

2.8.4. Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений (технические науки)

УДК 53.091, 54-722, 54-724

DOI: 10.31660/0445-0108-2024-4-159-172

Изучение механизмов радиационно-индуцированного охрупчивания и деформационного распухания приповерхностных слоев NbTi, NbTiV, NbTiVZr сплавов, применимых в качестве конструкционных материалов для нефтегазовой и ядерной отраслей

К. К. Кадыржанов¹, А. Л. Козловский^{1,2*}, Д. И. Шлимас¹, Г. Ж. Молдабаева³

¹Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, Астана, Республика Казахстан

²Атырауский университет им. Х. Досмухамедова, Атырау, Республика Казахстан

³Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Алматы, Республика Казахстан

*Kozlovskiy.a@inp.kz

Аннотация. Определение механизмов деформационного искажения и процессов разупрочнения приповерхностных слоев в сплавах, включая высокоэнтропийные сплавы, является одной из приоритетных задач в современном материаловедении. Интерес к подобным исследованиям, требующим комплексного подхода в определении взаимосвязи между накопленными структурными искажениями и процессами разупрочнения, обусловлен большим потенциалом применения данных сплавов в нефтегазовой и ядерной энергетике нового поколения. С целью оценки устойчивости сплавов на основе соединений NbTi, NbTiV, NbTiVZr к процессам накопления радиационных повреждений эксперименты по облучению были выполнены на ускорителе ДЦ-60 с учетом возможностей моделирования радиационных повреждений как в случае единичных (изолированных) областей повреждения, так и при их перекрытии. Полученные результаты зависимостей изменения структурных параметров исследуемых сплавов в зависимости от количества компонент для облученных образцов являются прямым подтверждением влияния различий атомных радиусов на устойчивость к деформационному растяжению при накоплении радиационных повреждений. Было установлено, что для NbTiVZr сплава наблюдаются наименьшие структурные изменения, вызванные облучением, что свидетельствует о высоких показателях устойчивости к деформационному искажению и снижению прочностных свойств и устойчивости к износу. Определено, что основным механизмом, влияющим на потерю стойкости к износу при трибологических испытаниях на трение, является деформационное искажение поврежденного слоя, величина которого определяет деградацию приповерхностного слоя сплавов.

Ключевые слова: радиационно стойкие сплавы, трибологические характеристики, прочностные свойства, разупрочнение

Благодарности: данная работа выполнена в рамках программно-целевого финансирования (программа No. BR18574135) при поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

Для цитирования: Изучение механизмов радиационно-индуцированного охрупчивания и деформационного распухания приповерхностных слоев NbTi, NbTiV, NbTiVZr сплавов, применимых в качестве конструкционных материалов для нефтегазовой и ядерной отраслей / К. К. Кадыржанов, А. Л. Козловский, Д. И. Шлимас, Г. Ж. Молдабаева. – DOI 10.31660/0445-0108-2024-4-159-172 // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2024. – № 4. – С. 159–172.

Studying the mechanisms of radiation-induced embrittlement and deformation swelling of surface layers of NbTi, NbTiV, NbTiVZr alloys used as structural materials for the oil and gas and nuclear industries

Kairat K. Kadyrzhanov¹, Artem L. Kozlovskiy^{1,2*}, Dmitriy I. Shlimas¹, Gulnaz Zh. Moldabayeva³

¹*L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, the Republic of Kazakhstan*

²*Atyrau University named after Kh. Dosmukhamedov, Atyrau, the Republic of Kazakhstan*

³*Satbayev University, Almaty, the Republic of Kazakhstan*

**Kozlovskiy.a@inp.kz*

Abstract. Determining the mechanisms of deformation distortion and softening processes of near-surface layers in alloys, including high-entropy alloys, is one of the priority tasks in modern materials science. Interest in such studies, which require an integrated approach to determining the relationship between accumulated structural distortions and softening processes, is due to the great potential for the use of these alloys in the new generation of nuclear power. In order to assess the resistance of alloys based on NbTi, NbTiV, NbTiVZr compounds to the accumulation of radiation damage, irradiation experiments were carried out at the DC-60 accelerator, taking into account the capabilities of modeling radiation damage, both in the case of single (isolated) areas of damage, and when overlap. The obtained results of the dependences of changes in the structural parameters of the alloys under study depending on the number of components for irradiated samples are direct confirmation of the influence of differences in atomic radii on the resistance to deformation tension during the accumulation of radiation damage. It was found that the NbTiVZr alloy exhibits the smallest structural changes caused by irradiation, which indicates high resistance to deformation distortion and a decrease in strength properties and wear resistance. It has been determined that the main mechanism influencing the loss of wear resistance during tribological friction tests is the deformation distortion of the damaged layer, the magnitude of which determines the degradation of the near-surface layer of the alloys.

Keywords: radiation-resistant alloys, tribological characteristics, strength properties, softening

Acknowledgments: this study was funded under the programme-targeted financing (Programme No. BR18574135) with support from the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan.

