

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ КИСЛОРОДА НА ЭВОЛЮЦИЮ МИКРОСТРУКТУРЫ СПЛАВА Zr1%Nb ПРИ ИОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

*О.В. Бородин, В.В. Брык, Р.Л. Василенко, В.Н. Воеводин,
И.А. Петельгузов, Н.Д. Рыбальченко*

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
г. Харьков, Украина; E-mail: r.vasilenko@kipt.kharkov.ua*

Методами просвечивающей электронной микроскопии исследовано влияние облучения тяжелыми ионами Zr^{6+} на параметры дислокационных петель в сплаве Zr1%Nb с содержанием кислорода 0,08 и 0,14 мас. %. Облучение производилось ионами Zr^{6+} (ускоритель ЭСУВИ), с энергией 1,8 МэВ, при температуре $T=550$ °С. Получены зависимости плотности и размера дислокаций от содержания кислорода и дозы облучения.

ВВЕДЕНИЕ

Зарождение, рост и взаимодействие дислокационных петель – одна из основных составляющих эволюции дислокационной структуры, они контролируют изменение физических и механических свойств под облучением и, более того, лежат в основе некоторых явлений: радиационного упрочнения и охрупчивания, радиационного роста. Влияние кислорода на эти процессы изучено до сих пор слабо. Кислород может поступать в сплав из следующих источников:

- присутствовать в цирконии в виде примесей;
- введением в цирконий и его сплавы для придания им особых свойств (обычно с целью повышения сопротивления ползучести и увеличения прочности);

- накапливается при эксплуатации из-за насыщения циркониевых элементов конструкции активных зон ядерных реакторов (АЗ), в частности, материала оболочек твэлов как со стороны теплоносителя, так и со стороны топлива.

Кроме того, окисление и насыщение оболочек твэлов кислородом относится к основным процессам, происходящим при перегреве топлива (например, при потере теплоносителя) [1].

Применяемый в настоящее время в твэлах реактора ВВЭР-1000 сплав Э110 содержит в (0,08±0,02)%. В сплавах американского производства типа циркалой-4 содержится, наряду с легирующими добавками, примесь кислорода в количестве 0,14 мас.%, содержание которой

определяется технологией изготовления исходного циркония магнитермическим методом его получения.

В последнее время примесь кислорода используется как легирующая добавка. Так, в реакторах Франции широко применяется сплав М5-тм, который содержит 1% мас. Nb+0,16% кислорода. Примесь кислорода в количестве до 0, 14...0,16 % используется в конструировании сплавов в Японии и др. странах.

В настоящее время Украина обладает кальций-термической технологией получения циркония. Для данной технологии характерно повышенное содержание кислорода в получаемом металле (в пределах 0,1...0,19 мас. %), что делает задачу исследования радиационного поведения циркониевых сплавов с таким содержанием кислорода весьма актуальной.

ИССЛЕДУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследовались три сплава Zr1%Nb с различным содержанием кислорода, а именно:

1 – 0,08 мас.% – штатный сплав Э110

2 – 0,14 мас.% – сплав получен из штатного путем насыщения кислородом из газовой фазы

3 – 0,14 мас.% – сплав получен по кальцийтермической технологии (КТЦ).

Параметры финальной термообработки использованных сплавов приведены в табл. 1.

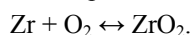
Таблица 1

Содержание кислорода и режим финальной термообработки исследуемых сплавов

Сплав	Содержание кислорода, мас. %	Метод получения	Термообработка
Э110	0,08	промышленный	580 °С, 3ч
Zr1%Nb	0,14	лабораторный	Окисление 42 мин, отжиг 960 °С, 24 ч
Zr1%Nb (КТЦ)	0,14	промышленный	580 °С, 3 ч

Для получения сплавов с заданным содержанием кислорода был применен метод дозированного окисления поверхности образцов с последующим отжигом в высоком вакууме для растворения кислорода внутри образца. Подобранные соответствующие режимы отжигов можно получить заданное содержание примеси кислорода с равномерным его содержанием по объёму образца.

Предлагаемый способ получения сплава с заданным содержанием кислорода основывается на свойстве циркония и его сплавов к окислению в кислороде с образованием однородного практически стехиометрического оксида по реакции



Кислород способен к интенсивному растворению в цирконии или его сплавах, которое происходит уже при 600 °С и усиливается с повышением температуры отжига. Растворение кислорода в металле может происходить как непосредственно из газовой фазы, так и путём раскисления оксида вследствие высокой теплоты растворения кислорода в цирконии.

Подбором параметров отжига можно перевести весь кислород из оксидной плёнки в металл или сплав. Для получения сплавов с повышенным содержанием примесей кислорода был использован штатный сплав Э110 в виде твэльных труб Ø 9,1 мм.

Образцы для насыщения кислородом готовились следующим образом. Из труб вырезались патрубки длиной 30...40 мм. Патрубки разрезали по образующей на две половинки, которые разгибали и выпрямляли. После шлифовки и промывки поверхности образцов в спирте с целью снятия налёпа образцы отжигали в вакууме $2 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. при температуре 580 °С в течение 1 ч.

После такого отжига образцы-пластины, протравливали в растворе, содержащем фтористоводородную кислоту (5 объёмн. %), азотную кислоту (45 объёмн. %) и дистиллированную воду (остальное). Задача травления поверхности – снятие с поверхности слоя металла толщиной 10...15 мкм и создание однородного состояния поверхности у всех исследуемых образцов.

Далее образцы выдерживались в кислороде при разных температурах для поверхностного окисления. Путём периодического взвешивания подбирались такие привесы, при которых бы после стабилизирующего отжига получался сплав, содержащий 0,14 и 0,2% кислорода.

Последующая операция – вакуумный отжиг в контейнерах из циркониевого сплава (для уменьшения попадания на поверхность паров масла из диффузионного насоса).

