

Д.Е. Толен^{1*}, М.Ф. Верещак¹, А.К. Шоканов²,

И.А. Манакова¹, Ж.К. Тлеубергенов¹

¹Институт ядерной физики, Казахстан, г. Алматы

²Казахский национальный педагогический университет имени Абая, Казахстан, г. Алматы

*e-mail: d.tolen@inp.kz

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННО-СТИМУЛИРОВАННЫХ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В ОБЛУЧЕННОМ Zr МЕТОДОМ МЕССБАУЭРОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

В статье рассматривается исследование влияния высокоэнергичных однозарядных ионов ⁵⁷Fe энергии 1 МэВ, током пучка на мишени ~100 нА, дозой 5х10¹⁶ ион/см² на структурно-фазовое состояние циркония.

Методами мессбауэровской спектроскопии в геометрии на пропускание (МС), конверсионной электронной мессбауэровской спектроскопии (КЭМС) и растровой электронной микроскопии (РЭМ) проведены исследования влияния высокоэнергичных однозарядных ионов ⁵⁷Fe на структурно-фазовое состояние циркония. Определены длины проективного пробега ионов ⁵⁷Fe в цирконии, рассчитано число атомов мишени, подвергнутых облучению, а также оценено число смещений, вызванных этими ионами. Проведено моделирование радиационных повреждений материалов циркония путем облучения образцов на ускорителе заряженных частиц зондовыми мессбауэровскими атомами для получения ядерно-физических данных из зоны воздействия этих атомов на структурно-фазовое состояние облученных образцов в условиях, близких к реакторным. Оценено электронное состояние имплантата в этих материалах. Рассчитана концентрация имплантированных атомов в приповерхностном слое и объеме образцов.

В частности, показано, что длина проективного пробега ионов ⁵⁷Fe в цирконии составила 497 нм, общее число смещенных атомов 3.4х10²⁰, число смещений на атом (сна) 159. Растворимость Fe в Zr составляет 0.03%. Однако при облучении циркония ионами ⁵⁷Fe в результате термических рекомбинаций вакансий и междоузельных атомов внутри каскада смещений, обусловленных термическими пиками, происходит формирование интерметаллидов Zr₃Fe, ZrFe₂ и твердого раствора Zr (Fe).

Ключевые слова: конструкционные материалы, цирконий, облучение, эффект Мессбауэра, интерметаллиды.

Д.Е. Төлен^{1*}, М.Ф. Верещак¹, А.К. Шоканов², И.А. Манакова¹, Ж.К. Тлеубергенов¹

¹Ядролық физика институты, Қазақстан, Алматы қ.

²Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Қазақстан, Алматы қ.

*e-mail: d.tolen@inp.kz

Сәулелендірілген Zr радиациялық ықпалдандырылған құрылымдық-фазалық түрленулерді мессбауэрлік спектроскопия әдісімен зерттеу

Мақалада энергиясы 1 МэВ, нысанадағы шоқ тогы ~100 нА, дозасы 5х10¹⁶ ион/см² цирконийдің құрылымдық-фазалық күйіне жоғары энергиялы бірзарядты ⁵⁷Fe иондарының ықпалын зерттеу қарастырылған.

Өткізу геометриясындағы мессбауэрлік спектроскопия (МС), конверсиялық электрондық мессбауэрлік спектроскопия (КЭМС) және растрлық электронды микроскопия (РЭМ) әдістерімен цирконийдің құрылымдық-фазалық күйіне жоғары энергиялы бірзарядты ⁵⁷Fe иондарының ықпалын зерттеу жұмыстары жүргізілді. Цирконийдегі ⁵⁷Fe иондарының проективті жүгіру жолының ұзындықтары анықталды, сәулелендіруге ұшыраған нысана атомдарының саны есептелді, сондай-ақ осы иондар ықпалынан болған ығысулардың саны бағаланды. Зарядталған бөлшектердің үдеткішіндегі үлгілерді

зонд Мессбауэр атомдарымен сәулелендіру арқылы цирконий материалдарының радиациялық зақымдалуын модельдеу осы атомдардың реакторға жақын жағдайларда сәулеленген үлгілердің құрылымдық-фазалық күйіне әсер ету аймағынан ядролық-физикалық деректерді алу үшін жүргізілді. Осы материалдардағы имплантанның электронды жағдайы бағаланды. Беткі қабаттағы имплантацияланған атомдардың концентрациясы және үлгілердің көлемі есептелді.

