

ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

УДК 681.2.083

ВЛИЯНИЕ ТИПА И КОНФИГУРАЦИИ УСТАНОВКИ
АТОМНО-ЗОНДОВОЙ ТОМОГРАФИИ С ЛАЗЕРНЫМ ИСПАРЕНИЕМ
НА ТОЧНОСТЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДАННЫХ

© 2022 г. А. А. Лукьянчук^{а, б, *}, О. А. Разницын^{а, б}, А. С. Шутов^{а, б},
А. А. Алеев^{а, б}, А. В. Клауз^{а, б}, Н. А. Бутов^а, Б. В. Руцкой^а, С. В. Рогожкин^{а, б}

^аКурчатовский комплекс теоретической и экспериментальной физики Национального исследовательского центра
“Курчатовский институт”, пл. Академика Курчатова 1, Москва, 123182 Россия

^бНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”,
Каширское ш. 31, Москва, 115409 Россия

*E-mail: anton.lukianchuk@itep.ru

Поступила в редакцию 13.10.2021 г.

После доработки 14.10.2021 г.

Принята к публикации 15.10.2021 г.

Атомно-зондовая томография – это инструмент для детального анализа химического состава наноструктуры перспективных конструкционных материалов. Использование различных устройств атомно-зондовой томографии (АЗТ) требует сертификации этих установок перед проведением исследований. В данной работе предлагается метод сравнения установок АЗТ для оценки влияния общей конфигурации системы на точность получаемых данных. Представлено сравнение полученных данных для алюминиевого сплава Al–3.3Cu–2.5Mn–0.5Zr и конструкционной стали 16X12MBCФБР, полученных на установке ПАЗЛ-3D и на модернизированной установке АТЛАЗ на основе ЕСОТАР. Сравнение результатов подтверждает возможность проведения исследований одного и того же материала на аналогичных установках без существенного искажения данных без значительного искажения данных при их анализе и интерпретации.

Ключевые слова: микроскопия, атомно-зондовая томография, алюминиевые сплавы, наноструктура, методика исследования

DOI: 10.56304/S2079562922010262

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день атомно-зондовая томография (далее – АЗТ) вошла в группу методик исследования наноструктуры материалов как одна из самых точных для оценки размера и состава наноразмерных включений и пространственных распределений в них химических элементов. Существует множество вариаций АЗТ приборов, как коммерческих [1], так и создаваемых на базе различных научных институтов [2–5]. И если разница между кардинально отличающимися типами установок, например с полевым и лазерным испарением, достаточно подробно изучена [6], то различие в обработке и интерпретации данных, полученных на разных установках с лазерным испарением вопрос достаточно сложный и требующий детального исследования.

В НИЦ “Курчатовский Институт” уже более 15 лет ведутся активные работы по изучению влияния ионного облучения на конструкционные материалы [7, 8]. С 2003 г. работы велись на установке ЕСОТАР фирмы САМЕСА – АЗТ с высоко-

вольтным импульсным испарением, который к 2010 г. уже морально устарел и не отвечал современным потребностям к объемам получаемых данных и типам исследуемых материалов. С целью развития данного направления был разработан атомно-зондовый томограф ПАЗЛ-3D [2] и проведена отработка методики сбора данных на нем [9, 10]. В 2021 г. запущена модернизированная установка АТЛАЗ на основе ЕСОТАР САМЕСА с полностью замененной системой детектирования, испарения и управления установкой (системой сбора данных).

1. УСТАНОВКИ АТОМНО-ЗОНДОВОЙ ТОМОГРАФИИ

Модernизированная АЗТ установка АТЛАЗ была собрана на базе прибора САМЕСА ЕСОТАР. Позиционно-чувствительный детектор DLD 120 с эффективностью детектирования 60% и диаметром чувствительной части 120 мм фирмы RoentDek Handels GmbH установлен вместо системы авто-