Установка для проведения окисления поверхности и последующего отжига для насыщения исследуемых образцов-пластин заданными количествами кислорода показана на рис. 1.

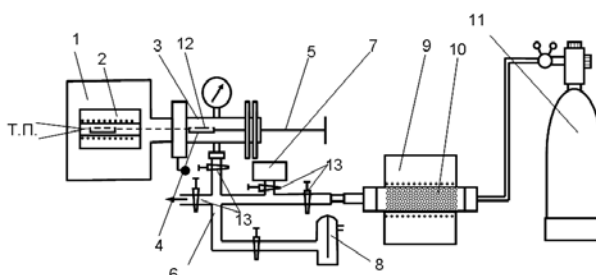


Рис. 1. Схема установки для окисления и насыщения образцов кислородом

Установка состоит из вакуумной камеры (1) с печью отжига, окисления и насыщения (2), форвакуумной камеры (3), штока для помещения образцов в печь (5) с держателем образца (4), системы откачки-напуска газа (6), накопителя газа (7), индикатора потока газа (8), печи (9) с размещенной в ней кварцевой трубкой, наполненной медной стружкой (10), баллона с газом O_2 (11).

Процесс насыщения поверхности образцов кислородом путем окисления и диффузии выполнялся в такой последовательности: проводилась откачка вакуумной камеры до разрежения $2 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст., разогрев печи до температуры 600 °С, присоединение штока с образцом к форкамере, откачка и соединение ее с вакуумной камерой (1), напуск кислорода в вакуумную камеру до давления 160 мм рт. ст. Далее следовало перемещение штока с образцом в печь и выдержка в печи отжига в течение заданного времени, производилось периодическое извлечение образца для взвешивания на микроаналитических весах ВЛР-20 и расчётным путём определяли количества поглощенного кислорода расчётным путём.

На рис. 2 приведены кинетические кривые процесса окисления сплава Э110 в кислороде при разных температурах

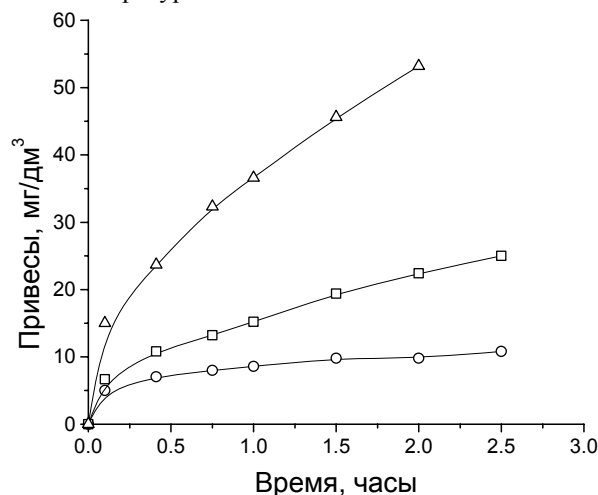


Рис. 2. Кинетика окисления образцов сплава $\text{Zr}1\%\text{Nb}$ (Э110) в кислороде при температурах 500 (○), 550 (□) и 600 °С (△) при давлении 160 мм рт. ст.

Из данных привесов на кривых окисления можно выбрать то время выдержки, которое необходимо для образования оксидной плёнки, содержащей

кислород, который если растворится в сплаве подложки и распределится достаточно равномерно, то концентрация его составит в сплаве 0,14 или 0,20 мас. %. Ввиду того, что окисление проводили в чистом кислороде, то весь измеряемый привес это и есть то количество кислорода, которое вошло в состав оксидной плёнки. После достаточно длительного отжига (в нашем случае до 24 ч и больше) и вследствие высокой теплоты растворения кислород уходит из состава оксида, цирконий присоединяется к матричной решётке, а оксидные плёнки полностью исчезают, что и наблюдали в экспериментах.

Расчёты проводили по формуле

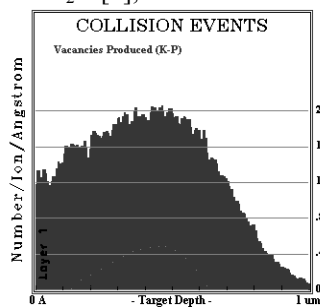
$$(\Delta M/S) \cdot M \cdot S \cdot 100 = N \%, \quad (1)$$

где $(\Delta M/S)$ – привес, взятый из графиков на рис. 2; M – масса образца; S – площадь всего образца и N – массовый процент поглощения кислорода.

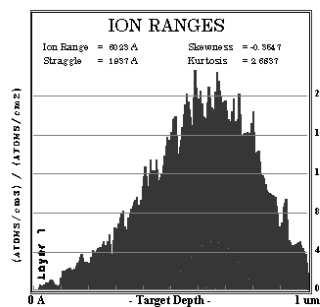
В предположении, что кислород распределится равномерно, это число и будет концентрацией кислорода в сплаве. Растворение плёнок и равномерное распределение кислорода в образце достигается длительным отжигом в вакууме при высоких температурах. Условия отжига определяются расчётным путём и уточняются экспериментально. Оптимальным является отжиг при температуре 960 °С в течение 24 ч.

Для облучения и последующего исследования методом просвечивающей электронной микроскопии была использована следующая методика подготовки образцов:

1) химическое утонение исследуемого материала до толщины 0,1 мм в растворе состава: 10 %HF, 45%HNO₃, 45%H₂O [2];



а



б

Рис. 3. Профили повреждения (а) и залегания имплантированных ионов (б)

РЕЗУЛЬТАТЫ

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ИСХОДНЫХ ОБРАЗЦОВ

Ниже приведены результаты металлографических исследований и измерения микротвердости исследуемых материалов, полученных как путем насыщения из газовой фазы, так и промышленным путем. Структура штатного сплава Э110 (содержание кислорода 0,08 мас. %) показана на рис. 4. Структура сплава является стабилизированной с равномерными углами разориентации. Размеры зерен у сплава, определённые методом секущей, составили 7...8 мкм.