Атап айтқанда, цирконийдегі ^{57}Fe иондарының проекциялық диапазоны 497 нм, ығысқан атомдардың жалпы саны 3.4×10^{20} , атомға шаққандағы (ашы) ығысу саны 159 болатыны көрсетілді. Fe-дің Zr-де ерігіштігі 0.03%-ды құрайды. Бірақ цирконийді ^{57}Fe иондарымен сәулелендіру кезінде термиялық рекомбинациядан туындаған ығысу каскады ішіндегі вакансиялар мен интерстициалды атомдардың термиялық рекомбинациялануы нәтижесінде Zr_3Fe , ZrFe_2 аралық металл қосылыстары және Zr (Fe) қатты ерітіндісі түзіледі.

Түйін сөздер: конструкциялық материалдар, цирконий, сәулелендіру, Мессбауэр эффектісі, интерметаллидтер.

D.E. Tolen ^{1*}, M.F. Vereshchak¹, A.K. Shokanov², I.A. Manakova¹, J.K. Tleubergenov¹

¹Institute of Nuclear Physics, Kazakhstan, Almaty

²Abai Kazakh National Pedagogical University, Kazakhstan, Almaty

*e-mail: d.tolen@inp.kz

Study of radiation-stimulated structural phase transformations in irradiated Zr by Mössbauer spectroscopy

The article considers the study of the influence of high-energy singly charged ^{57}Fe ions with energy of 1 MeV, a beam current on the target of ~ 100 nA, a dose of 5×10^{16} ion/cm², on the structural-phase state of zirconium.

Using the methods of Mössbauer spectroscopy in transmission geometry (MS), conversion electron Mössbauer spectroscopy (CEMS), and scanning electron microscopy (SEM), we studied the effect of high-energy singly charged ^{57}Fe ions on the structural-phase state of zirconium. The projective ranges of ^{57}Fe ions in zirconium were determined, the number of target atoms subjected to irradiation was calculated, and the number of displacements caused by these ions was estimated. Radiation damage to zirconium materials was simulated by irradiating samples at a charged particle accelerator with probe Mössbauer atoms to obtain nuclear physical data from the zone of influence of these atoms on the structural and phase state of irradiated samples under conditions close to reactor conditions. The electronic state of the implant in these materials was evaluated. The concentration of implanted atoms in the near-surface layer and the volume of samples was calculated.

In particular, it was shown that the projective range of ^{57}Fe ions in zirconium was 497 nm, the total number of displaced atoms was 3.4×10^{20} , and the number of displacements per atom (dpa) was 159. The solubility of Fe in Zr is 0.03%. However, when zirconium is irradiated with ^{57}Fe ions, as a result of thermal recombination of vacancies and interstitial atoms within the cascade of displacements caused by thermal peaks, intermetallic compounds Zr_3Fe , ZrFe_2 and a Zr (Fe) solid solution are formed.

Key words: structural materials, zirconium, irradiation, Mössbauer effect, intermetallic compounds.

Введение

Основные требования к атомным электростанциям будущего - это повышение эксплуатационного ресурса, увеличение выгорания ядерного топлива, обеспечивающего экономические показатели, и безусловное обеспечение ядерной, радиационной и экологической безопасности. Разработка конструкционных материалов, эксплуатируемых и перспективных ядерных установок представляет собой сложнейшую научно-

техническую проблему [1-3]. В настоящее время к свойствам конструкционных материалов предъявляется множество требований [4,5]. Удовлетворение этих требований в значительной степени связано с определением влияния облучения высокоэнергетическими частицами различной природы и энергии на свойства материалов.

Поэтому современная атомная энергетика ставит ряд задач по созданию новых конструкционных материалов с повышенными эксплуатационными характеристиками. Работы в

этом направлении широко представлены практически во всех ведущих центрах мира [6-8] и стали одним из приоритетных направлений развития физики в Казахстане. Несмотря на значительный накопленный опыт, исчерпывающего решения, которое бы отвечало современным требованиям к атомной энергетике, до сих пор не выработано [9,10].