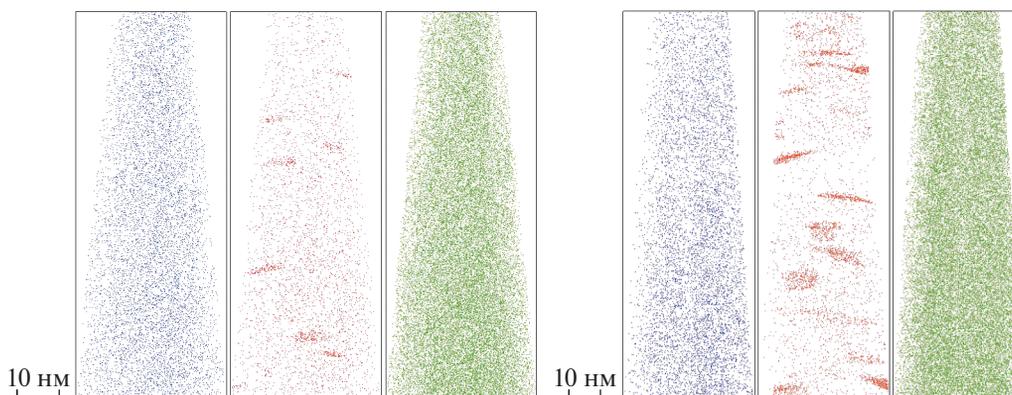


Рис. 1. Атомные карты сплава Al–Cu–Mn–Zr 350°C ПАЗЛ-3D (слева) и АТЛАЗ (справа).

ионной микроскопии. Лазерная система испарения основана на пикосекундном лазере Huaray Olive-532-15 с длительностью лазерных импульсов менее 10 пс, длиной волны излучения 532 нм, частотой повторения импульсов до 1 МГц и максимальной энергией импульса не менее 15 мкДж на всем диапазоне частот. Для поддержания высокого напряжения на исследуемом образце использован штатный высоковольтный источник постоянного напряжения установки ECOTAP: BERTAN 205B-20R фирмы Spellman High Voltage Electronics Corporation. В качестве системы охлаждения образца использована штатная система установки ECOTAP на основе системы Cryodyne 350 CP фирмы STI Cryogenics. Позиционирование лазерного луча проводится при помощи диэлектрического зеркала диаметром 2", установленного в оправу, приводимую в движение актуаторами PIAK10 фирмы Thorlabs. Процесс наведения контролируется при помощи камеры Basler acA2440-35um. Установка АТЛАС использует прямопролетную геометрию испарения образца с расстоянием от образца до детектора 265 мм.

В установке ПАЗЛ-3D [2] также используется детектирующая система фирмы RoentDek Handels GmbH. Данная система отличается эффективностью детектирования в 80–90% и диаметром детектора 80 мм, в то время как у АТЛАЗ – 120 мм. Для испарения установлена лазерная система испарения TETA-25ST производства ООО “Авеста”. В проведенных исследованиях [2, 11, 12] была оценена точность восстановления данных: пространственное разрешение не хуже 4 Å, разрешение по массе на полувысоте 500–600 отн. ед. Установка ПАЗЛ-3D также использует прямопролетную геометрию испарения образца с расстоянием между образцом и детектором 183 мм.

Управление сбором данных проводилось при помощи программного обеспечения ПАЗЛ-3D-СБОР V 1.0 [13], разработанного в НИЦ “Курча-

товский Институт” и отработанного на установке ПАЗЛ-3D.

2. МАТЕРИАЛЫ

Для исследования выбирались материалы, хорошо изученные группой НИЦ “Курчатовский Институт”, содержащие наноразмерные кластеры Из конструкционных сталей была выбрана сталь 16X12МВСФБР ЭП-823 [14] после облучения ионами (далее ЭП-823), так как в ней присутствуют кластеры с достаточно высокой плотностью. В классе алюминиевых сплавов – Al–3.3Cu–2.5Mn–0.5Zr (мас. %) после отжига при 350 и 450°C [15, 16] (далее Al–Cu–Mn–Zr 350°C и Al–Cu–Mn–Zr 450°C соответственно). Также проведено сравнение полученных данных при исследовании вольфрама чистотой 99.95% для подтверждения пространственного разрешения АТЛАЗ. Погрешности для концентраций рассчитаны по формуле, представленной в работе [17, 18]. В случае, когда на одно состояние приходилось более одного исследования, в качестве погрешности указано среднее отклонение от среднего значения.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1 Методика сравнения атомно-зондовых данных