- 2) вырубка стандартных 3мм дисков;
- 3) односторонняя струйная электрополировка, до образования лунки глубиной порядка 50 мкм;
- 4) облучение;
- 5) снятие поверхностного слоя толщиной 0,1мкм с облученной стороны образца методом струйной электрополировки [3];
- 5) утонение образца методом струйной электрополировки со стороны, не подвергнутой облучению.

Электронно-микроскопическое исследование образцов производилось на электронном микроскопе JEM-100CX.

Облучение производилось на электростатическом ускорителе тяжелых ионов с внешним инжектором ЭСУВИ ионами Zr⁶⁺ с энергией 1,8 МэВ, плотность тока 4 мкА/см², температура 550 °С. Данные параметры облучения были выбраны для обеспечения скорости создания повреждений, равной 10⁻²сна/с. Предварительное моделирование облучения было проведено при помощи программы SRIM-2003, профили повреждения и залегания приведены на рис. 3. На основании этих профилей были рассчитаны параметры облучения, осуществлен выбор зоны исследования, в которой, с одной стороны, высока повреждающая доза, а с другой, – мало количество имплантированных атомов. Область, отвечающая вышеперечисленным требованиям, находится на глубине 0,1...0,15 мкм от поверхности образца.

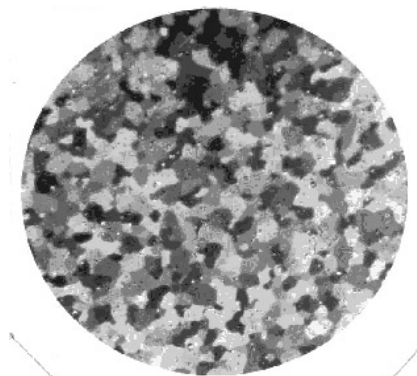


Рис. 4. Металлографическая структура штатного сплава Э110. Увеличение 500. Съёмка в поляризованном свете

Микроструктура сплава Э110 с содержанием кислорода 0,08% показана на рис. 5. Плотность дислокаций незначительна. Выделения вторых фаз были идентифицированы методом электронографического анализа как β -ниобий. Выделений другого типа не обнаружено. Выделения расположены равномерно по телу зерна, скоплений у границ не наблюдается. Средний размер выделений равен 50,7 нм.

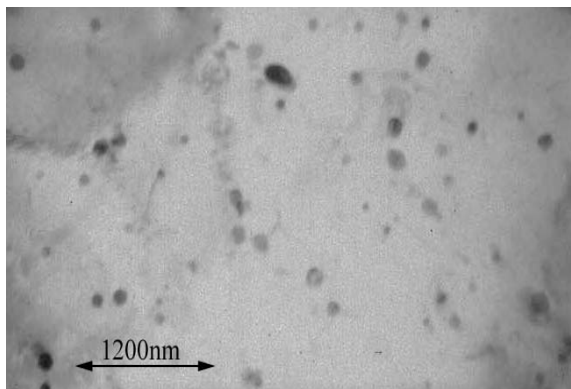


Рис. 5. Микроструктура сплава Э110 с содержанием кислорода 0,08 мас. %

Микроструктура сплава Zr1%Nb с содержанием кислорода 0,14 % показана на рис. 6. Плотность дислокаций незначительна. Выделения вторых фаз были идентифицированы методом электронографического анализа как β -ниобий. Выделений другого типа не обнаружено. Выделения имеют вытянутую форму, размеры выделений лежат в пределах 20...55 нм по ширине и 150...380 нм по длине.

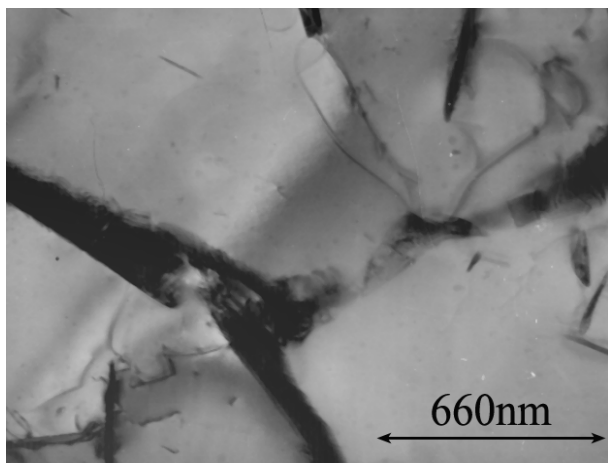


Рис. 6. Микроструктура сплава Э110 с содержанием кислорода 0,14 мас. %

Микроструктура сплава Zr1%Nb с содержанием кислорода 0,19 % показана на рис. 7.

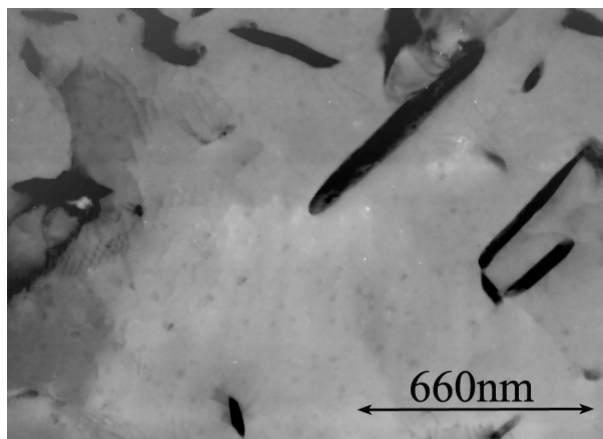


Рис. 7. Микроструктура сплава Э110 с содержанием кислорода 0,19 мас. %

Плотность дислокаций незначительна. Выделения вторых фаз были идентифицированы методом электронографического анализа как β -ниобий. Выделений другого типа не обнаружено. Выделения имеют вытянутую форму, размеры выделений лежат в пределах 40...60 нм по ширине и 150...740 нм по длине.

