

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В СПЛАВАХ  
ВОЛЬФРАМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ  
SIMULATION OF RADIATION DRIVEN PROCESSES IN TUNGSTEN ALLOYS USING  
ION IRRADIATION

А.А. Никитин<sup>1,2</sup>, С.В. Рогожкин<sup>1,2</sup>, Н.П.Бобырь<sup>1</sup>, П.А. Федин<sup>1</sup>, О.В. Огородникова<sup>2</sup>,  
A.A. Nikitin<sup>1,2</sup>, S.V. Rogozhkin<sup>1,2</sup>, N.P. Bobyr<sup>1</sup>, P.A. Fedin<sup>1</sup>, O.V. Ogorodnikova<sup>2</sup>

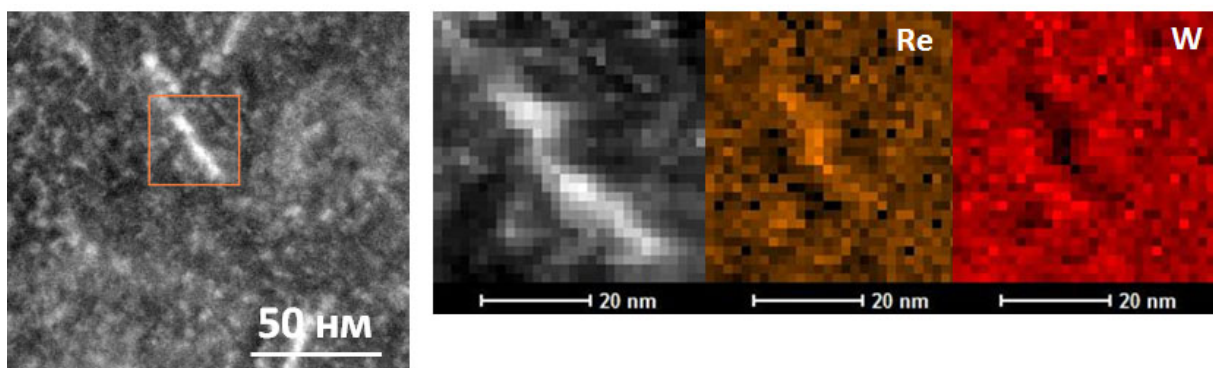
<sup>1</sup>*Национальный Исследовательский Центр "Курчатовский Институт", пл. Академика  
Курчатова, д. 1, Москва, Россия, [nikitin@itep.ru](mailto:nikitin@itep.ru)*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Каширское ш., 31,  
Москва, Россия*

In this work, a comprehensive study of a W-6Re and W-10Cr alloys after accelerated irradiation with ions to a damage dose of 10 displacements per atom at temperatures of 300 and 500 °C was carried out. A detailed chemical analysis of radiation induced defects acquired by means of transmission electron microscopy and atom probe tomography. It is shown that, as a result of irradiation, nanosclae clusters enriched in rhenium and chromium are formed. In addition, a high density (of the order of  $10^{24} \text{ m}^{-3}$ ) of clusters of point defects was found in the area of material damage.

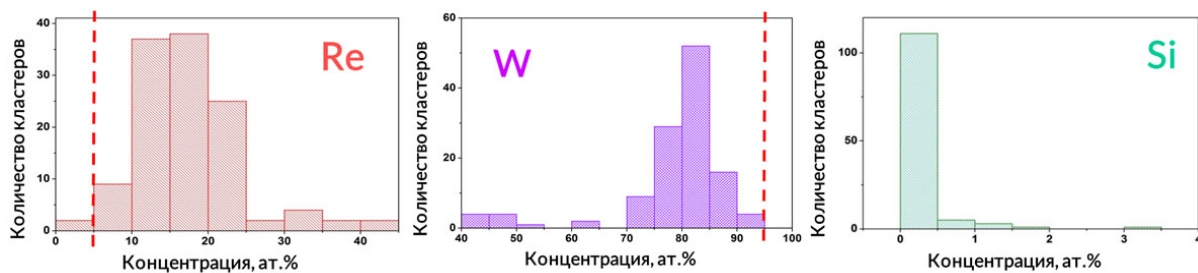
Вольфрам и его сплавы являются основными кандидатными материалами для частей термоядерного реактора, обращённых к плазме. Данный выбор обусловлен высокой температурой плавления, теплопроводностью и коррозионной стойкостью материала, а также стойкостью к распылению при взаимодействии с плазмой. На данный момент планируется использование вольфрама в конструкциях активной зоны термоядерных реакторов ITER (крупнейший строящийся исследовательский реактор) и DEMO (первый энергетический демонстрационный реактор) [1-3]. В условиях работы реактора вольфрам и его сплавы должны выдерживать огромные механические нагрузки, одновременно подвергаясь интенсивному воздействию радиационных потоков [6], при этом температура эксплуатации конструкций будет лежать в пределах 200-1000 °C. Интересной и востребованной задачей является исследование радиационной стойкости сплавов на основе вольфрама и развитие моделей радиационной деградации материалов и связи наблюдаемых радиационно-индуцированных изменений в микроструктуре с механическими свойствами. При этом радиационные эффекты в исследуемых сплавах создавались путем облучения на ионном ускорителе. Эта методика получила довольно сильное развитие в последнее время благодаря тому, что исследуемый материал облучается до высоких повреждающих доз, порядка десятков смещений на атом, за сравнительно короткое время. При этом отсутствует наведенная активность, что дает возможность для исследования образцов непосредственно сразу после облучения. Облучение