Критериями сравнения точности восстановления данных были выбраны следующие характеристики: разрешение по массе на полувысоте пика, разрешение по массе на 10% высоты пика, точность определения концентраций матрицы и частиц, точность определения размеров частиц. Также использовались технические параметры для сравнения данных. Как показано в работах [19, 20] одним из важнейших таких параметров можно считать количество и распределение мульти-событий. Для исследуемых объемов рассчитаны как общий процент мульти-событий, так и доля мульти-событий, приходящаяся на элементы, которые является кластеро-/фазо-образующими. Помимо

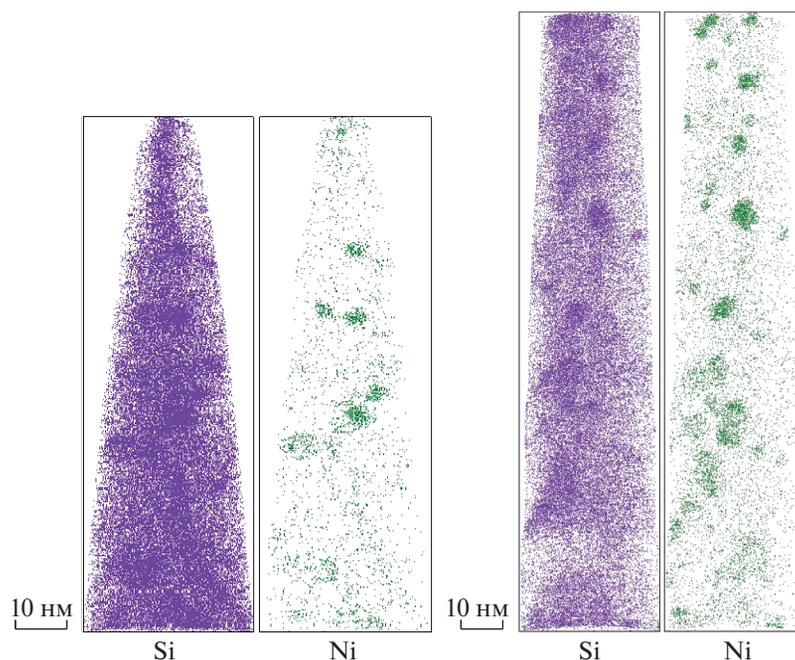


Рис. 2. Атомные карты облученной стали ЭП-823 на ПАЗЛ-3D (слева) и АТЛАЗ (справа).

мульти-событий, учитывались величины скорости детектирования, уровень шума и соотношение детектируемых ионов разных степеней ионизации для основного химического элемента.

3.2 Исследование вольфрама

На ПАЗЛ-3D вольфрам исследовался на этапе запуска установки в 2017 г. [2]. Определены кристаллографические выходы направлений (100) и (011) рассчитаны межплоскостные расстояния для каждого из них: (1.58 ± 0.03) Å и (1.9 ± 0.3) Å соответственно. Табличные значения для данных выходов равняются 1.58 и 2.23 Å. Также вольфрам был исследован на установке АТЛАЗ. Определен один кристаллографический выход (112) с межплоскостным расстоянием в (1.2 ± 0.1) Å, тогда как табличное значение составляет 1.29 Å. Для восстановления использовались следующие методики восстановления данных: адаптированный алгоритм 3D восстановления на основе алгоритма Баса [21], масс-спектр оптимизировался по алгоритму Шутова и др. [12].

3.3 Исследование сплавов алюминия

Образцы приготовлены с помощью электрохимического утонения. Все данные на ПАЗЛ-3D и АТЛАЗ собраны при температуре образца 50 К. Мощность лазера составляла на ПАЗЛ-3D 85 ± 1 мВт и на АТЛАЗ 3 ± 0.5 мВт. Скорость сбора данных представлена ниже в таблице. Восстановление и обработка данных проводилась в ПО КВАНТМ-

3D. Параметры восстановления для ПАЗЛ-3D были выбраны следующие: полевой множитель k_f от 4 до 6, множитель сжатия изображения ICF от 1.2 до 1.6. Алгоритмы восстановления масс-спектра и 3D данных использовались те же, что и для вольфрама. Для определения состава включений Zr для сплава Al–Cu–Mn–Zr 350°C, ввиду их не сферической формы, использовались изоконцентрационные поверхности [12].