Структура сплава Zr1%Nb с содержанием кислорода 0,14 %, полученного промышленным методом, приведена на рис. 8 и имеет вид, характерный для полностью рекристаллизованного материала; средний размер зерна равен 6,3 мкм.

Микроструктура сплава Zr1%Nb с содержанием кислорода 0,14% показана на рис. 9. Плотность дислокаций незначительна. Выделения вторых фаз были идентифицированы как β -ниобий. Выделений другого типа не обнаружено. Выделения имеют округлую форму, средний размер равен 65 нм. Данные выделения образуют скопления – строчки, размеры которых составляют порядка 1,8 мкм по длине и 0,25 мкм по ширине.

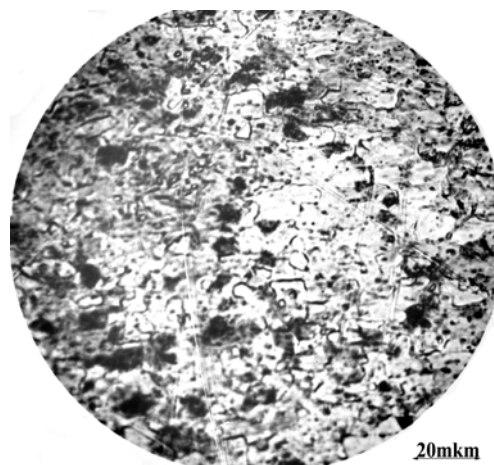


Рис. 8. Структура сплава Zr1%Nb с содержанием кислорода 0,14 мас. %

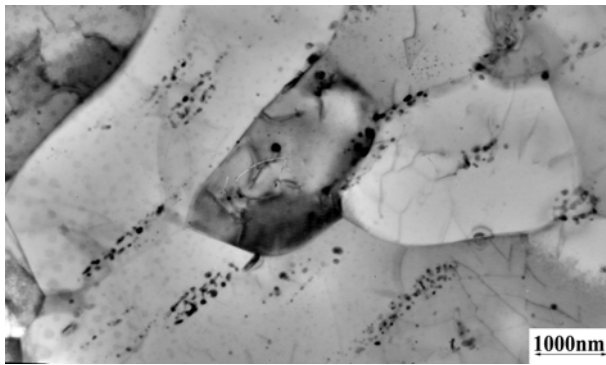


Рис. 9. Микроструктура сплава Zr1%Nb, полученного промышленным методом, с содержанием кислорода 0,14 мас. %

Структура сплава Zr1%Nb с содержанием кислорода 0,19 %, полученного промышленным методом приведена на рис. 10. Она состоит из вытянутых зерен, со следами зарождения новых зерен, что свидетельствует о неполной рекристаллизации материала. Длина зерен порядка 30 мкм, ширина – 4 мкм.

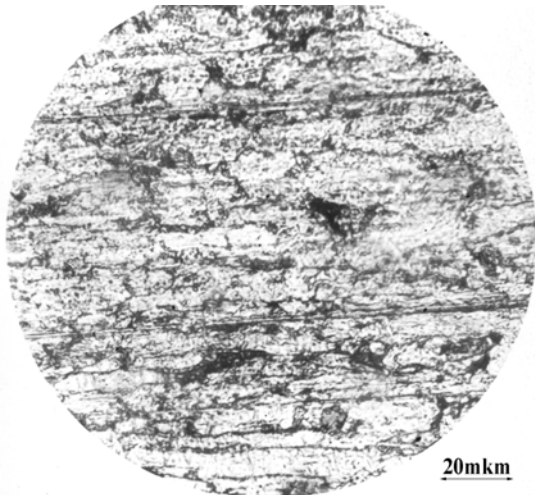


Рис. 10. Структура сплава Zr1%Nb с содержанием кислорода 0,19 мас. %

Микроструктура сплава Zr1%Nb с содержанием кислорода 0,19 мас. % показана на рис. 11. Плотность дислокаций незначительна. Выделения вторых фаз были идентифицированы как β -ниобий. Выделений другого типа не обнаружено. Выделения имеют округлую форму, средний размер равен 80 нм. Данные выделения образуют скопления – строчки, размеры которых составляют порядка 2,3 мкм по длине и 0,3 мкм по ширине.

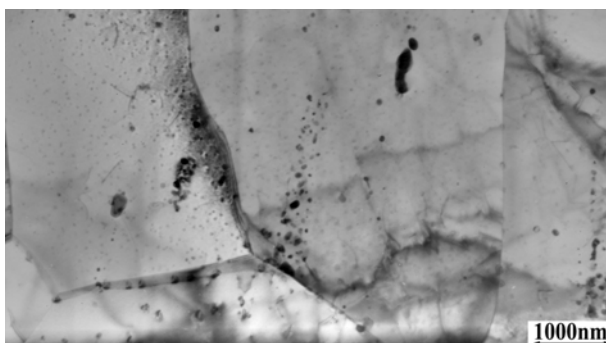


Рис. 11. Микроструктура сплава Zr1%Nb, полученного промышленным методом с содержанием кислорода: 0,19%

ИЗМЕРЕНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ ИССЛЕДУЕМЫХ СПЛАВОВ

С целью определения изменения микротвёрдости после диффузионного насыщения кислородом измерения микротвёрдости были проведены вдоль сечения всего образца по толщине.

Измерения микротвёрдости показали, что после отжига окисленных до расчётных концентраций 0,14 и 0,19 мас. % образцов при 960 °С в течение 24 ч устанавливается достаточно равномерное распределение отпечатков интандера прибора ПМТ-3. Средние значения в центральной части образцов составили 251,2 кг/мм² (2461,7 МПа) для сплава с 0,14 мас. % и 266,7 кг/мм² (2452,7 МПа) для сплава с 0,20 %. Значения микротвёрдости исследуемых сплавов приведены на рис. 12.

