

УДК 53.091, 54-722, 54-724  
DOI: 10.31660/0445-0108-2023-5-55-66

## Применение ионной и электронной модификации нитридных покрытий для защиты от коррозии при наводороживании

К. К. Кадыржанов<sup>1</sup>, А. Л. Козловский<sup>1,2\*</sup>, Д. И. Шлимас<sup>1</sup>,  
Г. Ж. Молдабаева<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, Астана, Республика Казахстан

<sup>2</sup>Атырауский университет им. Х. Досмухамедова, Атырау, Республика Казахстан

<sup>3</sup>Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Алматы, Республика Казахстан

\*Kozlovskiy.a@inp.kz

**Аннотация.** Одним из способов повышения устойчивости стальных конструкций и нефтепроводов к процессам наводороживания при эксплуатации является нанесение на них тонких слоев в виде нитридных или оксидных покрытий, которые обладают более высокими показателями устойчивости к коррозионным процессам. В работе представлены результаты оценки применения ионной и электронной модификации нитридных покрытий (TiN), нанесенных на нержавеющую сталь, с целью повышения их устойчивости к процессам наводороживания и деструкции при накоплении водорода в приповерхностном слое, вызывающем его охрупчивание и коррозию. В качестве ионов для модификации покрытий были выбраны ионы  $O^{2+}$  и  $N^{2+}$  с энергией 20 кэВ/заряд, флюенсы облучения составили  $10^{13}$ – $10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>. Для проведения модификации с применением электронов были использованы электроны с энергией 500 кэВ и дозами облучения 100–500 кГр. В результате проведенных экспериментов было установлено, что ионная модификация приводит к формированию в структуре дополнительных дислокационных дефектов, накопление которых приводит к увеличению прочности и устойчивости к растрескиванию. В случае электронного облучения основной эффект модификации заключается в тепловом воздействии, приводящем к повышению стабильности кристаллической структуры, а также ее уплотнению. Анализ эффектов наводороживания и коррозии образцов показал, что ионная модификация с флюенсом  $5 \times 10^{13}$  ион/см<sup>2</sup> приводит к увеличению стабильности структуры покрытий, а также увеличению потенциалов коррозии.

**Ключевые слова:** наводороживание, коррозия, деградация, нитридные покрытия, защитные материалы, ионная модификация

**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:** Применение ионной и электронной модификации нитридных покрытий для защиты от коррозии при наводороживании / К. К. Кадыржанов, А. Л. Козловский, Д. И. Шлимас, Г. Ж. Молдабаева. – DOI 10.31660/0445-0108-2023-5-55-66 // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2023. – № 5. – С. 55–66.

## Application of ionic and electronic modification of nitride coatings for protection against corrosion during hydrogen feature

Kairat K. Kadyrzhanov<sup>1</sup>, Artem L. Kozlovskiy<sup>1,2\*</sup>, Dmitriy I. Shlimas<sup>1</sup>,  
Gulnaz Zh. Moldabayeva<sup>3</sup>

<sup>1</sup>L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, the Republic of Kazakhstan

<sup>2</sup>Atyrau University named after Kh. Dosmukhamedov, Atyrau, the Republic of Kazakhstan

<sup>3</sup>Satbayev University, Almaty, the Republic of Kazakhstan

\*Kozlovskiy.a@inp.kz

**Abstract.** Applying nitride or oxide coatings in the form of thin layers is a method that can enhance steel structures and resilience of oil pipelines against flooding and corrosion. Such coatings have excellent corrosion-resistant properties. The article presents the results of an assessment of the use of both ionic and electronic modifications of nitride coatings (TiN) on stainless steel to enhance its resilience against hydrogenation and degradation processes occurring during the hydrogen accumulation in the surface layer. These processes lead to embrittlement and corrosion of steel.  $O^{2+}$  and  $N^{2+}$  ions with an energy of 20 keV/charge were chosen as ions for modifying the coatings; the irradiation fluences were in the range of  $10^{13}$ - $10^{15}$  ion/cm<sup>2</sup>. Electrons with an energy of 500 keV and radiation doses from 100 to 500 kGy were utilised to carry out the electron modification process. The experimental results indicate that modifying the ionic content contributes to the creation of more dislocation defects in the structure. This accumulation of defects results in improved strength and resistance to cracking. Through electron irradiation, the thermal effect primarily modifies the crystal structure, enhancing both its stability and densification. An analysis of the effect of hydrogenation and corrosion has demonstrated that ionic modification using a fluence of  $5 \times 10^{13}$  ion/cm<sup>2</sup> enhances the stability of the coating structure and elevates corrosion potentials.