Ниже, в табл. 1–4, представлено сравнение данных для разных установок для алюминиевого сплава.

Для Al–Cu–Mn–Zr 450°C на ПАЗЛ-3D представлены средние значения характеристик данных по трем исследованным образцам.

Проведено сравнение химического состава материалов как в кластерах для Al–Cu–Mn–Zr 350°C, так и в матрице для Al–Cu–Mn–Zr 350°C и 450°C. Ввиду не сферической формы включений Zr была использована методика изо-концентрационных поверхностей (поверхностей одинаковой концентрации) [12]. Для определений границ включений были построены поверхности так, чтобы перегиб профиля концентраций, построенный нормально к поверхности (проксиграмма) проходил точно на полувысоте по концентрациям. Параметры, используемые для построения и расчетов, были выбраны следующие: размер сетки 1–1.5 нм, делокализация 2 нм, изо-концентрация поверхности по 1.5% Zr.

Данные для Al–Cu–Mn–Zr 450°C на ПАЗЛ-3D рассчитаны как среднее по трем исследованным

Таблица 1. Сравнение характеристик точности восстановления данных для алюминиевых сплавов Al–Cu–Mn–Zr

	ПАЗЛ-3D, 350°C	АТЛАЗ, 350°C	ПАЗЛ-3D, 450°C	АТЛАЗ, 450°C
$M/\Delta M_{50\%} \text{ Al}^+$	670	260	421	430
$M/\Delta M_{10\%} \text{ Al}^+$	206	120	146	190
Мульти-события, %	0.7	2.9	0.9	2.9
Мульти-события Cu, %	4.23	0.54	7.11	3.17
Мульти-события Zr, %	7.31	0.85	0.18	0.6
Шум (40–41 а.е.м.)/число атомов, 10^{-5}	5.4	1.9	10.7	1.67
Скорость сбора данных атомов/воздействие	0.005	0.006	0.007	0.007
Соотношение $\text{Al}^+/\text{Al}^{++}$	640	310	630	450

Таблица 2. Сравнение состава матрицы [ат. %] для алюминиевых сплавов Al–Cu–Mn–Zr после отжига при температурах 350 и 450°C, полученных на установках ПАЗЛ-3D и АТЛАЗ

	ПАЗЛ-3D, 350°C	АТЛАЗ, 350°C	ПАЗЛ-3D, 450°C	АТЛАЗ, 450°C
Al	99.49 ± 0.01	99.66 ± 0.01	99.2 ± 0.1	99.20 ± 0.01
Cu	0.29 ± 0.06	0.24 ± 0.04	0.62 ± 0.2	0.67 ± 0.05
Mn	0.01 ± 0.01	0.004 ± 0.002	0.02 ± 0.01	0.010 ± 0.005
Zr	0.11 ± 0.05	0.06 ± 0.04	0.010 ± 0.008	0.08 ± 0.05
Ni, C, O	Баланс	Баланс	Баланс	Баланс

образцам, погрешности также для данного материала рассчитаны как среднее отклонение от среднего значения.

Плотность включений для данных с ПАЗЛ-3D составила $(0.9 \pm 0.1) \cdot 10^{23}$ и $(1.40 \pm 0.05) \cdot 10^{23} \text{ м}^3$ для АТЛАЗ.

3.4 Исследование стали ЭП-823

Условия сбора данных были во много идентичны тем, что использовались при исследовании алюминиевых сплавов и вольфрама. Температура образцов составляла 50 К, мощность лазера на ПАЗЛ-3D 40 ± 1 мВт, на АТЛАЗ 2 ± 0.5 мВт. Для восстановления атомно-зондовых данных и их обработки также использовалось ПО КВАНТМ-3D и те же алгоритмы 3D восстановления. Множитель поля k_f составлял 4.5, коэффициент сжатия изображения ICF от 1.2 до 1.35. Процесс обра-