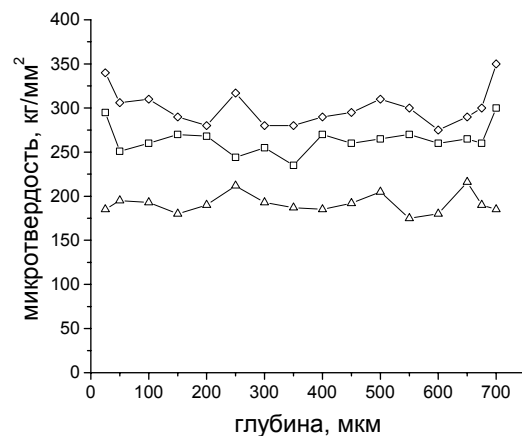


Рис. 12. Распределение микротвёрдости по толщине образца величины в сплаве Э110 в зависимости от содержания кислорода (Δ) 0,08, (\square) 0,14, (\diamond) 0,19 мас. %

Разброс значений микротвёрдости вдоль трассы измерений достигает 20 %, хотя ошибка измерений микротвёрдости не превышает 5 %. Такой разброс мы связываем с ориентацией плоскостей кристаллических зёрен, выходящих на поверхность шлифа. Этот вопрос подлежит дальнейшему исследованию и уточнению.

Необходимо привести для ориентировки данные по микротвёрдости оболочки из сплава Э110 в исходном состоянии, т.е. в состоянии поставки. Она находится в интервале 126,0...136, 2 кг/мм². (Сравним микротвёрдость полученного по КТЦ сплава Zr1%Nb в исходном состоянии поставки из ГТИ (г. Днепропетровск): для плавки 797 $H_{\mu} = 199,1$ кг/мм², для плавки сплава 906 $H_{\mu} = 193,3$ кг/мм²). Таким образом микротвёрдость сплавов типа КТЦ с одинаковым содержанием ниобия выше в среднем на 66 кг/мм². У нас получается следующая картина: для нашего насыщенного сплава до 0,14 мас. % микротвёрдость в среднем 260 кг/мм², значит

разница с H_{μ} (КТЦ) и H_{μ} (Э110) ~ 64 кг/мм². Значения микротвёрдости получаются близкими по величине при насыщении кислородом как искусственным методом доокисления, так и путём металлургического получения сплава с кислородом.

Для сплавов, полученных промышленным путем, зависимость микротвёрдости исследуемого материала от содержания кислорода приведена на рис. 13.

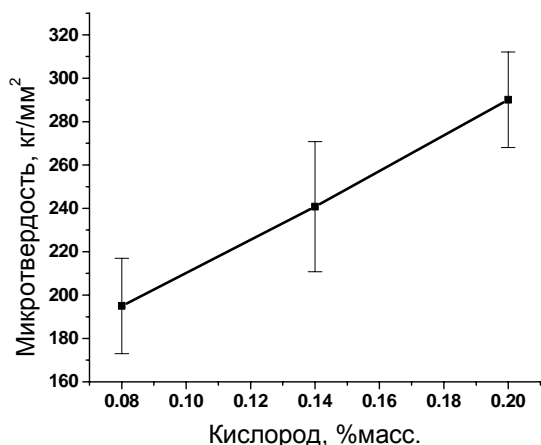


Рис. 13. Зависимость микротвёрдости сплава Zr1%Nb от содержания кислорода

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ СПЛАВА Zr1%Nb С 0,08 МАС.% КИСЛОРОДА

С целью исследования влияния дозы облучения на эволюцию структуры образцы штатного сплава были облучены тяжелыми ионами Zr⁶⁺ до доз 1, 5, 10 и 15 сна при температуре 550 °С. Микроструктура сплава после этого облучения приведена на рис. 14.

Обнаружено, что дислокационные петли в этих условиях имеют эллиптическую форму. При этом начиная с 5 сна петли взаимодействуют между собой, образуя элементы дислокационной сетки. До доз 10 сна наблюдаются только петли <a>-типа, а при дозе 15 сна наряду с ними обнаружены петли <c>-типа (см. рис. 14,г) [4]. Данные о зависимости размеров этих петель от дозы облучения приведены в табл. 2 и на рис. 15.

Из табл. 2 видно, что размер петель растет с дозой повреждения, причем скорость роста петель падает с увеличением дозы (тенденция к насыщению). Вероятно, это происходит из-за того, что крупные петли участвуют в образовании дислокационной сетки, а вновь зарождающиеся дислокационные петли вносят свой заметный вклад в уменьшение скорости среднего радиуса пор при росте дозы.