Решение этой материаловедческой проблемы сдерживается необходимостью проведения экспериментальных облучений в промышленных быстрых реакторах большой мощности для достижения интегральных доз по быстрым нейтронам на уровне 100-110 смещений на атом (сна). Проведение нейтронных облучений в условиях промышленного реактора связано со значительными материальными и временными (15-20 лет облучения) затратами. Рациональный путь ускорения разработки высокодозных конструкционных материалов активной зоны реакторов различного типа состоит в проведении облучений ускоренными тяжелыми металлическими ионами с энергией 1.4-2 МэВ в условиях, имитирующих реакторные [11,12].

Исследование влияния облучений ускоренными ионами ^{57}Fe проведено в работах [13,14]. Из анализа [9,10] следует, что одним из важнейших конструкционных материалов, применяемых в атомной энергетике, является цирконий и его сплавы.

Ионно-индуцированные методы модификации свойств твердого тела находят все большее применение [15-17]. Это связано с тем, что с помощью ионных пучков в поверхностных слоях материалов можно создать новые соединения, изменять их физические и химические свойства. Эксперименты, в которых радиационное воздействие на конструкционный материал нейтронного облучения в активной зоне реактора замещается облучением тяжелыми металлическими ионами в контролируемых условиях на ускорителе - наиболее продуктивный путь получения модельных результатов.

Эксперимент

Методика высокодозного ионного облучения на линейном ускорителе УКП-2-1 принципиально модернизирована использованием тяжелых ускоренных металлических ионов мессбауэровского изотопа ^{57}Fe , что позволило перейти на облучение высокоэнергетичными однозарядными ионами ^{57}Fe с энергией 1 МэВ и током ~ 100 нА и сократить время облучения. Кроме того, мишенная камера дополнительно была оснащена магниторазрядным безмасляным насосом. Такая конструкция системы откачки

позволила получить вакуум в мишенной камере $\sim 15 \times 10^{-8}$ мм.рт.ст., обеспечив, таким образом, меньшую скорость нарастания углеродной пленки.

Циркониевую фольгу прокатали до эффективной толщины (18 мкм). Далее был проведен гомогенизирующий отжиг при температуре 850°C в вакууме 1×10^{-6} мм.рт.ст. продолжительностью 2 часа.

Образцы циркония подвергали облучению на ускорителе тяжелых ионов УКП-2-1 Института ядерной физики (Алматы, Казахстан). Энергия ионов 1 МэВ, ток пучка на мишени ~ 100 нА, доза 5×10^{16} ион/см². Локальное окружение атомов ^{57}Fe определяли методом мессбауэровской спектроскопии на спектрометре MS-1104Em при комнатной температуре. Мессбауэровские исследования проводились с использованием двух методических подходов: в геометрии на пропускание (МС) и регистрацией электронов внутренней конверсии из поверхностного слоя (КЭМС). Источником γ -квантов служил ^{57}Co в матрице хрома, гамма-излучение регистрировали с помощью резонансного сцинтилляционного детектора. Для регистрации конверсионных электронов использовали газовый пропорциональный счетчик с $\text{He CH}_4(8\%)$ смесью. Обработку мессбауэровских спектров осуществляли методом модельной расшифровки с помощью программы SpectrRelax [18]. В случае МС спектры содержат информацию от всех имплантированных атомов, в случае КЭМС - от атомов в облученном слое толщиной до 0.1 мкм. Структурное состояние циркония до и после облучения регистрировали на дифрактометре D8 Advance фирмы Bruker с медным излучателем и графитовым отражателем в геометрии Брэгга-Брентано. Морфологию поверхности и элементный состав определяли с помощью растрового электронного микроскопа JEOLJSM-6610, оснащенного энергодисперсионным анализатором.

Обсуждение результатов

На рисунке 1 приведен расчет степени воздействия ионного пучка на кристаллическую решетку циркония с помощью программы SRIM-2008. Длина проективного пробега ионов ^{57}Fe в цирконии составила 497 нм, общее число смещенных атомов 3.4×10^{20} , число смещений на атом (сна) 159. На рисунке 2 показана зависимость концентрации имплантированных ионов ^{57}Fe в цирконии от глубины проникновения.