For citation: Kadyrzhanov, K. K., Kozlovskiy, A. L., Shlimas, D. I., & Moldabayeva, G. Zh. (2024). Studying the mechanisms of radiation-induced embrittlement and deformation swelling of surface layers of NbTi, NbTiV, NbTiVZr alloys used as structural materials for the oil and gas and nuclear industries. *Oil and Gas Studies*, (4), pp. 159-172. (In Russian). DOI: 10.31660/0445-0108-2024-4-159-172

Введение

Основная гипотеза, лежащая в основе высоких показателей устойчивости к деградационному охрупчиванию приповерхностных слоев высокоэнтропийных сплавов, заключается в наличии деформационных структурных искажений кристаллической решетки, обусловленных различием в атомных радиусах элементов, используемых для получения сплава, которые создают барьерные препятствия для точечных и вакансионных дефектов, возникающих при взаимодействии налетающих ионов с кристаллической структурой [1–3]. При этом использование данных сплавов в качестве конструкционных материалов для ядерных реакторов требует не только высоких показателей радиационной стойкости, но и сохранения их в течение длительного времени облучения при различных режимах эксплуатации [4, 5]. Как правило, высокоэнтропийные сплавы, в особенности на основе тугоплавких элементов, рассматриваются в качестве конструкционных материалов, способных выдерживать режимы эксплуатации близкие к экстремальным, в том числе эксплуатации при высоких температурах или

больших дозах радиационных повреждений [6, 7]. При этом в отличие от традиционных нержавеющих сталей высокоэнтропийные сплавы в большинстве своем не испытывают ферритно-мартенситных превращений, возникающих в результате температурных перепадов или под действием накопления радиационных повреждений. Также высокоэнтропийные сплавы выдерживают гораздо большие дозовые нагрузки при длительном воздействии ионизирующего излучения в сравнении с традиционными сталями, что позволяет использовать их в качестве материалов, работающих в режимах повышенного радиационного воздействия, в том числе воздействия осколков деления ядерного топлива [7, 8].

Интерес к сплавам на основе соединений NbTiVZr, включая также высокоэнтропийные сплавы, обусловлен возможностями использования их в качестве материалов для ядерных реакторов, в том числе в случае применения их в качестве материалов первой стенки или конструкционных элементов, удерживающих ядерное топливо [9–11]. При этом интерес к подобным сплавам на основе данных соединений обусловлен в первую очередь возможностью получения высокопрочных тугоплавких сплавов, обладающих высокой устойчивостью к коррозии и деградации приповерхностного слоя, который наиболее подвержен внешним воздействиям. Использование сплавов, содержащих в себе ванадий, цирконий и ниобий, позволяет увеличить устойчивость материалов к внешним воздействиям, увеличить твердость и износостойкость, а также повысить сопротивляемость к радиационной деградации. При этом добавление ванадия в подобных сплавах обусловлено его стабилизирующими свойствами, способными привести к упрочнению объемно-центрированной кубической решетки, исключая выделение примесных фаз в составе сплавов при их изготовлении. Использование титана в сплавах, как правило, обусловлено возможностью снижения плотности сплавов при сохранении прочностных и теплофизических параметров [12, 13].

Цель данного исследования заключается в определении радиационной стойкости к охрупчиванию и распуханию сплавов NbTi, NbTiV, NbTiVZr, рассматриваемых как одни из перспективных материалов в ядерной энергетике, в качестве материалов применяемых в активной зоне реакторов и подвергающихся прямому воздействию осколков деления ядерного топлива. Эксперименты по определению механизмов радиационных повреждений в приповерхностных слоях NbTi, NbTiV, NbTiVZr были проведены с учетом знаний о свойствах деления ядерного топлива и формируемых осколках деления в виде ионов Kr^{15+} и Xe^{23+} с энергиями порядка 150–250 МэВ. При этом проведенные ранее тестовые эксперименты, опубликованные в работе [14], показали, что вариация компонент в составе сплавов приводит к изменению механизмов деформационных искажений, а также к увеличению устойчивости к распуханию и деформации, вызванной внешними воздействиями. При этом эффект упрочнения обусловлен не только деформацион-

ным искажением кристаллической решетки в исходном состоянии, связанным с вариацией компонент, но и дислокационным упрочнением, вызванным технологическими процессами изготовления данных сплавов.

Объект и методы исследования

В качестве объектов исследования были выбраны сплавы NbTi, NbTiV, NbTiVZr, полученные методом дуговой плавки под давлением в вакууме (5×10^{-5} мбар). При этом для достижения гомогенности и однородности распределения элементов в объеме исследуемого сплава, образцы подверглись пяти последовательным плавлениям при тех же условиях. Согласно данным рентгенофазового анализа исследуемые образцы сплавов NbTi, NbTiV, NbTiVZr обладают объемно-центрированным типом кристаллической решетки, характерному для подобных сплавов на основе ниобия.

Облучение образцов выбранных сплавов NbTi, NbTiV, NbTiVZr с целью определения взаимосвязи между структурными изменениями, связанными с накоплением деформационных искажений в приповерхностном слое было выполнено на ускорителе тяжелых ионов ДЦ-60 (Институт ядерной физики Министерства энергетики Республики Казахстан, г. Алматы, Республика Казахстан). Для облучения использовались два типа тяжелых ионов Kr^{15+} и Xe^{23+} с энергиями порядка 150 и 230 МэВ соответственно. Выбор данных типов ионов обусловлен схожестью их с осколками деления ядерного топлива, которые могут возникать при взаимодействии урана с нейтронами, и, как следствие, протеканием ядерных реакций распада урана, используемого в качестве делящегося ядерного материала. Облучение было осуществлено в диапазоне флюенсов от 10^{11} до 10^{15} ион/см², при комнатной температуре. Флюенсы облучения были выбраны с учетом возможностей облучения ускорителя ДЦ-60, а также возможности моделирования структурных изменений в поврежденном слое толщиной порядка 10–12 мкм в зависимости от концентрации накопления структурных искажений, вызванных облучением. Так, при флюенсах облучения порядка 10^{11} – 10^{12} ион/см², образующиеся структурные искажения вдоль траектории движения ионов в поврежденном слое выбранных сплавов, представляют собой изолированные области, в то время как увеличение флюенса облучения выше 10^{12} ион/см² приводит к возникновению эффекта перекрытия структурно-деформированных областей, что инициирует процессы более выраженных структурных изменений в поврежденном слое, характерных для образования сильно искаженных включений и аморфных областей.