ботки масс-спектра включал в себя первоначальную разметку с помощью автоматизированного инструмента разметки модуля “environment editor”, после была проведена ручная коррекция размеченных пиков. Далее был проведен пересчет пересекающихся пиков, в частности для Cr и Fe, ориентируясь на соседние пики этих элементов. Был проведен пересчет коэффициента Ni^{++} с целью минимизировать влияние термического хвоста Fe. Пики меди были разделены и рассмотрены на 3D модели, с целью убедиться, что оба пика соответствуют Cu. Также были проверены пики Mo на возможное пересечение с Cr^+ . В образце на ПАЗЛ-3D, был обнаружен пик Nb между пиками Mo, на АТЛАЗ из-за повышенного шума этот пик не виден на масс-спектре.

Поиск кластеров был проведен по Ni^+ согласно алгоритму максимального разделения [22]. Из пересечения соответствующих графиков, получе-

Таблица 3. Состав кластеров [ат. %] в алюминиевом сплаве Al–Cu–Mn–Zr после отжига при 350°C, полученный на установках ПАЗЛ-3D и АТЛАЗ

	ПАЗЛ-3D	АТЛАЗ
Al	96.9 ± 0.3	96.7 ± 0.4
Cu	0.3 ± 0.1	0.3 ± 0.1
Mn	0.04 ± 0.02	0.003 ± 0.002
Zr	2.4 ± 0.3	2.8 ± 0.2
Ni, C, O	Баланс	Баланс

Таблица 4. Сравнения характеристик точности восстановления данных для ЭП-823 на установках ПАЗЛ-3D и АТЛАЗ

	ПАЗЛ-3D	АТЛАЗ
$M/\Delta M_{50\%} \text{ Fe}^{++}$	938	726
$M/\Delta M_{10\%} \text{ Fe}^{++}$	245	329
Мульти-события, %	1.4	17.7
Мульти-события Ni, %	1.7	28.6
Мульти-события Si, %	0.4	26.1
Мульти-события Cu, %	3.9	6.7
Шум (80–81 а.е.м.)/число атомов, 10^{-5}	10.05	30.1
Скорость сбора данных атомов/воздействие	0.008	0.01
Соотношение $\text{Fe}^+/\text{Fe}^{++}$	307	368

Таблица 5. Сравнение состава матрицы и кластеров [ат. %] стали ЭП-823, полученных на установках ПАЗЛ-3D и АТЛАЗ

	ПАЗЛ-3D матрица	АТЛАЗ матрица	ПАЗЛ-3D кластеры	АТЛАЗ кластеры
Fe	83.43 ± 0.02	83.98 ± 0.02	48 ± 1	53 ± 1
Cr	11.11 ± 0.06	10.51 ± 0.05	6.9 ± 0.8	7.3 ± 0.7
Si	2.59 ± 0.06	1.88 ± 0.05	15 ± 1	10.0 ± 0.8
Mn	0.94 ± 0.06	1.98 ± 0.05	4.5 ± 0.6	4.7 ± 0.5
Ni	0.59 ± 0.06	0.78 ± 0.05	23 ± 1	21 ± 1
Cu	0.05 ± 0.04	0.08 ± 0.05	0.2 ± 0.1	0.5 ± 0.2
W	0.16 ± 0.06	0.28 ± 0.05	0.03 ± 0.03	0.2 ± 0.1
C	0.08 ± 0.06	0.09 ± 0.05	0.11 ± 0.06	0.08 ± 0.06
Nb	0.07 ± 0.06	–	0.3 ± 0.1	0.5 ± 0.1
Остальные	Баланс	Баланс	Баланс	Баланс

ны параметры идентификации кластеров по методу максимальной сепарации ($N_{\min} = 7$ и $R = 8$ для ПАЗЛ-3D и $N_{\min} = 7$ и $R = 7.5$ для АТЛАЗ). По найденным параметрам были выделены кластеры, после их отделения от матрицы. Были просмотрены кластеры на 3D изображении для выявления случайного объединения или выделения несоответствующий области в качестве кластера. Был создан отдельный масс-спектр для кластеров. В этом масс-спектре учитывались в приоритете элементы обогащения, в частности Ni^{++} . Также внутри кластеров для обеих установок был обнаружен Nb и, соответственно, размечен. Данные масс-спектра отдельно матрицы и кластеров были экспортированы и объединены в общей таблице.

