет определяться эмиссионной способностью катода, а именно работой выхода электронов и коэффициентом ионно-электронной эмиссии. Последнее является важнейшей эмиссионной характеристикой катода и определяется как среднее число электронов, выбитых одним первичным ионом [9].

В данной работе приводятся результаты измерений коэффициента ионно-электронной эмиссии и работы выхода электронов НК-алюминиевого сплава Al + 6%Mg. Объектом исследования был выбран промышленный алюминиевый деформируемый сплав Al + 6%Mg стандартного химического состава: Al–6.3% Mg–0.6% Mn (примеси Cu < 0.1%, Zn < 0.2%, Fe < 0.4, Si < 0.4%). Выбор этого материала обусловлен тем, что алюминиевые сплавы с магнием широко используются в качестве холодных катодов. НК-образцы сплава Al + 6%Mg были получены деформационным методом наноструктурирования кручением под квазигидростатическим давлением 5 GPa [1–3]. Полученные образцы имели форму диска диаметром 10 mm и толщиной около 0 mm. В результате такого наноструктурирования, как показано в работе [10], в сплаве Al + 6%Mg формируется структура со средним размером зерен около 100 nm. Сравнение полученных в работе результатов исследованных НК-образцов сплава проводили с результатами исследований крупнокристаллического сплава. Для снижения систематической погрешности измерений крупнокристаллические образцы были получены отжигом НК-образцов. Отжиг НК образцов сплава Al + 6%Mg при 573 K приводит к увеличению размера зерен до 2 μ m [10]. НК-образцы после отжига примем как крупнокристаллические образцы, поскольку дальнейшее увеличение среднего размера зерен при отжиге не приводит к существенным изменениям их свойств.

Работу выхода электронов определяли методом контактной разности потенциалов с помощью электронного пучка (метод Андерсона) [11]. В эксперименте измеряли вольт-амперные характеристики (ВАХ) для НК- и крупнокристаллических образцов на установке [12]. Для придания одинаковой гладкой формы поверхности исследуемую поверхность

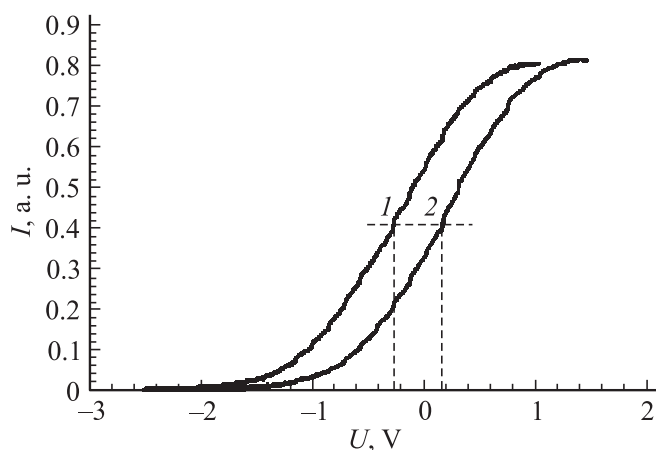


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики для образцов сплава Al + 6% Mg: 1 — НК-образцы, 2 — крупнокристаллические образцы.

образцов подвергали шлифовке с понижением зернистости бумаги, затем проводили химическую электрополировку. После этого образец помещали в измерительную установку [12] и размещали в вакуумной камере ВУП-4 при давлении не выше 10^{-3} Pa. Перед измерением ВАХ поверхность образца *in situ* подвергали ионной очистке [12]. Погрешность измерений не превышала 0.1 V. Результаты измерений контактной разности потенциалов приведены на рис. 1. Нулевое значение напряжений на графике принимали условно. О разнице в величине работы выхода электрона для образцов с НК- и крупнокристаллической структурой судили по относительному смещению ВАХ по оси напряжений при токе, равном половине от максимального значения.

Измерения показали, что среднее положение ВАХ для НК-образцов (кривая 1) находилось левее на 0.4 V по оси напряжений по сравнению с ВАХ для крупнокристаллических образцов (кривая 2), т. е. разница в величине работы выхода электронов образцов равна 0.4 eV. Снижение величины работы выхода электрона сплава Al + 6% Mg авторы, так же как и в работах [4–8], связывают с повышением доли неравновесных границ зерен, в результате формирования в нем НК-структуры.

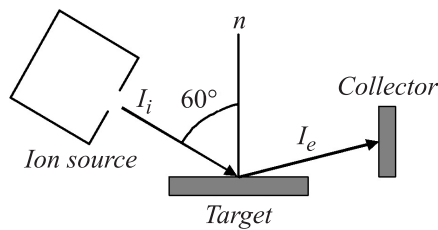


Рис. 2. Схема измерения ионно-электронной эмиссии.