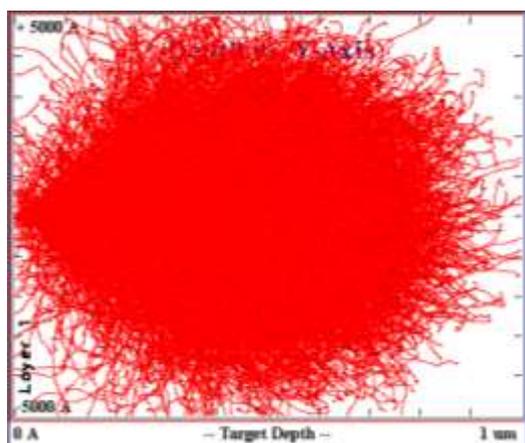


Рисунок 1 – Расчетная траектория движения ускоренных до 1 МэВ ионов ^{57}Fe в Zr

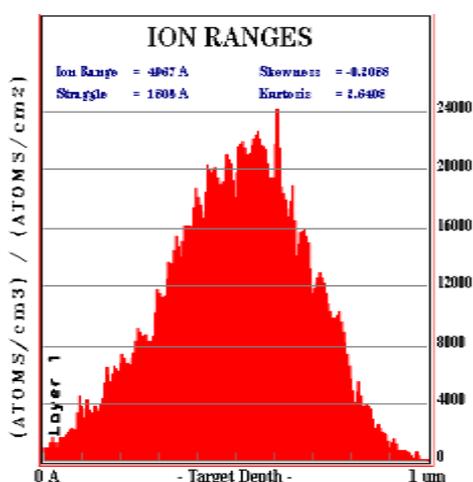


Рисунок 2 – Профиль концентрации ионов ^{57}Fe в поверхностном слое Zr

На рисунке 3 приведены мессбауэровские спектры ^{57}Fe , имплантированного в матрицу циркония, снятые в режиме на пропускание (а) и обратного рассеяния (б). Спектры представляют собой суперпозицию трех дублетов. Для МС-спектра: дублет D1 интенсивностью 17% (8.5×10^{15} ионов ^{57}Fe) с изомерным сдвигом - 0.36 мм/с и квадрупольным расщеплением 0.99 мм/с; дублет D2 интенсивностью 74% (3.7×10^{16} ионов ^{57}Fe) с изомерным сдвигом - 0.26 мм/с и квадрупольным расщеплением 0.49 мм/с; дублет D3 интенсивностью 9% (4.5×10^{15} ионов ^{57}Fe) с изомерным сдвигом - 0.05 мм/с и квадрупольным расщеплением 0.31 мм/с. Для КЭМС-спектра: дублет D1 интенсивностью 14% (1.7×10^{15} ионов ^{57}Fe); дублет D2 интенсивностью 66% (7.9×10^{15} ионов ^{57}Fe); дублет D3 интенсивностью 20% (2.4×10^{16} ионов ^{57}Fe). Расчет произведен без учета распыления импланта в процессе облучения.

Мессбауэровские параметры дублетов D1 и D2 соответствуют аналогичным параметрам интерметаллидов Zr_3Fe и ZrFe_2 [9,10]. Следует отметить, что температура на мишени в процессе облучения не превышала 60°C , что явно недостаточно для осуществления кристаллизации и формирования нанокристаллических фаз в приповерхностных слоях и объеме Zr-Fe сплава. Однако, термическая рекомбинация вакансий и междоузельных атомов внутри каскада смещений возможна и обусловлена термическими пиками [15,19]. Известно, что легирующие элементы 3d-группы имеют низкую растворимость в цирконии, что исключает образование твердого раствора замещения в кристаллической решетке циркония. Растворимость железа в цирконии в соответствии с диаграммой состояния составляет 0.03% при равновесных условиях. Следует предположить, что наблюдаемый дублет D3 можно интерпретировать как твердый раствор замещения железа в α -цирконии, имеющего гексагональную плотноупакованную (ГПУ) кристаллическую решетку $\alpha\text{-Zr(Fe)}$. В условиях интенсивной имплантации предельная растворимость может значительно увеличиться. Действительно, в слое 0.1 мкм, доступном для КЭМС, локализовано 1.2×10^{16} имплантированных ионов ^{57}Fe , что составляет 24 ат. %.

По результатам РЭМ количество внедренного железа в матрицу циркония составляет 1.11%. Результаты энергодисперсионного анализа образца Zr после имплантации ионов ^{57}Fe показаны на рисунке 4.