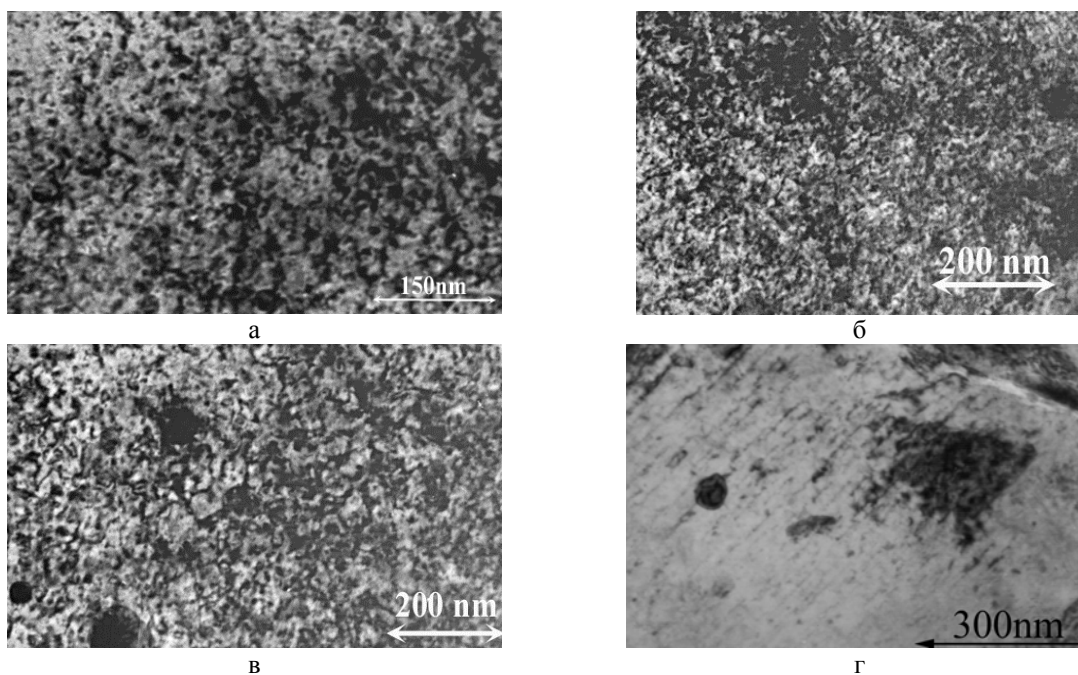


Рис. 14. Микроструктура сплава Э110 с содержанием кислорода 0,08 мас.%. а – 5 сна; б – 10 сна; в, г – 15 сна

Таблица 2

Зависимость параметров дислокационных петель от дозы в сплаве Zr1%Nb с 0,08 мас.% кислорода

Доза, сна	5	10	15
Плотность петель, см ⁻²	$1,06 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$	10^{11} см^{-2}	<a> - $1,1 \cdot 10^{11}$ <c> - $8 \cdot 10^{10}$
Диаметр дислокационных петель, нм	<a>-петли ~19,63 нм	<a>-петли ~23,4 нм	<a>-петли ~24,1 нм; <c>-дислокации ~48,3 нм

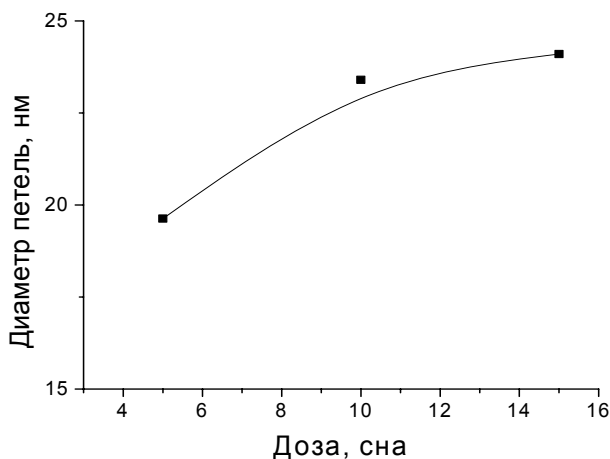


Рис. 15. Зависимость среднего диаметра петель от дозы облучения в сплаве Э110 с содержанием кислорода 0,08 мас. %

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ СПЛАВА Zr1%Nb С 0,14 МАС.% КИСЛОРОДА

Было произведено облучение доз 5, 10 и 15 сн при температуре 550 °С. Микроструктура сплава после этого облучения приведена на рис. 16. Наблюдаемая эволюция идентична наблюдаемой в сплаве с содержанием кислорода 0,08%. Петли имеют эллиптическую форму. При этом начиная с 5 сн петли взаимодействуют между собой, образуя элементы дислокационной сетки. До доз 10 сн наблюдаются только петли <a>-типа, а при дозе 15 сн наряду с ними обнаружены петли <c>-типа (см. рис. 16,г). Однако размеры этих петель меньше, чем в сплаве с более низким содержанием кислорода. Данные о зависимости размеров петель от дозы облучения приведены в табл. 3 и на рис. 17.

Таблица 3

Зависимость параметров дислокационных петель от дозы в сплаве Zr-1%Nb с 0,14% кислорода

Доза, сн	5сн	10 сн	15сн
Плотность петель, см ⁻²	$1,1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$	<a> - $1,3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ <c> - $5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$
Диаметр дислокационных петель нм	<a>-петли ~18,85 нм	<a>- петли ~20,5 нм	<a-петли> ~20 нм; <c>-дислокации ~41,6 нм

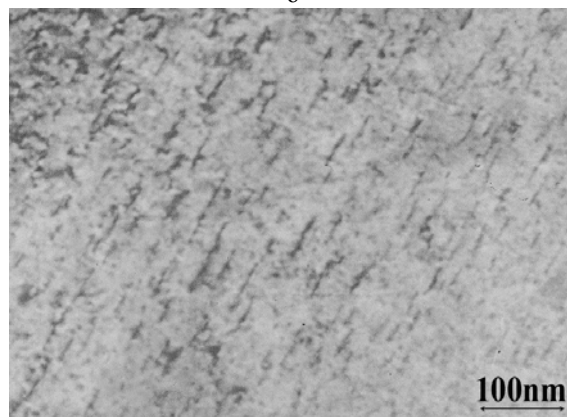
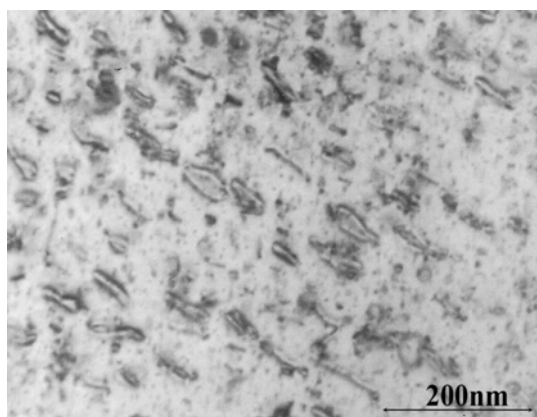
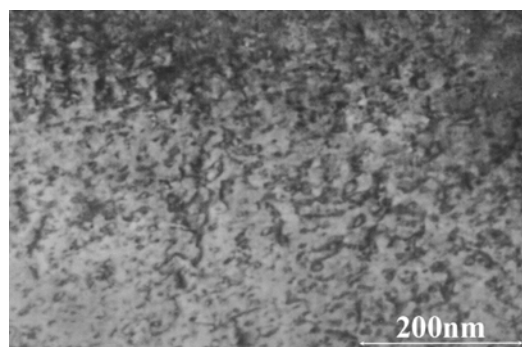
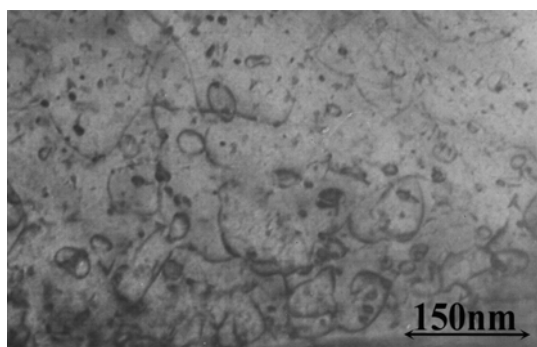