Сравнение изменений структурных особенностей поврежденного слоя с прочностными параметрами было проведено с учетом установленных зависимостей изменений величины атомных смещений при изменении флюенса облучения. При этом учет изменений проводился с учетом особенностей выбранных тяжелых ионов для облучения, а также различий в энергиях облучения. В данном случае использование более тяжелых

ионов Xe^{23+} приводит к инициализации больших атомных смещений, чем в случае облучения тяжелыми ионами Kr^{15+} . На рисунке 1 представлены результаты моделирования величин ионизационных потерь ионов Kr^{15+} и Xe^{23+} вдоль траектории движения ионов в материале в зависимости от типа сплава. Согласно представленным данным, изменение типа ионов с Kr^{15+} на Xe^{23+} приводит к увеличению ионизационных потерь dE/dx_{electron} и dE/dx_{nuclear} приблизительно в 1,5 раза, в то время как максимальная длина пробега при изменении типа ионов и их энергии изменяется не более чем на 10 %. При этом следует отметить, что изменение вариации компонент в сплаве не приводит к существенным различиям в величинах ионизационных потерь, ввиду того что вариация плотности сплавов незначительна при изменении количества компонент.

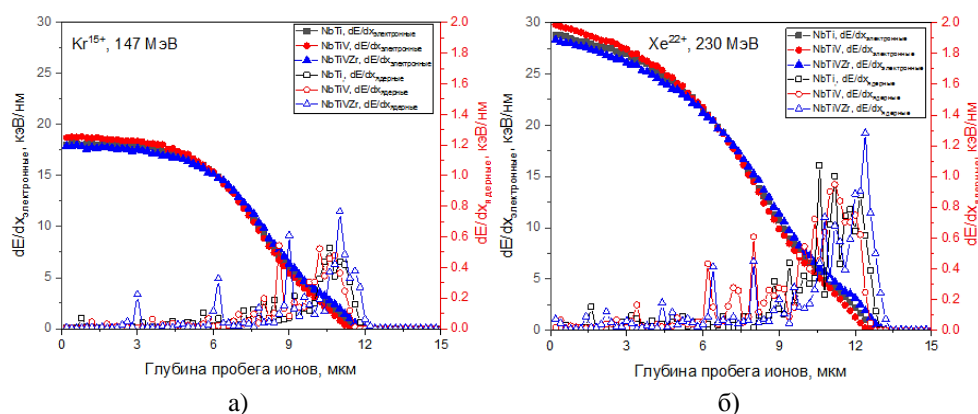


Рис. 1. Результаты моделирования ионизационных потерь ионов Kr^{15+} и Xe^{23+} в приповерхностном слое сплавов: а) в случае облучения ионами Kr^{15+} ; б) в случае облучения ионами Xe^{23+}

Установление влияния накопления структурных повреждений на деформационное искажение, приводящее к распуханию за счет растягивающих напряжений в приповерхностном поврежденном слое, было выполнено путем вычисления изменений структурных параметров (параметра кристаллической решетки и объема кристаллической решетки) в зависимости от флюенса облучения. Данные расчеты были выполнены на основе данных измеренных рентгеновских дифрактограмм образцов до и после облучения. Рентгенографирование образцов было выполнено на дифрактометре D8 Advance ECO, Bruker.

Определение влияния накопления структурно-деформационных искажений в поврежденном слое в зависимости от флюенса облучения на изменение трибологических характеристик было проведено путем измерения изменений коэффициента сухого трения образцов сплавов до и после облучения. Эксперименты проводились путем последовательных испытаний движения шарика по поверхности образцов сплавов при постоянной нагрузке на него. Количество циклов испытаний было выбрано с учетом

возможности установления основных этапов деградации поверхности в ходе испытаний на трение, а также установления изменений коэффициента трения и износа поверхности в зависимости от различных условий облучения. Нагрузка на индентер в виде шарика из карбида кремния составляла не более 100 Н, цикл измерений составлял не менее 10 000.

Результаты и обсуждение

Согласно проведенному анализу данных рентгеновских дифрактограмм исследуемых образцов сплавов в исходном состоянии было установлено, что основной структурный мотив в виде объемно-центрированной кубической решетки (ОЦК) сохраняется для всех трех исследуемых сплавов вне зависимости от вариации количества компонент в сплаве. Основные различия в данном случае связаны в первую очередь с изменением параметров кристаллической решетки и ее объема, изменение которых обусловлено эффектами, связанными с ионными радиусами компонент сплава.

