

## ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ

Деркач А.В., Карымов А.Г., Посудневский И.И.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Ташлыкова-Бушкевич И.И. – канд. физ.-мат. наук, доцент

В данной работе рассмотрены результаты исследования топографии поверхностей быстрозатвердевших фольг сплавов Al-Cr с различной концентрацией легирующего элемента (хрома), подвергнутых термической обработке. Полученные с помощью атомного силового микроскопа данные, обработанные используя методы математической статистики, демонстрируют зависимость отношения высоты неровностей профиля к среднему значению шага между выступами, а так же значения средней арифметической величины шероховатости от способа обработки поверхности фольги и количества примесей в нее.

Технологии анализа структуры материалов в наше время интенсивно развиваются. Атомно-силовая микроскопия (АСМ), наряду с другими методами исследования поверхностей, такими как растровая электронная микроскопия или сканирующая туннельная микроскопия, широко применяются в науке и технике. При помощи атомно-силового микроскопа исследуют не только проводящие, но и непроводящие поверхности. Из достоинств данной технологии можно выделить возможность получения высококачественных снимков микрорельефа и истинно трехмерного рельефа поверхности, а также возможность автоматизированного анализа результатов обработки. К ограничениям метода можно отнести возможное искажение изображения вследствие нелинейности сканера, относительно низкую скорость сканирования и небольшую область сканирования образцов / изделий [1].

При работе с АСМ изображениями, результаты сканирования подвергаются математической обработке, что позволяет определять различные параметры топографии поверхности. Эти параметры зависят определенным образом от материала и способа обработки поверхности. Принцип работы АСМ основан на прохождении электроном потенциального барьера, который образован разрывом электрической цепи (пространством между зондирующим микроострием и поверхностью образца). В основе работы прибора лежит феномен электронного туннелирования (туннельный эффект). В качестве зонда используется игла из нитрида кремния на упругой пластинке – кантилере, который деформируется под действием сил возникающих между иглой и поверхностью. Степень деформации кантилера определяется по отклонению луча лазера, отражаемого от тыльной зеркальной стороны кантилера [2].

В настоящее время микроструктура и свойства быстрозатвердевших (БЗ) сплавов Al-Cr активно исследуются, так как алюминиевые сплавы рассматриваются в качестве перспективных материалов для изготовления емкостей, предназначенных для хранения и транспортировки сжатого водородного топлива [3]. Цель данного исследования — определить зависимости между разными параметрами шероховатости поверхности БЗ сплавов алюминия в зависимости от поверхности анализа и обработки.

В работе использовались сплавы Al-Cr с расчётным содержанием хрома 1.0 ат.%, 1.5 ат.%, 3.0 ат.%. Высокая скорость охлаждения порядка  $10^6$  К/с была достигнута выплёскиванием расплавленной капли сплава на внутреннюю поверхность вращающегося медного цилиндра [3]. Для изучения отбирались фольги толщиной 30-60 мкм и шириной 5-10 мм. Типичные АСМ изображения поверхностей фольг приведены на рис. 1.

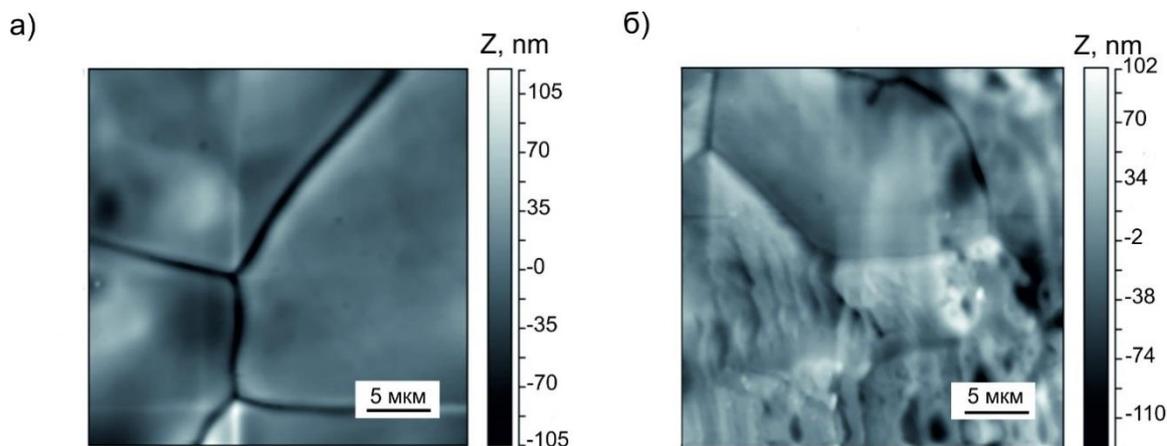


Рисунок 1 – Типичные изображения поверхности двух образцов сплава Al-1.5 ат. % Cr, полученные с помощью АСМ: а – свежезакаленная фольга, б – фольга, подвергнутая исследованию с помощью ТДС.

Методом АСМ с помощью атомного силового микроскопа NT-206 исследовалась топография обеих поверхностей фольг: поверхность А, которая контактировала с подложкой при затвердевании, и противоположная поверхность Б, которая контактировала с воздухом. Некоторые фольги подвергались анализу с помощью термодесорбционной спектроскопии (ТДС), когда образец отжигается с заданной скоростью нагрева от комнатной температуры до 600°C [3]. Для анализа на каждом АСМ изображении выбирали 11 сечений с шагом 2 мкм и для каждого из них определяли среднеарифметическую шероховатость  $R_a$ , высоту неровностей профиля  $R_z$ , среднее значение шага между выступами  $S$  и вычисляли коэффициент  $k = R_z/S$ , используемый для оценки неоднородности поверхности и несущий информацию о количественном соотношении поперечной и продольной шероховатости изучаемой поверхности [4].