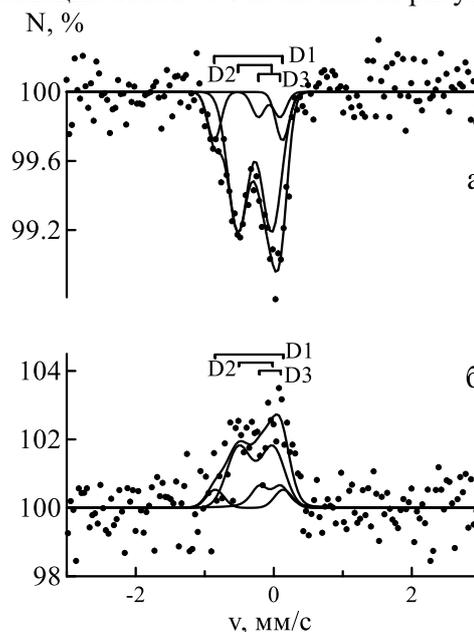


Рисунок 3. МС - (а) и КЭМС-спектры (б) на ядрах ^{57}Fe в Zr.

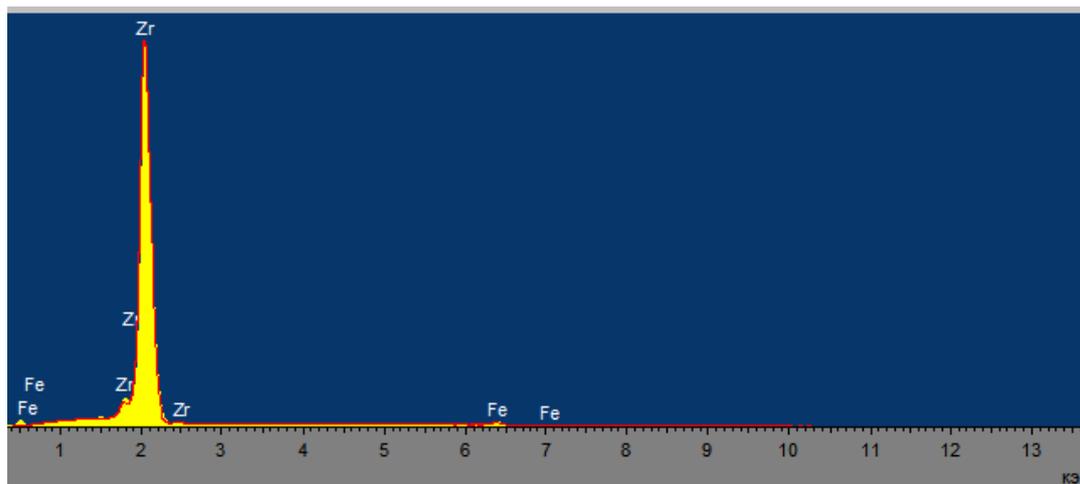


Рисунок 4. Энергодисперсионный спектр образца Zr после имплантации ионов ^{57}Fe .

Заключение

Методами МС, КЭМС и РЭМ проведены исследования влияния высокоэнергичных однозарядных ионов ^{57}Fe на структурно-фазовое состояние циркония. Проведен расчет степени воздействия ионного пучка на кристаллическую решетку циркония с помощью программы SRIM-2008. Длина проективного пробега ионов ^{57}Fe в

цирконии составила 497 нм, общее число смещенных атомов 3.4×10^{20} , число смещений на атом 159. При облучении циркония ионами ^{57}Fe в результате термических рекомбинаций вакансий и междоузельных атомов внутри каскада смещений, обусловленных термическими пиками, происходит формирование интерметаллидов Zr_3Fe , ZrFe_2 и твердого раствора $\text{Zr}(\text{Fe})$.

