

UDC 621.039.553

**RADIATION DEFECT FORMATION IN BCC METALS IRRADIATED WITH HIGH ENERGY PROTONS, SELF-IONS AND NEUTRONS WITH DIFFERENT SPECTRA***(short message)*O.V. Ogorodnikova<sup>1</sup>, M. Majerle<sup>2</sup>, J. Čížek<sup>3</sup>, S. Simakov<sup>4</sup>, V.V. Gann<sup>5</sup>, P. Hruška<sup>3</sup>, J. Kameník<sup>2</sup>, J. Pospíšil<sup>6</sup>, M. Štefánek<sup>2</sup>, M. Vlnš<sup>7</sup>, J. Štursa<sup>2</sup><sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoe sh. 31, Moscow, Russia<sup>2</sup>Nuclear Physics Institute of the CAS, Řež 130, 250 68 Řež, Czech Republic<sup>3</sup>Charles University, Department of Low-temperature physics, V Holešovičkách 2, 180 00, Prague, Czech Republic<sup>4</sup>Institute for Neutron Physics and Reactor Technology, Karlsruhe Institute of Technology, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Germany<sup>5</sup>National Science Centre «Kharkov Institute of Physics and Technology», Kharkov, Ukraine<sup>6</sup>Charles University, Faculty of Mathematics and Physics, Department of Condensed Matter Physics, Ke Karlovu 5, 121 16 Prague 2, Czech Republic<sup>7</sup>Research Centre Řež, Řež 130, 250 68 Řež, Czech Republic

Currently, tungsten and tungsten coatings are the reference materials of the ITER divertor and DEMO reactors and the possibility of using low-activated ferrite-martensitic, RAFM, steels not only as structural materials, but also as the material of the first wall of the fusion reactor is considered. Also, these steels, together with a new generation of RAFM steels with oxide dispersion strengthened by adding Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles, the so-called ODS steels, are considered as promising materials for fast neutron fuel cladding. Neutron damage results in degradation of properties and activation of materials, and therefore affects performance and safety aspects. As a power fusion neutron source does not exist yet, to simulate fusion neutron-induced damage in materials, fission neutrons and charged particles are widely used. In this work, the size and density of radiation-induced defects in bcc metals (W, Mo and Fe) produced by high-energy self-ions, protons and neutrons with different spectrum have been compared by well-established method of positron-annihilation lifetime-spectroscopy (PALS). We found a formation of the larger size of the defects with lower density in the case of irradiation with high-energy neutrons from the *p* (35 MeV) — Be source compared to fission neutron- and proton- irradiations. New experimental data together with data available from the literature are compared with the dpa theory, including molecular dynamic simulations. Second, He/dpa ratios in different neutron facilities have been compared. We show that He/dpa ratios in the facilities with the hard energy spectra (fusion like) *p* (35 MeV) — Be source and DEMO are one-two orders larger than in the fission ones LVR-15, HFIR and BOR60. Methods to obtain the best approach to model fusion neutron damage and to overcome the gap between theory prediction of primary defect formation and long-term damage are discussed taking into account the uncertainties.

**Key words:** radiation-induced defects, bcc metals, high-energy neutrons and protons.

DOI: 10.21517/0202-3822-2021-44-2-167-168

**ОБРАЗОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ОЦК-МЕТАЛЛАХ, ОБЛУЧЁННЫХ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ПРОТОНАМИ, СОБСТВЕННЫМИ ИОНАМИ И НЕЙТРОНАМИ С РАЗЛИЧНЫМИ СПЕКТРАМИ***(краткое сообщение)*O.V. Ogorodnikova<sup>1</sup>, M. Майерле<sup>2</sup>, Я. Чижек<sup>3</sup>, С. Симаков<sup>4</sup>, В.В. Ганн<sup>5</sup>, П. Грушка<sup>3</sup>, Я. Каменик<sup>2</sup>, Я. Пospíšil<sup>6</sup>, М. Штефанек<sup>2</sup>, М. Влнш<sup>7</sup>, Я. Штурса<sup>2</sup><sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (Московский инженерно-физический институт), Каширское ш. 31, Москва, Россия<sup>2</sup>Институт ядерной физики Академии наук Чешской Республики, Ржеж 130, 250 68 Ржеж, Чешская Республика<sup>3</sup>Карлов Университет, Кафедра физики низких температур, В Голешиовичках 2, 180 00, Прага, Чешская Республика<sup>4</sup>Институт нейтронной физики и реакторной технологии, Технологический институт Карлсруэ, Герман-фон-Гельмгольц-Плац 1, 76344 Эггенштейн-Леопольдсхафен, Германия<sup>5</sup>Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина<sup>6</sup>Карлов Университет, Физико-математический факультет, Кафедра физики конденсированных сред, Ke Karlovu 5, 121 16 Прага 2, Чешская Республика

<sup>7</sup>Исследовательский центр Ржеж, 130, 250 68 Ржеж, Чешская Республика

В настоящее время вольфрам и вольфрамовые покрытия являются эталонными материалами диверторных и демонстрационных реакторов ИТЭР и рассматривается возможность использования низкоактивированных феррит-мартенситных, РАФМ-сталей не только в качестве конструкционных материалов, но и в качестве материала первой стенки термоядерного реактора. Кроме того, эти стали вместе с новым поколением РАФМ-сталей с оксидной дисперсией, упрочнённых добавлением наночастиц  $Y_2O_3$ , так называемых СОД-сталей, рассматриваются как перспективные материалы для оболочек твэлов на быстрых нейтронах. Нейтронное повреждение приводит к ухудшению свойств и активации материалов, а следовательно, влияет на эксплуатационные характеристики и безопасность. Поскольку источника термоядерных нейтронов ещё не существует, для моделирования термоядерных нейтронных повреждений в материалах широко используются нейтроны деления и заряженные частицы. В данной работе проведено сравнение размеров и плотности радиационно-индуцированных дефектов в ОЦК-металлах (W, Mo и Fe), полученных высокоэнергетическими собственными ионами, протонами и нейтронами с различным спектром, с помощью хорошо зарекомендовавшего себя метода позитронно-аннигиляционной прижизненной спектроскопии (PALS). Обнаружено образование большего размера дефектов с меньшей плотностью при облучении высокоэнергетическими нейтронами от источника  $p$  (35 МэВ) — Ве по сравнению с нейтронами деления и протонным облучением. Во-первых, новые экспериментальные данные вместе с данными, имеющимися в литературе, сравниваются с теорией сна, включая молекулярно-динамическое моделирование. Во-вторых, было проведено сравнение соотношений  $He/dpa$  в различных нейтронных установках. Показано, что соотношения  $He/dpa$  для исследуемых материалов в установках с термоядерными энергетическими спектрами, полученными из  $p$  (35 МэВ) — Ве-источника и для реактора DEMO на один-два порядка больше, чем для нейтронов деления в реакторах LVR-15, HFIR и BOR60. Обсуждаются методы получения наилучшего подхода к моделированию термоядерных нейтронных повреждений и преодоления разрыва между теоретическим прогнозированием первичного дефектообразования и долговременным повреждением с учётом неопределённостей.

**Ключевые слова:** радиационно-индуцированные дефекты, ОЦК-металлы, высокоэнергетические нейтроны и протоны.

olga@plasma.mephi.ru