При добавлении в состав NbTi сплава ванадия ($r_V \sim 0,134$ нм) наблюдается незначительное уменьшение параметра кристаллической решетки ОЦК фазы $a = 3,3013$ Å, в то время как при добавлении в NbTiVZr сплава циркония ($r_{Zr} \sim 0,160$ нм) наблюдается увеличение параметра кристаллической решетки до $3,3042$ Å. Подобные различия в изменениях параметров ОЦК фазы для наблюдаемых сплавов при изменении количества компонент обусловлены различиями в атомных радиусах добавляемых элементов в состав NbTi сплава. При этом замещение ниобия и титана ванадием или цирконием, приводящее к изменению параметров кристаллической решетки, равновероятно, ввиду того что атомные радиусы ниобия и титана близки ($r_{Nb} \sim 0,146$ нм, $r_{Ti} \sim 0,147$ нм). При этом, оценка деформационного фактора искажения кристаллической решетки для исследуемых образцов свидетельствует о том, что добавление в сплав ванадия и циркония приводит к уменьшению данной величины за счет меньших размеров параметра кристаллической решетки, однако следует отметить, что характер деформационного искажения, связанный с растягивающими напряжениями сохраняется для всех типов сплавов (см. данные, представленные на рис. 2).

Анализ представленных данных зависимостей изменения величины деформационного искажения кристаллической структуры сплавов при изменении типа ионов и флюенса облучения (см. рис. 2), свидетельствует о том, что вариация компонент сплава оказывает существенное влияние на устойчивость сплавов к радиационно-индуцированным процессам деформационного искажения приповерхностного поврежденного слоя. При этом изменение типа ионов с Kr^{15+} на He^{23+} приводит к более выраженным деформационным искажениям приповерхностного слоя при высоких флюенсах облучения. В случае облучения ионами He^{23+} величина деформационных искажений для NbTi сплава при максимальном флюенсе облучения 10^{15} ион/см² составляет порядка 4,2 % отклонений от начального значения, в то время как при облучении

ионами Kr^{15+} аналогичная величина составляет порядка 2,5 %. Подобные различия обусловлены эффектами различий ионизационных потерь при взаимодействии налетающих ионов с кристаллической структурой сплавов, которые в случае ионов Xe^{23+} приводят к более выраженным структурным искажениям, чем в случае облучения ионами Kr^{15+} . При этом добавление в NbTi сплав ванадия и циркония приводит к увеличению устойчивости к разупорядочению, которое проявляется для обоих типов ионов облучения.

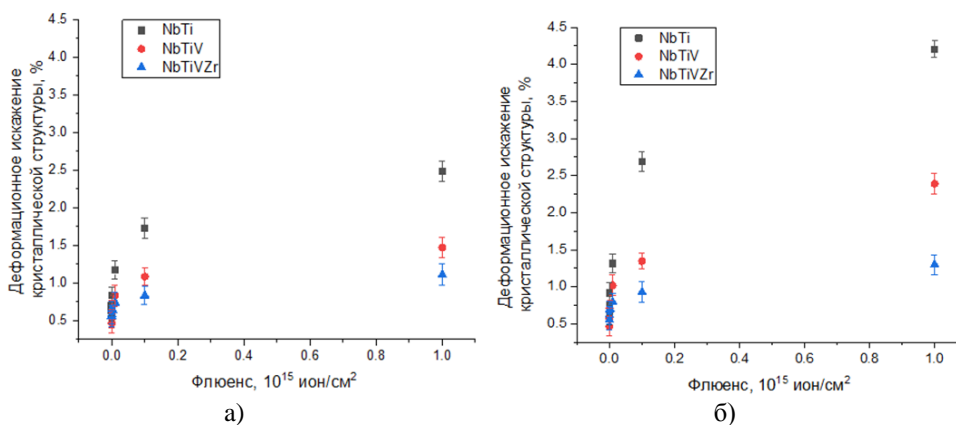


Рис. 2. Результаты оценки деформационного искажения кристаллической структуры исследуемых сплавов в зависимости от флюенса облучения:
 а) в случае облучения ионами Kr^{15+} ; б) в случае облучения ионами Xe^{23+}

Также следует отметить, что в ходе проведенных исследований с применением метода рентгенофазового анализа было определено, что увеличение флюенса облучения не приводит к изменению фазового состава за счет появления примесных фаз или полиморфных трансформаций полученных сплавов, что свидетельствует об устойчивости выбранных образцов к подобным явлениям. При этом определено, что увеличение количества компонент в сплавах приводит к формированию более структурно-устойчивых к радиационным повреждениям сплавов, которое может быть объяснено эффектами, связанными с распределением элементов в сплавах. Увеличение устойчивости к процессам деформационного разупорядочения, вызванным облучением для высокоэнтропийных сплавов, имеет хорошее согласие с литературными данными [15, 16], согласно которым, наличие тугоплавких компонент в сплаве приводит к увеличению сопротивляемости к деформационно-индуцированному структурному искажению, а также к снижению скорости деструктивного распухания поврежденного слоя при увеличении флюенса облучения, результаты которого представлены на рисунке 3. Общий вид представленных зависимостей объемного распухания кристаллической структуры поврежденного приповерхностного слоя свидетельствует о положительном влиянии добавления в состав NbTi сплава ванадия и циркония, наличие которых обуславливает

не только увеличение сопротивляемости деформационным искажениям, но и объемному распуханию, наиболее проявленному при высоких флюенсах облучения (10^{14} – 10^{15} ион/см²).