На рис. 2 представлены значения параметров шероховатости, полученные после обработки АСМ изображений с помощью методов математической статистики. Установлено, что  $k$  и  $R_a$  зависят от содержания хрома и термической обработки сложным образом. Согласованное изменение параметров является в случае БЗ сплава, содержащего 3.0 ат. % Cr, что может быть объяснено достаточно высоким содержанием хрома, который, как известно, повышает термическую стабильность сплавов алюминия. Также интерес представляет обнаруженный факт, что с ростом содержания Cr коэффициент  $k$  уменьшается для поверхности А и увеличивается для поверхности Б. Для образцов, исследованных с помощью ТДС, наблюдается увеличение коэффициента  $k$  для поверхности А (за исключением сплава Al-1.0 ат. % Cr), а для поверхности Б коэффициент  $k$  увеличивается. Таким образом, результаты данной работы показывают перспективность использования АСМ изображений с целью получения дополнительной информации о поперечных и продольных характеристиках неоднородности рельефа поверхности в зависимости от условий получения материалов.

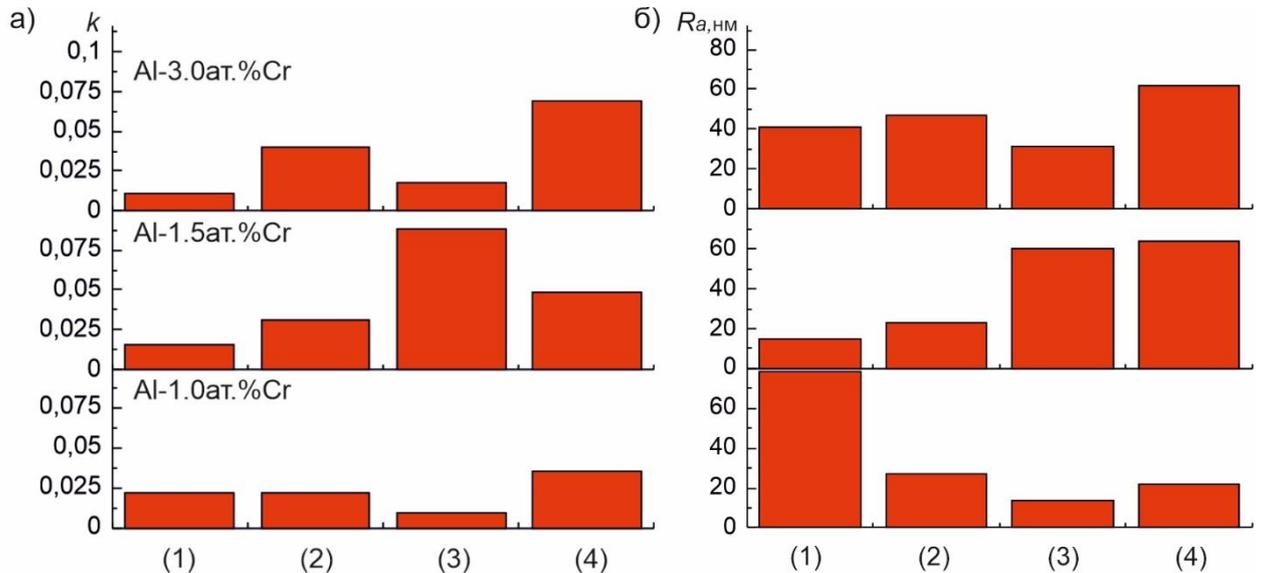


Рисунок 2 – Экспериментально измеренные величины  $k$  (а) и  $R_a$  (б) исследованных БЗ сплавов Al-Cr в зависимости от поверхности анализа и обработки: (1) и (3) - соответственно поверхности А и Б свежезакаленных образцов; (2) и (4) - соответственно поверхности А и Б фольг, исследованных с помощью ТДС.

**Список использованных источников:**

1. Rangelow, I. W. Atomic force microscope integrated with a scanning electron microscope for correlative nanofabrication and microscop / I. W. Rangelow, M. Kaestner, T. Ivanov, A. Ahmad // J. Vac. Sci. Technol. B. – 2018. – Vol. 36, № 6. – P. 33-45.
2. Саликова, С. П. Атомно-силовая микроскопия – новая возможность в изучении кардиомиоцитов / С. П. Саликова, А. А. Стадников, А. Н. Никиян // Вестник ОГУ. – 2003. - № 1. – С. 59-67.
3. Ташлыкова-Бушкевич, И. И. Анализ влияния структуры и состава на поведение водорода в быстрозатвердевших сплавах Al-Cr методом фотоэлектронной спектроскопии с использованием синхротронного излучения / И. И. Ташлыкова-Бушкевич // Актуальные проблемы физики твердого тела: материалы VII Междунар. науч. конф., Минск, 22 - 25 ноября 2016 г / НПЦ НАН Беларуси по материаловедению. – Минск : Ковчег, 2016. – С. 92-94.
4. Ташлыкова-Бушкевич, И. И. Количественный анализ нанорельефа поверхности металлических пленок на стекле по данным сканирующей зондовой микроскопии / И. И. Ташлыкова-Бушкевич, Е. С. Мойсейчик, Р. Д. Лобач, Д. В. Суходольский // Материалы и структуры современной электроники: материалы VIII Междунар. науч. конф., Минск, 10 - 11 октября 2018 г. / редкол.: В.Б. Оджаяев (отв. ред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2018. – С. 111 – 117.