Измерение коэффициента ионно-электронной эмиссии проводили на установке для ионно-лучевого распыления, изготовленной авторами. Схема измерения приведена на рис. 2. В эксперименте строили зависимость коэффициента ионно-электронной эмиссии от энергии первичных ионов. Зависимость $\gamma(E)$ измеряли следующим образом: сфокусированный пучок ионов аргона из ионного источника направляли на мишень (образец) под углом 60° к нормали и бомбардировали ее. Ток эмитируемых электронов регистрировали с помощью коллектора, расположенного на некотором расстоянии от образца. При этом на коллектор подавали напряжение около 200 В. Измерения проводили в вакууме с давлением в рабочей камере не выше 10^{-4} Па. Вначале измеряли зависимость $\gamma(E)$ для образца НК-сплава Al + 6% Mg, затем этот образец заменяли на крупнокристаллический и снова проводили измерения при тех же условиях. Перед измерением поверхность образцов, также как и при измерении работы выхода электронов, подвергали механической, электрохимической и ионной очистке. Относительная погрешность измерений по коэффициенту γ не превышала 15%.

Результаты измерений $\gamma(E)$ для НК-и крупнокристаллических образцов сплава Al + 6% Mg приведены на рис. 3. Проведенные измерения показали, что для НК-образцов зависимость $\gamma(E)$ смещена вверх по оси ординат и имеет повышенные значения коэффициента γ при фиксированных значениях энергии первичных ионов E по сравнению с крупнокристаллическими образцами.

Повышение коэффициента ионно-электронной эмиссии естественно связать с понижением величины работы выхода электрона в НК-образце. Согласно [13], процесс ионно-электронной эмиссии происходит в три этапа: 1 — возбуждение электронов в результате внедрения ионов газа в металл; 2 — передвижение этих электронов к поверхности; 3 —

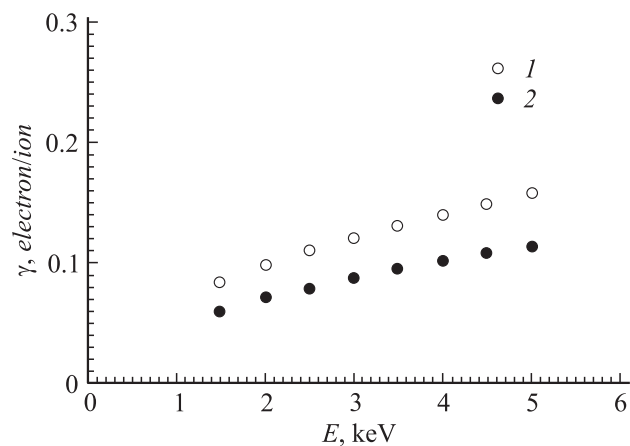


Рис. 3. Зависимость $\gamma(E)$ для НК- (1) и крупнокристаллических (2) образцов сплава Al + 6% Mg.

преодоление электронами потенциального барьера, существующего на поверхности, и выход в вакуум. Высота потенциального барьера зависит от работы выхода электрона — с уменьшением работы выхода высота барьера для электрона понижается. То есть понижение работы выхода материала катода облегчает эмиссию электронов из него и, как следствие, приводит к повышению коэффициента ионно-электронной эмиссии.

Таким образом, в работе показана возможность повышения коэффициента ионно-электронной эмиссии алюминиевого сплава Al + 6% Mg за счет формирования в нем нанокристаллической структуры.

Авторы выражают благодарность Э.А. Ушановой за участие в проведении экспериментов и обсуждении полученных результатов.

Список литературы

- [1] Носкова Н.И., Мулюков Р.Р. Субмикроструктурные и нанокристаллические металлы и сплавы. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 279 с.
- [2] Мулюков Р.Р. // Российские нанотехнологии. 2007. Т. 2. В. 7–8. С. 38–53.

- [3] *Nazarov A.A., Mulykov R.R.* // Handbook of Nanoscience, Engineering and Technology / Eds: W. Goddard, D. Brenner, S. Lyshevski, G. Iafrate. CRC Press, 2002. V. 22. P. 1.
- [4] *Mulykov R.R.* // Rev. Adv. Mater. Sci. 2006. V. 11. P. 122–129.
- [5] *Mulykov R.R.* // JVST B. 2006. V. 24. N 2. P. 1061–1066.
- [6] *Хисамов Р.Х., Сафаров И.М., Мулюков Р.Р., Юмагузин Ю.М., Зубаиров Л.Р., Назаров К.С.* // ЖТФ. 2011. Т. 81. В. 11. С. 122–124.
- [7] *Набиуллин И.Р., Лачинов А.Н., Хисамов Р.Х., Мулюков Р.Р.* // ФТТ. 2012. Т. 54. В. 3. С. 422–426.
- [8] *Хисамов Р.Х., Сафаров И.М., Мулюков Р.Р., Юмагузин Ю.М.* // ФТТ. 2013. Т. 55. И. 1. С. 3–6.
- [9] *Брусилковский Б.А.* Кинетическая ионно-электронная эмиссия. М.: Энергоатомиздат, 1990. 184 с.
- [10] *Ушанова Э.А., Зубаиров Л.Р., Сафаров И.М., Мулюков Р.Р.* // Перспективные материалы. 2009. Спец. вып. 7. С. 322–327.
- [11] *Ибрагимов Х.И., Корольков В.А.* Работа выхода электрона в физико-химических исследованиях. М.: Интермет Инжиниринг, 2002. 526 с.
- [12] А.с. № 89709. 2009.
- [13] *Sternglass E.J.* // Phys. Rev. 1957. V. 108. N 1. P. 1. P. 1–12.