Рис. 16. Микроструктура сплава Э110 с содержанием кислорода 0,14 мас. %:
а – 5 сн; б – 10 сн; в, г – 15 сн

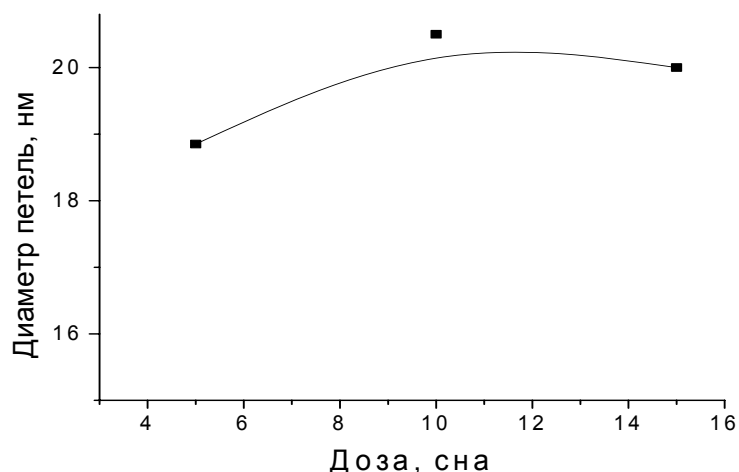


Рис. 17. Зависимость среднего диаметра петель от дозы облучения в сплаве Э110 с содержанием кислорода 0,14 мас. %

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ СПЛАВА Zr1%Nb С 0,14 МАС.% КИСЛОРОДА, ПОЛУЧЕННОГО ПРОМЫШЛЕННЫМ МЕТОДОМ

Было произведено облучение доз 1, 10 и 15 сна при температуре 550 °С. Данная микроструктура сплава после облучения приведена на рис. 18.

При дозе 1 сна наблюдаются только мелкие петли имеющие эллиптическую округлую форму (см. рис. 18,а,б). При дозе 10 сна наблюдаются

только петли, имеющие эллиптическую округлую форму (см. рис. 18,в,г), идентифицированные как петли <a>-типа. При этом петли начинают взаимодействовать между собой, образуя элементы дислокационной сетки. При дозе 15 сна наряду с петлями <a>-типа обнаружены петли <c>-типа (см. рис. 18,е).

Данные о зависимости параметров петель от дозы облучения приведены в табл. 4 и на рис. 19.

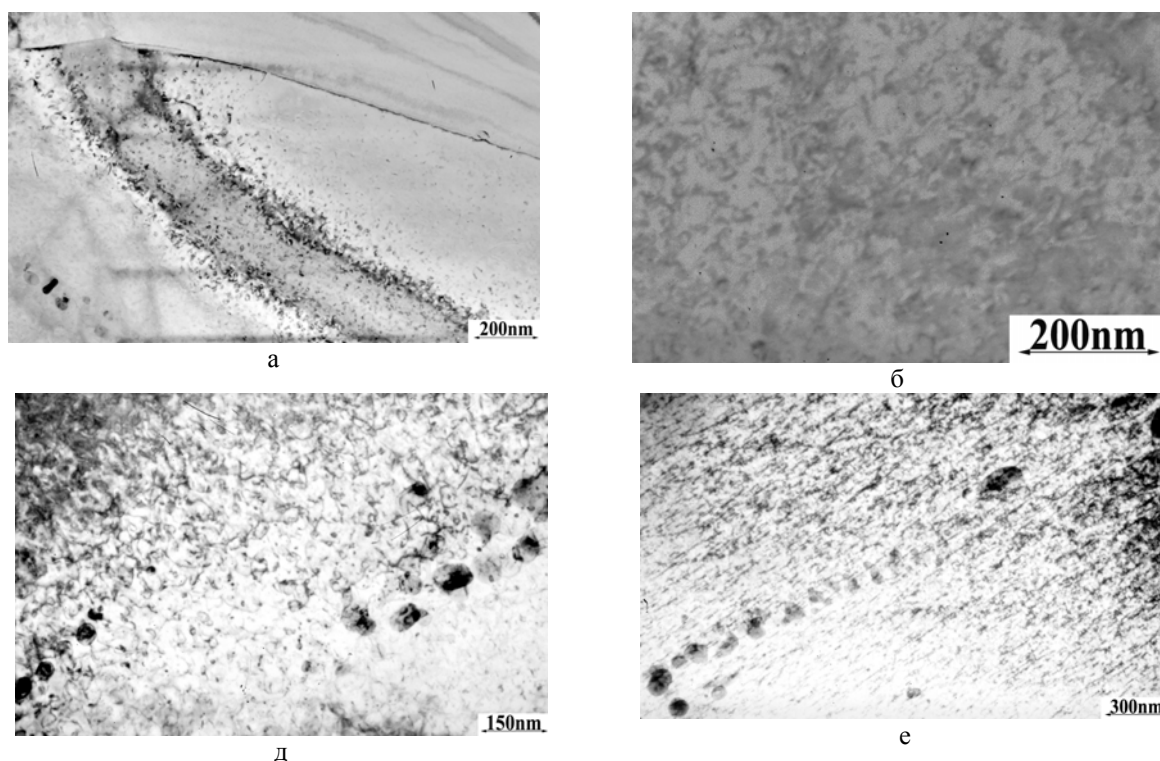


Рис. 18. Микроструктура сплава Э110 с содержанием кислорода 0,14 мас. %: а – 1 сна; б – 10 сна; д, е – 15 сна