**Keywords:** hydrogenation, corrosion, degradation, nitride coatings, protective materials, ionic modification

**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. (2023). Application of ionic and electronic modification of nitride coatings for protection against corrosion during hydrogen feature. *Oil and Gas Studies*, (5), pp. 55-66. (In Russian). DOI: 10.31660/0445-0108-2023-5-55-66

## Введение

Процессы наводораживания сопровождаются прямым воздействием на материал, связанным с проникновением водорода в приповерхностный слой стали, образуя в ней деформационные включения в виде газонаполненных пузырьков [1]. Формирование подобных пузырьков в порах может привести к деструктивному охрупчиванию и ускоренной коррозии приповерхностного слоя, что впоследствии может привести к деструкции материалов или формированию областей, вблизи которых происходит накопление парафиновых осадков, что снижает скорость прокачки. При этом формирование коррозионных включений в виде питтингов может привести к разрастанию наростов внутри трубопроводов, что при внешних давлениях может спровоцировать аварии, связанные с разрушением и образованием трещин [2, 3]. В последнее время для повышения стабильности и устойчивости к коррозии, а также высокотемпературным режимам эксплуатации сталей или стальных конструкций предлагается нанесение на них различных типов покрытий,

способных защитить от ускоренной деградации [4]. В основе данных принципов защиты лежит теория о том, что защитные покрытия обладают отличной от основного материала структурой и свойствами, что позволяет снизить негативное влияние коррозионных процессов при снижении скорости проникновения водорода или кислорода в материал стали за счет нанесенного барьерного слоя [5, 6]. Еще одним из способов защиты является создание в приповерхностном слое стальных конструкций барьерного слоя с высокой плотностью дислокаций и структурных искажений, вызванных механическим воздействием (прокаткой) или термомеханическим воздействием (прокаткой при высокой температуре) [7, 8]. В результате чего в приповерхностном слое, который наиболее подвержен внешним воздействиям, создается барьерный слой, состоящий из дислокаций и деформационных включений, высокая плотность которых приводит к торможению распространения микротрещин, а также понижает проникающую способность водорода и кислорода при взаимодействии с агрессивными средами или в процессе эксплуатации. Однако обе эти методики имеют как положительные, так и отрицательные стороны.

С положительной стороны методы защиты от коррозии с использованием нанесения тонких пленок характеризуются как один из наиболее перспективных методов, использование которого, хоть и требует высокоточного и дорогостоящего оборудования, позволяет значительно повысить срок эксплуатации сталей и сплавов. Однако не всегда данные покрытия способны защитить от ускоренной деградации, которая в первую очередь зависит от условий эксплуатации, а также скорости накопления продуктов коррозии при взаимодействии с агрессивными средами. В случае использования методов механической деформации приповерхностного слоя для создания барьерного защитного слоя в сталях и сплавах пересыщение дислокациями может привести к отслаиванию или охрупчиванию данного слоя, что при внешних воздействиях в случае взаимодействия с агрессивной средой может ускорить процессы деструкции и наводороживания.

На основании вышесказанного ключевой идеей данной работы является совмещение двух методов повышения устойчивости сталей и сплавов к процессам наводороживания. В качестве защитных покрытий в работе рассматриваются нитридные покрытия, нанесенные на сталь 316L методом магнетронного напыления, а создание дислокационной плотности в данном покрытии предлагается формировать путем ионной и электронной модификации. В основе данной теории лежит следующее предположение. Модифицированное путем ионного или электронного воздействия нанесенное покрытие будет обладать повышенной устойчивостью к деструктивному изменению структурных и прочностных свойств при наводороживании структуры [9, 10], а также существенно снижать скорость коррозии не только покрытий, но и стали.

### **Объект и методы исследования**

В качестве объектов исследования были выбраны нитридные покрытия на основе нитрида титана (TiN), полученные методом магнетронного напыления на поверхность стали 316L. С применением метода эллипсометрии, а также с использованием полученных снимков боковых сколов была определена толщина наносимых покрытий, которая составила порядка  $500 \pm 10$  нм.

Модификация полученных защитных покрытий проводилась путем облучения тяжелыми ионами  $O^{2+}$  и  $N^{2+}$  с энергией 20 кэВ/заряд на ускорителе тяжелых ионов ДЦ-60 (Институт ядерной физики, г. Алматы, Республика Казахстан). Флюенс ионов составлял от  $10^{13}$  до  $10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>, выбор которого обусловлен возможностями моделирования радиационных повреждений с эффектом их перекрытия (а в случае флюенсов выше  $10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> глубокого перекрытия) в приповерхностном слое на глубине порядка 400–500 нм, что соответствует толщине наносимых покрытий.

Для модификации с применением электронов был задействован линейный ускоритель ИЛУ-10 (Институт ядерной физики, г. Алматы, Республика Казахстан). Облучение было произведено электронным пучком с энергией электронов 500 кэВ и дозами от 100 до 500 кГр. Подбор условий модификации был осуществлен с учетом возможности максимальной передачи энергии налетающих частиц в нанесенном покрытии с целью внесения в него структурных изменений.