Литература

- 1 Xiong Zhihong, Cheng Songbai, Xu Ruicong, Tan Yuecong, Zhang Huaiqin, Xu Yihua. Experimental study on eutectic reaction between fuel debris and reactor structure using simulant materials // *Annals of Nuclear Energy*. - 2020. - Vol. 139. - P.107284.
- 2 Messner M., Phan V., Sham T. Evaluating and modeling rate sensitivity in advanced reactor structural materials: 316H, Gr. 91, and A617 // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. - 2019. - Vol. 178. - P. 103997
- 3 Muránsky O., Yang C., Zhu H., Karatchevtseva I., Sláma P., Nový Z., Edwards L. Molten salt corrosion of Ni-Mo-Cr candidate structural materials for Molten Salt Reactor (MSR) systems // *Corrosion Science*. - 2019. - Vol. 159. - P. 108087.
- 4 Ustinov O., Kashcheev A., Shadrin V., Tuchkova Y., Semenov I., Lesina G., Anikin S. Tritium in Nitride Fuel of Fast Reactors // *Atomic Energy*. - 2019. - Vol. 125(4). - P.244-249.
- 5 Patel N., Pavlík V., Kubíková B., Nosko M., Danielík V., Boča M. Corrosion behavior of Ni-based superalloys in molten FLiNaK salts // *Corrosion Engineering, Science and Technology*. - 2019. - Vol. 54(1). - P.46-53.
- 6 Singh T., Dureja J.S., Dogra M., Bhatti M.S. Machining Performance Investigation of AISI 304 Austenitic Stainless Steel under Different Turning Environments // *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. - 2018. - Vol. 15, №4. -P. 5837-5862.
- 7 Mahdavinejad R.A., Saeedy S. Investigation of the influential parameters of machining of AISI 304 stainless steel // *Indian Academy of Sciences, Sadhana*. - 2011. - Vol.36, №6. - P. 963-970.
- 8 Waanders F.B., Vorster S.W., Engelbrecht A. Mossbauer and semcharacterisation of the scale on type 304 stainless steel // *Scriptamaterialia*. - 2000. - Vol. 42, № 10. - P. 997-1000.
- 9 Marest G., Donnet C., Sawicki J.A. Annealing behaviour of iron implanted zirconia // *Hyperfine Interactions*. - 1990. - Vol.56, №1.-P.1605-1611.
- 10 Kirichenko V.G., Usatova O.A. The features of formation of the surface gradient layers in zirconium alloys under ion irradiation // *Problems of Atomic Science and Technology*. - 2017. - Vol.111, №5. P. 35-39.
- 11 Rogozhkin S.V., Bogachev A.A., Nikitin A.A., Vasiliev A.L., Presnyakov M.Y., Tomut M., Trautmann C. TEM analysis of radiation effects in ODS steels induced by swift heavy ions // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. - 2021. - Vol.486. P.1-10.
- 12 Rogozhkin S.V., Khomich A.A., Bogachev A.A., Nikitin A.A., Khoroshilov V.V., Kulevoy T.V., Fedin P.A., Pryanishnikov K.E., Lukyanchuk A.A., Raznitsyn O.A., Shutov A.S., Zaluzhnyi A.G., Vasiliev A.L., Presnyakov M.Yu.

Nanostructure Evolution of Oxide Dispersion Strengthened Steels under Fe Ion Irradiation at 350°C // *Physics of Atomic Nuclei*. - 2020. - Vol.83, №11. - P. 1519-1528.

13 Idczak R., Konieczny R., Chojcan J. Thermodynamic properties of Fe–Ni solid solutions studied by ⁵⁷Fe Mössbauer spectroscopy // *Physica B: Condensed Matter*. – 2012. - Vol.407, №2.- P.235-239.

14 Сагарадзе В.В., Шабашов В.А., Литвинов А.В., Колосков В.М., Пархоменко В.Д. Радиационно-индуцированное растворение частиц интерметаллидов Ni₃Me (Me = Ti, Al, Zr) в каскадах смещения в процессе облучения нейтронами при 340 К. Fe–Ni–Me-сплавов // *ФММ*. – 2010. - Т.109, №5.- С.511-519.

15 Kadyrzhanov K.K., Vereshchak M.F., Manakova I.A., Ozernoy A.N., Rusakov V.S. Structure-phase transformations in the Be-Fe-Be layered system subjected to irradiation and thermal treatment // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. – 2013. – Vol.74, №8. – P.1078-1085.

16 Andrianov V.A., Bedelbekova K.A., Ozernoy A.N., Vereshchak M.F., Manakova I.A. Mössbauer studies of ⁵⁷Fe implantation in metal Ta and Mo // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. – 2020. - Vol.475. - P.71-76.