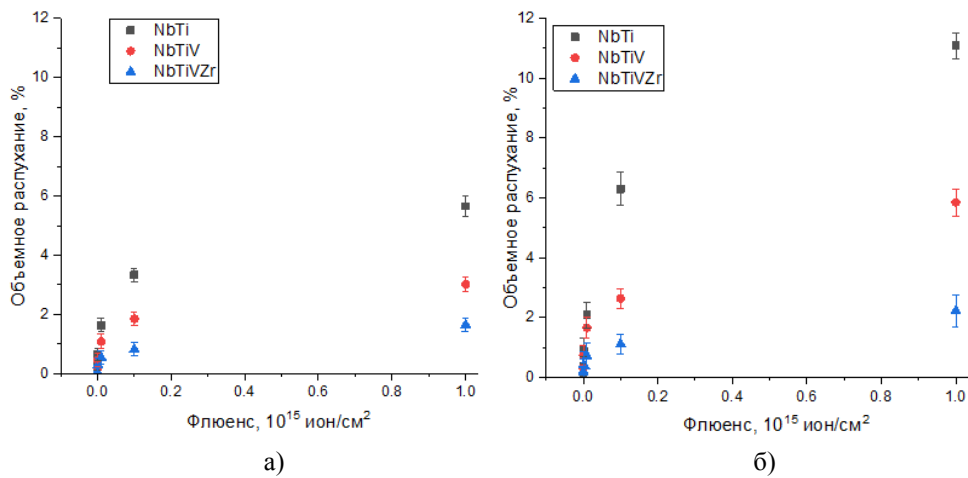


Рис. 3. Результаты оценки деформационного объемного распухания приповерхностного слоя исследуемых сплавов в зависимости от флюенса облучения: а) в случае облучения ионами Kr^{15+} ; б) в случае облучения ионами He^{23+}

На рисунке 4 представлены результаты трибологических испытаний исследуемых сплавов в зависимости от флюенса облучения различными типами ионов. Полученные зависимости изменения величины коэффициента сухого трения в зависимости от флюенса облучения свидетельствуют об изменении износостойкости поверхности сплавов в зависимости от флюенса облучения и, как следствие, объемного распухания а также деформационного искажения приповерхностного слоя. Общий вид представленных зависимостей изменения коэффициента сухого трения от количества циклов испытаний свидетельствует о негативном влиянии накопленных структурных искажений в приповерхностном слое на износостойкость поверхности, которое выражается в увеличении коэффициента сухого трения при длительном механическом воздействии. При этом наиболее выраженные изменения коэффициента сухого трения наблюдаются при флюенсах облучения 10^{13} – 10^{15} ион/см², для которых характерно формирование эффекта перекрытия локально изолированных дефектных включений в приповерхностном слое, что приводит к выраженному объемному распуханию и деформационному искажению кристаллической решетки. Подобные эффекты обуславливают формирование напряженных и метастабильных деформированных включений, которые под действием внешних факторов в виде механического воздействия образуют дополнительные препятствия, что увеличивает трение и снижает износостойкость поверхности за счет растрескивания и отшелушивания, что, как следствие, образует более выраженные полосы при трении.

При этом наиболее выраженные данные эффекты проявляются для NbTi сплавов, в то время как добавление в сплав ванадия и циркония приводит к увеличению устойчивости сплава к износу и деградации.