производилось в ускорительном центре НИЦ "Курчатовский институт" на тяжелоионном ускорителе ТИПр [4, 5]. Линейный ускоритель тяжелых ионов ТИПр разработан для ускорения тяжелых ионов до энергий 101 кэВ/нуклон с отношением массы к заряду до 80 [6]. Облучение производилось импульсным пучком с длительностью импульса 450 мкс при частоте повторения до 1 импульса в 2 секунды. Облучение образцов сплавов W-6Re, W-10Cr осуществлялось ионами железа и кобальта с энергиями 5.6 и 5.9 МэВ соответственно. Интегральный флюенс ионов на образце составил  $10^{16}$  см<sup>-2</sup>. Моделирование пробега ионов и потерь энергии производилось в программе SRIM 2008. Пересчет тока ионов в единицы смещений на атом осуществлялся согласно рекомендациям, указанным в работе [7]. В качестве пороговой энергии смещения атома вольфрама из кристаллической решетки бралась величина 90 эВ. Результаты анализа микроструктуры облученных сплавов показали, что основная масса дефектов залегает до глубины 1.5 мкм. Дополнительно были проанализированы профили имплантации для ионов кобальта и никеля. Детальный анализ микроструктуры проводился в зоне близкой к 700 нм. При исследовании методами просвечивающей электронной микроскопии образцы были ориентированы по направлениям типа <100> и <111>. В сплаве W-6Re в области облучения обнаружены два типа дефектов, вытянутые сегрегации и кластеры точечных дефектов с контрастом в виде «черных точек» (рис. 1).



**Рис. 1.** Изображение микроструктуры сплава W-6Re и элементная карта сегрегации рения в облученном сплаве, полученная методами просвечивающей электронной микроскопии

Анализ концентраций химических элементов в обнаруженных кластерах методами атомно-зондовой томографии показал, что кластеры обогащены рением в среднем на 18 ат.%. На аналогичную величину наблюдается обеднение кластеров по вольфраму. В некоторых кластерах обнаружено содержание атомов кремния в 3-5 раз превышающее содержание в твердом растворе.



**Рис. 2.** Химический состав кластеров рения в облученном сплаве W-6Re

В сплаве W-10Cr в области облучения обнаружена высокая объемная плотность аналогичных типов дефектов, представляющих собой «черные точки», либо дислокационные петли очень малого размера (3-5 нм). Методами атомно-зондовой томографии идентифицированы наноразмерные кластеры обогащенные атомами хрома. Средний диаметр определенных таким образом областей составил  $(1,8 \pm 0,2)$  нм. Распределение предвыделений по размеру представлено на рисунке 2. Содержание хрома в них составляет порядка 78 ат.%, а вольфрама порядка 22 ат.%. Объемная плотность кластеров составила  $5.6 \times 10^{24} \text{ м}^{-3}$ . Таким образом, в сплавах вольфрама под облучением наблюдается распад твердого раствора с выделением наноразмерных сегрегаций и структурных дефектов. Обнаруженные радиационно-индуцированные дефекты в значительной степени оказывают влияние на механические свойства сплавов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение № 075-15-2021-1352).

1. Rieth M., Dudarev S.L., Gonzalez de Vicente S.M., Aktaa J., J. Nucl. Mater. 2013. Vol. 432, № 1. P. 482–500.
2. Qi Y. Wang B., Li S., Ren X., Zhou J., Li Y., Mo J., Mater. Lett. 2019. Vol. 242. P. 115–118.
3. Sukuba I., Kaiser A., Huber S.E., Urban J., Probst M., Eur. Phys. J. D. 2016. Vol. 70, № 1. P. 11.
4. Рогожкин С.В., Никитин А.А., Хомич А.А., Ядерная физика и инжиниринг 2018. Т. 9, № 3. С. 245-258.
5. Kulevoy T., Aleev A., Ivanov S., Kozlov A., Kropachev G., Kuibeda R., Nikitin A., Rogozhkin S., Semennikov A., Sharkov B. and Zaluzhny A., Proceedings of International Topical Meeting on Nuclear Research Applications and Utilization of Accelerators. 2009. V. AP/P5 07. P.1.
6. Kashinsky D., Kolomiets A., Kulevoy T., Kuybida R., V.Kuzmichov, Minaev S., Pershin V., Sharkov B., Vengrov R., Yaramishev S. , Proceedings of EPAC. 2000. P.854.
7. R.E. Stoller, M.B. Toloczko, G.S. Was, A.G. Certain, S.D. Dwaraknath, F.A. Garner, Nucl. Instr. Methods Phys. Res. B 310 (2013) 75-80.