17 Andrianov V.A., Bedelbekova K.A., Ozernoy A.N., Vereshchak M.F., Manakova I.A., Dektereva A.S. Mössbauer Study of the Implantation of Fe-57 Ions into Metallic Ta and Mo and Stainless Steel // *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. - 2020. - Vol.14, №2.- P.371–375

18 Matsnev M.E., Rusakov V.S. SpectrRelax: An application for Mössbauer spectra modeling and fitting // *AIP Conf. Proceedings*. – 2012 – Vol.1489. – P.178-185.

19 Ozernoy A.N., Vereshchak M.F., Manakova I.A, Kadyrzhanov K.K., Rusakov V.S. Study of radiation induced processes in a layered Be–Fe–Be system subjected to ion irradiation and subsequent isochronous annealings // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2014. – Vol.115, №8. – P.765-774.

References

1 XiongZhihong, Cheng Songbai, XuRuicong, Tan Yuecong, Zhang Huaiqin and XuYihua, *Annals of Nuclear Energy*, 139, 107284 (2020).

2 M. Messner, V. Phan and T. Sham, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 178, 103997 (2019).

3 O. Muránsky, C. Yang, H. Zhu, I. Karatchevtseva, P. Sláma, Z. Nový, and L. Edwards, *Corrosion Science*, 159, 108087 (2019).

4 O. Ustinov, A. Kashcheev, V. Shadrin, Y. Tuchkova, I. Semenov, G. Lesina and S. Anikin *Atomic Energy*, 125, 244–249 (2019).

5 N. Patel, V. Pavlík, B. Kubíková, M. Nosko, V. Danielik and M. Boča, *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 54 (1), 46-53 (2019).

6 T. Singh, J.S. Dureja, M. Dogra and M.S. Bhatti, *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 15 (4), 5837-5862 (2018)

7 R.A. Mahdavinejad and S. Saeedy, *Indian Academy of Sciences*, 36 (6), 963-970 (2011)

8 F.B. Waanders, S.W. Vorster and A., *Scriptamaterialia*, 42 (10), 997-1000 (2000).

9 G. Marest, C. Donnet and J.A. Sawicki, *Hyperfine Interactions*, 56 (1), 1605-1611 (1990)

10 V.G. Kirichenko and O.A. Usatova, *Problems of Atomic Science and Technology*, 111 (5), 35-39 (2017).

11 S.V. Rogozhkin, A.A. Bogachev, A.A. Nikitin, A.L. Vasiliev, M.Y. Presnyakov, M. Tomut and C. Trautmann, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 486, 1-10 (2021).

12 S.V. Rogozhkin, A.A. Khomich, A.A. Bogachev, A.A. Nikitin, V.V. Khoroshilov, T.V. Kulevoy, P.A. Fedin, K.E. Pryanishnikov, A.A. Lukyanchuk, O.A. Raznitsyn, A.S. Shutov, A.G. Zaluzhnyi, A.L. Vasiliev and M.Yu. Presniakov, *Physics of Atomic Nuclei*, 83 (11), 1519-1528 (2020).

13 R. Idczak, R. Konieczny and J. Chojcan, *Physica B: Condensed Matter*, 407 (2), 235-239 (2012).

14 В.В. Сагарадзе, В.А. Шабашов, А.В. Литвинов, В.М. Колосков и В.Д. Пархоменко, *ФММ*, 109 (5), 511-519 (2010).

15 K.K. Kadyrzhanov, M.F. Vereshchak, I.A. Manakova, A.N. Ozernoy and V.S. Rusakov, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 74 (8), 1078-1085 (2013).

16 V.A. Andrianov, K.A. Bedelbekova, A.N. Ozernoy, M.F. Vereshchak and I.A. Manakova, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 475, 71-76 (2020).

17 V.A. Andrianov, K.A. Bedelbekova, A.N. Ozernoy, M.F. Vereshchak, I.A. Manakova and A.S. Dektereva, *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 14 (2), 371–375 (2020).

18 M.E. Matsnev and V.S. Rusakov, *AIP Conf. Proceedings*, 1489, 178-185 (2012).

19 A.N. Ozernoy, M.F. Vereshchak, I.A. Manakova, K.K. Kadyrzhanov and V.S. Rusakov, *The Physics of Metals and Metallography*, 115. (8), 765-774 (2014).