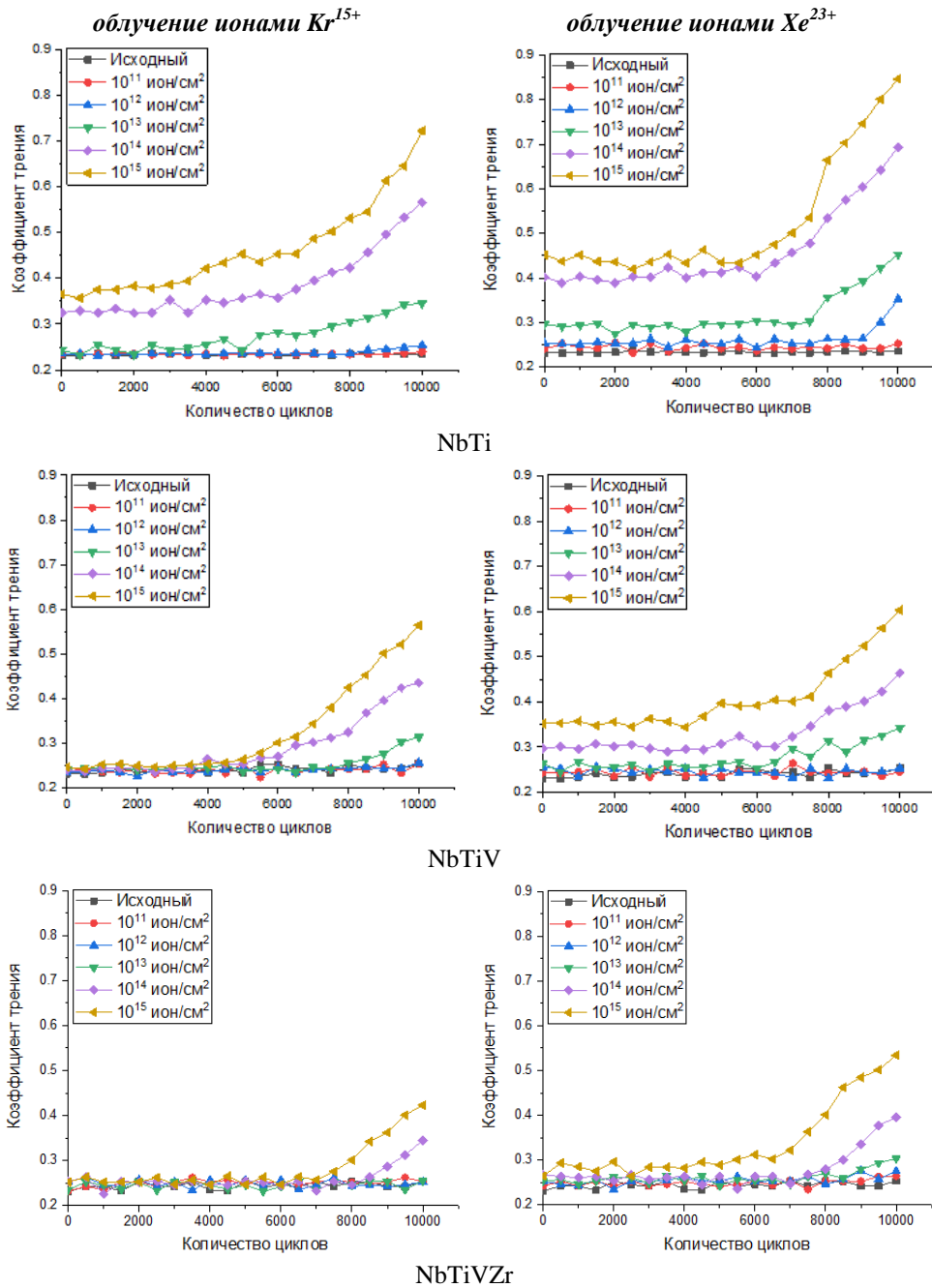
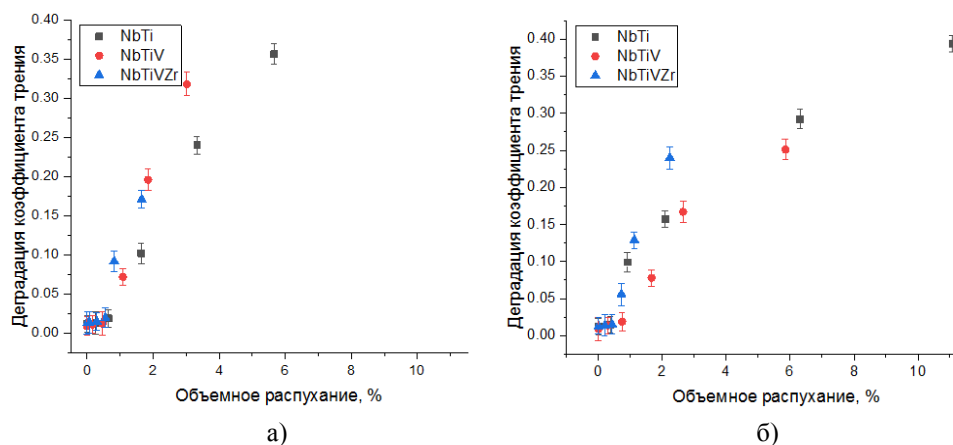


Рис. 4. Результаты измерений трибологических характеристик исследуемых сплавов в зависимости от флюенса облучения при изменении типа ионов облучения

На рисунке 5 представлены результаты сравнительного анализа изменений величины коэффициента сухого трения, отражающие деградацию износостойкости приповерхностного поврежденного слоя и величины объемного распухания, связанного с накоплением радиационных повреждений. Определение деградации износостойкости приповерхностного поврежденного слоя оценивалось по изменению коэффициента сухого трения в начальном состоянии и после 10 000 циклов трения.



прочностных свойств приповерхностного слоя и его устойчивости к радиационному набуханию, связанному с накоплением деформационных растягивающих напряжений.

На основе проведенных исследований трибологических характеристик (изменений коэффициента сухого трения) были определены основные механизмы, влияющие на ухудшение прочностных свойств и потерю износостойкости поврежденного слоя сплавов, а также установлены зависимости влияния вариации соотношения компонент в сплавах на износостойкость в зависимости от флюенса облучения и атомных смещений в случае облучения тяжелыми ионами. На основе полученных зависимостей были определены взаимосвязи между изменением структурных особенностей и устойчивости к износу. Согласно полученным данным установлено, что добавление в сплав ванадия и циркония приводит не только к увеличению устойчивости к объемному набуханию, но и увеличению износостойкости приповерхностного слоя в результате многократных механических воздействий на поверхность сплава при их трении.