В табл. 4 и 5, представлено сравнение данных для разных установок отдельно для стали ЭП-823.

В табл. 5 представлено сравнение химического состава материалов как в кластерах, так и в матрице для стали ЭП-823.

Средний размер кластеров на ПАЗЛ-3D составил (2.8 ± 0.2) нм, на АТЛАЗ средний размер ра-

вен (3.2 ± 0.4) нм. Рассчитана средняя плотность кластеров в объеме, которая составила $(1.2 \pm 0.4) \cdot 10^{23}$ и $(1.1 \pm 0.2) \cdot 10^{23} \text{ м}^3$ для ПАЗЛ-3D и АТЛАЗ соответственно.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как видно из полученных выше характеристик точности восстановления данных установки ПАЗЛ-3D и АТЛАЗ сравнимы по разрешению по массе и для алюминиевых сплавов, и для сталей. Сравнение количества шума проводилось на участках масс-спектра после пиков основных элементов и сопоставлялось с учетом нормирования на общее число собранных атомов. Количество шума при исследовании алюминиевого сплава отличается в 3–6 раз в пользу АТЛАЗ, но в случае со сталью ситуация противоположная (на АТЛАЗ шума больше в три раза). Данный факт вызван скорее разными условиями испарения образцов – разная скорость сбора данных и неодинаковая форма образцов.

Наблюдаются общие закономерности при сравнении доли мульти-событий. На АТЛАЗ детекти-

руется существенно больше мульти-событий, чем на ПАЗЛ-3D. В случае исследования чистых материалов или алюминиевых сплавов это практически не играет роли. При исследовании стали получены данные с 17.7% мульти-событий. Предположительно, это может быть вызвано использованием криогенной системы без устройств гашения вибраций на АТЛАЗ (вибрации могут составлять более 20 мкм), на которую непосредственно закреплен держатель образца. Это может приводить к частому выходу образца из области освещения лучом лазера, что влечет за собой необходимость поддерживать более высокую интенсивность испарения в моменты корректного освещения вершины образца. Известно, что в этом случае количество мульти-событий возрастает, и снижается точность химической идентификации [10]. Различия в пропорции между элементами в мульти-событиях для алюминиевых сплавов, как видно из результатов, не вносит существенного различия в определяемый химический состав матрицы и кластеров. Скорее всего, отсутствие разницы обусловлено малым значением общего числа мульти-событий. Для ЭП-823, при исследовании на АТЛАЗ, получены существенно большие значения мульти-событий как для общего числа, так в пропорциях по элементам. Как следствие, наблюдаются отличия по концентрациям для Si, Mn, W и Cr, что, скорее всего, может быть нивелировано более точным подбором условий испарения или модернизацией прибора за счет уменьшения вибраций держателя образца.

Сравнение результатов исследования вольфрама позволяет заключить, что установки имеют практически идентичное пространственное разрешение $\sim 1-4 \text{ \AA}$. Это позволяет предположить, что все пространственные характеристики при сравнении данных должны быть иметь мало различий между установками. Данный тезис подтверждается при сравнении среднего размера кластеров в стали ЭП-823 и преципитатов Zr в алюминиевом сплаве. В обоих случаях средний размер наноразмерных объектов совпадает в пределах статистической погрешности. С другой стороны, в сплаве Al-Cu-Mn-Zr 350°C на разных установках наблюдается некоторое отличие рассчитанной плотности кластеров. Ввиду небольшой разницы результатов (всего в 1.5 раза) можно предположить, что причина отклонения в плотности частиц связана с реальными различиями плотности в разных зернах материала. При этом химический состав как матрицы, так и частиц для алюминиевых сплавов совпадает в пределах погрешности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье была проведена оценка точности восстановления данных модернизированной установки АТЛАЗ, выполненной на базе

прибора ЕСОТАР фирмы САМЕСА, по сравнению с установкой схожей конструкции – ПАЗЛ-3D. Сравнение проведено на сплаве алюминия Al-3.3Cu-2.5Mn-0.5Zr, ферритно-мартенситной стали ЭП-823 и вольфраме. Для сравнения полученных данных на установках ПАЗЛ-3D и АТЛАЗ использовался комплекс программ КВАНТМ-3D. Подтверждена эквивалентность данных на ПАЗЛ-3D и на АТЛАЗ для алюминиевых сплавов и вольфрама. Для ферритно-мартенситной стали наблюдается заметное увеличение количества мульти-событий и незначительное изменение концентраций минорных элементов, что требует дальнейшей оптимизации условий испарения. Для трехмерных распределений атомов вольфрама были обнаружены хорошо видимые атомные плоскости.