Таблица 4

Зависимость параметров дислокационных петель от дозы в сплаве Zr1%Nb с 0,14 мас. % кислорода

Доза, сна	1 сна	10 сна	15 сна
Плотность петель, см ⁻²	3·10 ¹⁰ см ⁻²	4·10 ¹⁰ см ⁻²	5·10 ¹⁰ см ⁻²

диаметр дислокационных петель нм	а-петли ~15 нм	а-петли ~24 нм	а-петли ~25 нм; с-дислокации ~71 нм
-------------------------------------	-------------------	----------------	--

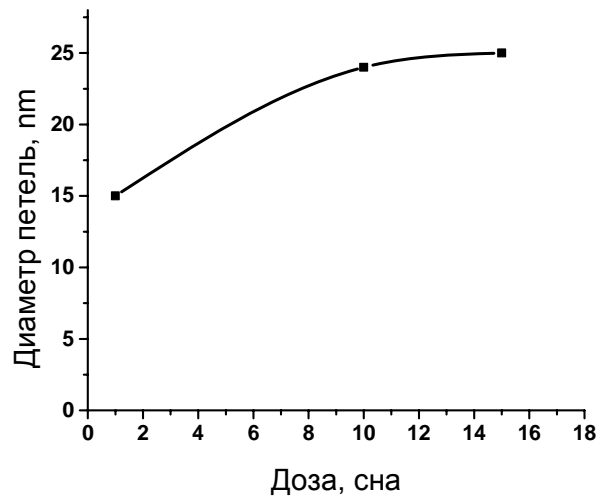


Рис. 19. Зависимость среднего диаметра петель от дозы облучения в сплаве Zr1%Nb с содержанием кислорода 0,14 мас.%

ВЫВОДЫ

Отработаны методики получения сплавов циркония с повышенным содержанием кислорода путем насыщения из газовой фазы, а также препарирования и облучения образцов на ускорителе тяжелых ионов ЭСУВИ.

Показано, что

– введение кислорода как из газовой фазы, так и при кальцийтермической технологии приводит к одинаковой эволюции радиационных дефектов; при увеличении дозы облучения эллиптические дислокационные петли <a>-типа растут до 15 сна;

– наблюдается тенденция к насыщению; при дозе выше 5 сна дислокационные петли взаимодействуют, образуя элементы дислокационной сетки; при дозе ~15 сна наблюдается образование дислокационных петель <c>-типа. Их размер снижается при увеличении содержания кислорода;

– с увеличением концентрации кислорода размер петель слабо снижается в исследованных условиях

облучения. Вероятно, это связано с достаточно высокой температурой облучения (550 °С).

Выражаем благодарность В.С. Вахрушевой за предоставленные сплавы циркония, произведенные по кальцийтермической технологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Т.П. Черняева, А.И. Стукалов, В.М. Грицына. *Кислород в цирконии* /Обзор по материалам отечественной и зарубежной печати за 1955-1999 г.г. Харьков 1999, с. 3
2. Л.В. Баранова, Э.Л. Демина. *Металлографическое травление металлов и сплавов*. М.: «Металлургия», 1986.
3. К.С. Thompson-Russell, J.W. Edington. *Electron Microscope specimen preparation techniques in materials science*. Philips 1977, p. 4–6.
4. M. Griffith. Evolution of microstructure in hcp metals during irradiation // *Journal of Nuclear Materials*. 1993, v. 205, p. 225–241.

ВЛИВ ВМІСТУ КИСНЮ НА ЕВОЛЮЦІЮ МІКРОСТРУКТУРИ СПЛАВУ Zr1%Nb ПРИ ІОННОМУ ОПРОМІНЕННІ

О.В. Бородин, В.В. Брик, Р.Л. Василенко, В.М. Воєводін, І.А. Петельгузов, Н.Д.Рибальченко

Методами просвічуючої електронної мікроскопії досліджений вплив опромінення важкими іонами Zr⁶⁺ на параметри дислокаційних петель у сплаві Zr1%Nb зі змістом кисню 0,08 та 0,14 мас.%. Опромінення виконувалось іонами Zr⁶⁺ (прискорювач ЕСУВИ), з енергією 1,8 МеВ, при температурі T=550 °С. Отримано залежності щільності й розміру дислокацій від вмісту кисню й дози опромінення.

INFLUENCE OF OXYGEN CONTENT ON EVOLUTION OF THE STRUCTURE OF ALLOY Zr1%Nb UNDER ION IRRADIATION

O.V. Borodin, V.V. Bryk, R.L. Vasilenko, V.N. Voyevodin, I.A. Petelguzov, N.D. Rybalchenko

Influence of heavy ions Zr⁶⁺ irradiation on parameters of dislocation loops in alloy Zr1%Nb with oxygen content 0.08, 0.14 % is studied by methods of transmission electron microscopy. Irradiation was carried out by Zr⁶⁺ ions (accelerator ESUVI) with energy 1.8 MeV, at temperature T=550 °C. Dependence of density and size of dislocations on oxygen content and on irradiation dose are obtained.