Список источников

1. Microstructures, mechanical properties, and irradiation tolerance of the Ti–Zr–Nb–V–Mo refractory high-entropy alloys / H. Zhang, Z. Zhu, H. Huang [et al.]. – Text : electronic // *Intermetallics*. – 2023. – Vol. 157. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2023.107873>.
2. From high-entropy alloys to high-entropy ceramics : The radiation-resistant highly concentrated refractory carbide (CrNbTaTiW)C / M. A. Tunes, S. Fritze, B. Osinger [et al.]. – Text : electronic // *Acta Materialia*. – 2023. – Vol. 250. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2023.118856>.
3. Irradiation-Hardening Model of TiZrHfNbMo0.1 Refractory High-Entropy Alloys / Y. Fan, X. Wang, Y. Li [et al.]. – Text : electronic // *Entropy*. – 2024. – Vol. 26, Issue 4. – URL: <https://doi.org/10.3390/e26040340>.
4. Enhanced plasticity in a Zr-rich refractory high-entropy alloy via electron irradiation / J. Hao, Y. Zhang, Q. Wang [et al.]. – Text : electronic // *Journal of Nuclear Materials*. – 2024. – Vol. 590. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2023.154876>.
5. Interactions between edge dislocation and irradiation dislocation loop in BCC refractory high entropy alloys and the lattice distortion effect on irradiation hardening behavior / J. Li, Y. Zhu, L. Zhao [et al.]. – Text : electronic // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2024. – Vol. 1002. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.175286>.
6. A comparative study of irradiation response in amorphous TaTiWVCr refractory high entropy alloy with the counterpart of tungsten films / G. Pu, S. Sun, S. Wang [et al.]. – Text : electronic // *Intermetallics*. – 2023. – Vol. 156. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2023.107850>.
7. Review on preparation technology and properties of refractory high entropy alloys / X. Ren, Y. Li, Y. Qi, B. Wang. – Text : electronic // *Materials*. – 2022. – Vol. 15, Issue 8. – URL: <https://doi.org/10.3390/ma15082931>.

8. A quinary WTaCrVHf nanocrystalline refractory high-entropy alloy with-holding extreme irradiation environments / O. El Atwani, H. T. Vo, M. A. Tunes [et al.]. – Text : electronic // *Nature Communications*. – 2023. – Vol. 14, Issue 1. – URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38000-y>.
9. On the room-temperature mechanical properties of an ion-irradiated TiZrNbHfTa refractory high entropy alloy / M. Moschetti, A. Xu, B. Schuh [et al.]. – DOI 10.1007/s11837-019-03861-6. – Direct text // *Jom*. – 2020. – Vol. 72. – P. 130–138.
10. Irradiation-induced swelling and hardening in HfNbTaTiZr refractory high-entropy alloy / S. Chang, K. K. Tseng, T. Y. Yang [et al.]. – Text : electronic // *Materials letters*. – 2020. – Vol. 272. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.127832>.
11. Ion irradiation response and mechanical behavior of reduced activity high entropy alloy / M. Sadeghilaridjani, A. Ayyagari, S. Muskeri [et al.]. – Text : electronic // *Journal of Nuclear Materials*. – 2020. – Vol. 529. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2019.151955>.
12. Irradiation resistance in Al x CoCrFeNi high entropy alloys / S. Q. Xia, X. Yang, T. F. Yang [et al.]. – Text : electronic // *Jom*. – 2015. – Vol. 67. – URL: <https://doi.org/10.1007/s11837-015-1568-4>.
13. In-situ study of heavy ion irradiation induced lattice defects and phase instability in β -Zr of a Zr–Nb alloy / H. Yu, Q. Dong, Z. Yao [et al.]. – DOI 10.1016/j.jnucmat.2019.05.028. – Direct text // *Journal of Nuclear Materials*. – 2019. – Vol. 522. – P. 192–199.
14. Effects of Structural Radiation Disorder in the Near-Surface Layer of Alloys Based on NbTiVZr Compounds Depending on the Variation of Alloy Components / S. G. Giniyatova, K. K. Kadyrzhanov, D. I. Shlimas [et al.]. – Text : electronic // *Crystals*. – 2023. – Vol. 13, Issue 11. – URL: <https://doi.org/10.3390/cryst13111543>.
15. Zhang, Z. The effects of irradiation on CrMnFeCoNi high-entropy alloy and its derivatives / Z. Zhang, D. E. J. Armstrong, P. S. Grant. – Text : electronic // *Progress in Materials Science*. – 2022. – Vol. 123. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2021.100807>.
16. Phase stability and microstructures of high entropy alloys ion irradiated to high doses / S. Xia, M. C. Gao, T. Yang [et al.]. – DOI 10.1016/j.jnucmat.2016.08.017. – Direct text // *Journal of Nuclear Materials*. – 2016. – Vol. 480. – P. 100–108.

References

1. Zhang, H., Zhu, Z., Huang, H., He, T., Yan, H., Zhang, Y.,... Li, T. (2023). Microstructures, mechanical properties, and irradiation tolerance of the Ti–Zr–Nb–V–Mo refractory high-entropy alloys. *Intermetallics*, 157. (In English). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2023.107873>
2. Tunes, M. A., Fritze, S., Osinger, B., Willenshofer, P., Alvarado, A. M., Martinez, E.,... El-Atwani, O. (2023). From high-entropy alloys to high-entropy ceramics: The radiation-resistant highly concentrated refractory carbide (CrNbTaTiW) C. *Acta Materialia*, 250. (In English). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2023.118856>