Полученные данные позволяют сделать вывод, что точность реконструкции новой установки АТЛАЗ эквивалентна точности ПАЗЛ-3D для общих задач анализа структуры и состава материалов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Атомно-зондовая томография выполнена на оборудовании Центра коллективного пользования КАМИКС (<http://kamiks.itep.ru/>) НИЦ “Курчатовский институт”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Martin T., London A., Jenkins B., Hopkin S., Douglas J., Styman P., Moody M.* // *Microsc. Microanal.* 2017. V. 23 (2). P. 227–237.
2. *Рогожкин С.В., Алеев А.А., Лукьянчук А.А., Шутов А.С., Разницын О.А., Кириллов С.Е.* // *Приборы и техника эксперимента.* 2017. № 3. С. 129–134. [*Rogozhkin S.V., Aleev A.A., Lukyanchuk A.A., Shutov A.S., Raznitsyn O.A., Kirillov S.E.* // *Instrum. Exp. Tech.* 2017. V. 60. P. 428].
3. *Schlesiger R., Oberdorfer C., Wuerz R., Greiwe G., Stender P., Armeier M., Pelka P., Spaleck F., Schmitz G.* // *Rev. Sci. Instrum.* 2010. V. 81 (4). P. 043703.
4. *Gault B., Vurpillot F., Vella A., Gilbert M., Menand A., Blavette D., Deconihout B.* // *Rev. Sci. Instrum.* 2006. V. 77 (4). P. 043705.
5. *Hono K., Ohkubo T., Chen Y.M., Kodzuka M., Oh-ishi K., Sepelri-Amin H., Lia F., Kinno T., Tomiya S., Kunitani Y.* // *Ultramicroscopy.* 2011. V. 111 (6). P. 576–583.
6. *Silaeva E.P., Shcheblanov N.S., Itina T.E., Vella A., Houard J., Sévelin-Radiguet N., Vurpillot F., Deconihout B.* // *Appl. Phys. A.* 2013. V. 110 (3). P. 703–707.
7. *Суворов А.Л., Рогожкин С.В., Залужный А.Г., Алеев А.А., Бобков В.Ф., Зайцев С.В., Карнов А.В., Козодаев М.А., Логинов Б.А., Макеев О.Н.* // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы.* 2006. Вып. 1 (66). С. 3–13.
8. *Рогожкин С.В., Никитин А.А., Хомич А.А., Искандаров Н.А., Хорошилов В.В., Богачев А.А., Лукьянчук А.А., Разницын О.А., Шутов А.С., Федин П.А., Куйбида Р.П., Кулевой Т.В., Васильев А.Л., Пресняков М.Ю., Кравчук К.С., Усеинов А.С.* // *Ядерная физика и инжиниринг.* 2018. Т. 9 (3). P. 245–258. [*Rogozhkin S.V.,*

- Nikitin A.A., Khomich A.A., Iskandarov N.A., Khoroshilov V.V., Bogachev A.A., Lukyanchuk A.A., Raznitsyn O.A., Shutov A.S., Fedin P.A., Kuibeda R.P., Kulevoy T.V., Vasiliev A.L., Presniakov M.Yu., Kravchuk K.S., Useinov A.S.* // *Phys. At. Nucl.* 2019. V. 82 (9). P. 1239].
9. *Raznitsyn O.A., Lukyanchuk A.A., Shutov A.S., Rogozhkin S.V., Aleev A.A.* // *J. Anal. Chem.* 2017. V. 72 (14). P. 1404–1410.
 10. *Разницын О.А., Лукьянчук А.А., Шутов А.С., Рогожкин С.В., Алеев А.А.* // *Ядерная физика и инжиниринг.* 2017. Т. 8. № 2. С. 138–140.
 11. *Лукьянчук А.А., Рогожкин С.В., Разницын О.А., Шутов А.С., Алеев А.А.* // *Ядерная физика и инжиниринг.* 2017. Т. 8. № 2. С. 150–152.
 12. *Шутов А.С., Лукьянчук А.А., Рогожкин С.В., Разницын О.А., Искандаров Н.А., Алеев А.А.* // *Ядерная физика и инжиниринг.* 2017. Т. 8. № 2. С. 141–144.
 13. *Алеев А.А., Рогожкин С.В., Лукьянчук А.А., Шутов А.С., Разницын О.А., Никитин А.А., Искандаров Н.А., Корчуганова О.А., Кириллов С.Е.* Программный комплекс по восстановлению, обработке и анализу томографических атомно-зондовых данных “КВАНТМ-3D” V1.0.0. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018661876, рег. 20.09.2018.
 14. *Porollo S.I., Dvoriashin A.M., Konobeev Yu.V., Garner F.A.* // *J. Nucl. Mater.* 2004. V. 329–333. P. 314–318.
 15. *Belov N.A., Akopyan T.K., Korotkova N.O., Shurkin P.K., Timofeev V.N., Raznitsyn O.A., Sviridova T.A.* // *J. Alloys Compd.* 2022. V. 891. P. 161948. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161948>
 16. *Belov N.A., Akopyan T.K., Korotkova N.O., Timofeev V.N., Shurkin P.K.* // *Mater. Lett.* 2021. V. 300. P. 130199.
 17. *Danoix F., Grancher G., Bostel A., Blavette D.* // *Ultramicroscopy.* 2007. V. 107 (9). P. 734–738.
 18. *Danoix F., Grancher G., Bostel A., Blavette D.* // *Ultramicroscopy.* 2007. V. 107 (9). P. 739–743.
 19. *Tang F., Gault B., Ringer S.P., Cairney J.M.* // *Ultramicroscopy.* 2010. V. 110 (7). P. 836–843.
 20. *Geuser F.D., Gault B., Bostel A., Vurpillot F.* // *Surf. Sci.* 2007. V. 601 (2). P. 536–543.
 21. *Bas P., Bostel A., Deconihout B., Blavette D.* // *Appl. Surf. Sci.* 1995. V. 87–88. P. 298–304.
 22. *Hellman O., Vandenbroucke J., Rusing J., Isheim D., Seidman D.* // *Microsc. Microanal.* 2000. V. 6 (5). P. 437–444.

Influence of Type and Configuration of the Atom Probe Tomography Setup with Laser Evaporation on the Data Reconstruction Accuracy

A. A. Lukyanchuk^{1, 2, *}, O. A. Raznitsyn^{1, 2}, A. S. Shutov^{1, 2}, A. A. Aleev^{1, 2},
A. V. Klauz^{1, 2}, N. A. Butov¹, B. V. Rudskoy¹, and S. V. Rogozhkin^{1, 2}

¹National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, 123182 Russia

²National Research Nuclear University MPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

*e-mail: anton.lukyanchuk@itep.ru

Received October 13, 2021; revised October 14, 2021; accepted October 15, 2021

Abstract—Atom probe tomography (APT) is a tool for detailed chemical composition analysis of advanced structural material nanostructure. The use of different Atomic Probe Tomography (APT) devices requires a certification of these setups prior to conducting research. In this paper a method of comparing APT setups in order to evaluate the influence of the overall system configuration on the accuracy of obtained data is proposed. The collected data comparison is presented for the aluminum alloy Al–3.3Cu–2.5Mn–0.5Zr and structural steel 16Kh12MVSFBR gathered on the APPLE-3D (“PAZL-3D”) setup and on the new ATLAS (“ATLAZ”) unit, created through upgrading the ECOTAP. Comparison of the results confirms the feasibility of carrying out research of the same material on similar setups without significant distortion of the data under its analysis and interpretation.

Keywords: microscopy, atomic probe tomography, aluminum alloys, nanostructure, atom maps