3. Fan, Y., Wang, X., Li, Y., Lan, A., & Qiao, J. (2024). Irradiation-Hardening Model of TiZrHfNbMo0.1 Refractory High-Entropy Alloys. *Entropy*, 26(4). (In English). Available at: <https://doi.org/10.3390/e26040340>
4. Hao, J., Zhang, Y., Wang, Q., Ma, Y., Sun, L., & Zhang, Z. (2024). Enhanced plasticity in a Zr-rich refractory high-entropy alloy via electron irradiation. *Journal of Nuclear Materials*, 590. (In English). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2023.154876>
5. Li, J., Zhu, Y., Zhao, L., Liang, S., Huang, M., & Li, Z. (2024). Interactions between edge dislocation and irradiation dislocation loop in BCC refractory high entropy alloys and the lattice distortion effect on irradiation hardening behavior. *Journal of Alloys and Compounds*, 1002. (In English). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.175286>
6. Pu, G., Sun, S., Wang, S., Gan, L., Chen, S., Ye, Z.,... Wang, Y. (2023). A comparative study of irradiation response in amorphous TaTiWVCr refractory high entropy alloy with the counterpart of tungsten films. *Intermetallics*, 156. (In English). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2023.107850>
7. Ren, X., Li, Y., Qi, Y., & Wang, B. (2022). Review on preparation technology and properties of refractory high entropy alloys. *Materials*, 15(8). (In English). Available at: <https://doi.org/10.3390/ma15082931>
8. El Atwani, O., Vo, H. T., Tunes, M. A., Lee, C., Alvarado, A., Krienke, N.,... Martinez, E. (2023). A quinary WTaCrVHf nanocrystalline refractory high-entropy alloy withstanding extreme irradiation environments. *Nature Communications*, 14(1). (In English). Available at: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38000-y>
9. Moschetti, M., Xu, A., Schuh, B., Hohenwarter, A., Couzinie, J. P., Krusic, J. J.,... Gludovatz, B. (2020). On the room-temperature mechanical properties of an ion-irradiated TiZrNbHfTa refractory high entropy alloy. *Jom*, 72, pp. 130-138. (In English). DOI: 10.1007/s11837-019-03861-6
10. Chang, S., Tseng, K. K., Yang, T. Y., Chao, D. S., Yeh, J. W., & Liang, J. H. (2020). Irradiation-induced swelling and hardening in HfNbTaTiZr refractory high-entropy alloy. *Materials letters*, 272. (In English). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.127832>
11. Sadeghilaridjani, M., Ayyagari, A., Muskeri, S., Hasannaemi, V., Salloom, R., Chen, W. Y., & Mukherjee, S. (2020). Ion irradiation response and mechanical behavior of reduced activity high entropy alloy. *Journal of Nuclear Materials*, 529. (In English). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2019.151955>
12. Xia, S. Q., Yang, X., Yang, T. F., Liu, S., & Zhang, Y. (2015). Irradiation resistance in Al x CoCrFeNi high entropy alloys. *Jom*, 67. (In English). Available at: <https://doi.org/10.1007/s11837-015-1568-4>
13. Yu, H., Dong, Q., Yao, Z., Zhang, H. K., Kirk, M. A., & Daymond, M. R. (2019). In-situ study of heavy ion irradiation induced lattice defects and phase instability in β -Zr of a Zr-Nb alloy. *Journal of Nuclear Materials*, 522, pp. 192-199. (In English). DOI: 10.1016/j.jnucmat.2019.05.028
14. Giniyatova, S. G., Kadyrzhanov, K. K., Shlimas, D. I., Borgekov, D. B., Uglov, V. V., Kozlovskiy, A. L., & Zdorovets, M. V. (2023). Effects of Structural Radiation Disorder in the Near-Surface Layer of Alloys Based on NbTiVZr Compounds Depending on the Variation of Alloy Components. *Crystals*, 13(11). (In English). Available at: <https://doi.org/10.3390/cryst13111543>

15. Zhang, Z., Armstrong, D. E., & Grant, P. S. (2022). The effects of irradiation on CrMnFeCoNi high-entropy alloy and its derivatives. *Progress in Materials Science*, 123. (In English). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2021.100807>

16. Xia, S., Gao, M. C., Yang, T., Liaw, P. K., & Zhang, Y. (2016). Phase stability and microstructures of high entropy alloys ion irradiated to high doses. *Journal of Nuclear Materials*, 480, pp. 100-108. (In English). DOI: 10.1016/j.jnucmat.2016.08.017

Информация об авторах / Information about the authors

Кадыржанов Кайрат Камалович, доктор физико-математических наук, профессор, Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, г. Астана, Республика Казахстан,

Kairat K. Kadyrzhanov, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Republic of Kazakhstan

Козловский Артем Леонидович, PhD, преподаватель-исследователь, Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, г. Астана; Атырауский университет им. Х. Досмухамедова, г. Атырау, Республика Казахстан, Kozlovskiy.a@inp.kz

Artem L. Kozlovskiy, PhD, Teacher-Researcher, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana; Atyrau University named after Kh. Dosmukhamedov, Atyrau, Republic of Kazakhstan, Kozlovskiy.a@inp.kz

Шлимас Дмитрий Игорьевич, PhD, преподаватель-исследователь Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, г. Астана, Республика Казахстан

Dmitriy I. Shlimas, PhD, Teacher-Researcher, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Republic of Kazakhstan

Молдабаева Гульназ Жаксылыковна, доктор технических наук, профессор кафедры нефтяной инженерии, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы, Республика Казахстан

Gulnaz Zh. Moldabayeva, Doctor of Engineering, Professor at the Department of Petroleum Engineering, Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan

Статья поступила в редакцию 25.06.2024; одобрена после рецензирования 04.07.2024; принята к публикации 08.07.2024.

The article was submitted 25.06.2024; approved after reviewing 04.07.2024; accepted for publication 08.07.2024.