Определение прочностных характеристик (твердости образцов) проводилось с применением метода индентирования, реализованном на микротвердомере Duroline M1 (Metkon, г. Бурса, Турция). В качестве индентера использовалась алмазная пирамида Виккерса, нагрузка на индентер составляла 100 Н. Время измерения составляло 15 с, после нагрузки измерялся отпечаток индентера, на основе которого определялась величина твердости. Упрочнение было оценено путем сравнения данных изменения твердости покрытия до и после ионной и электронной модификации.

### **Постановка эксперимента**

Наводораживание приповерхностного слоя исследуемых образцов осуществлялось электрохимической зарядкой (плотность тока 20 мА/см<sup>2</sup>) в водном растворе 3 % гидроксида натрия и 3 г/л  $CH_4N_2S$  при температуре 80 °С в течение 24 часов. Оценку влияния наводораживания на изменение прочностных характеристик и устойчивость к распуханию проводили методом оценки степени изменения структурных параметров, основанном на изменении объема кристаллической решетки, измеренной до и после наводораживания образцов.

Испытания на сохранение стабильности к коррозии были проведены путем измерения коррозионного потенциала, а также определения зависимости коррозионного потенциала от тока коррозии. Для проведения экспериментов использовался стандартный раствор 0,1 М раствора серной

кислоты ( $H_2SO_4$ ). Измерения проводились с использованием трехэлектродной ячейки, в которой образец использовался в качестве рабочего электрода, в качестве противоиэлектрода использовался платиновый электрод и хлор-серебряный электрод использовался в качестве электрода сравнения.

### Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлены данные изменения твердости нитридных покрытий до и после проведения ионной и электронной модификации, отражающей влияние модификации на прочностные характеристики покрытий.

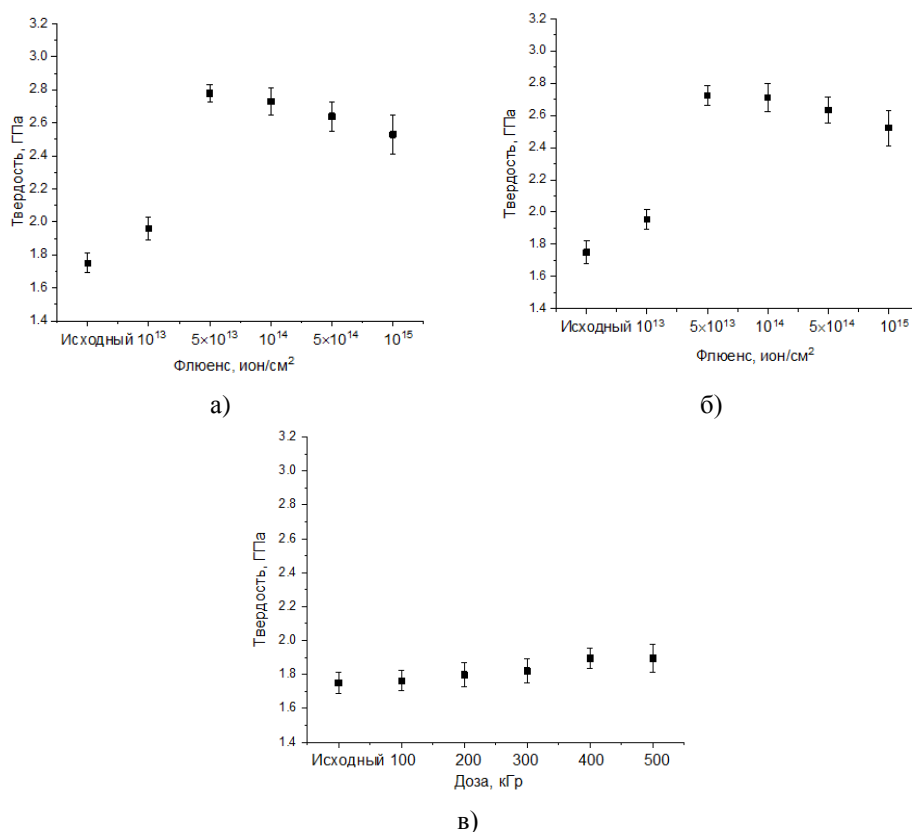


Рис. 1. Данные изменения значений твердости до и после ионной (а — при облучении ионами  $O^{2+}$ , б — при облучении ионами  $N^{2+}$ ) и электронной модификации (в)

Согласно данным, представленным на рисунке 1 а, б, в случае ионной модификации наблюдается два характерных участка, свидетельствующих о различном влиянии облучения на изменение прочностных характеристик.

Первый участок характеризуется изменениями твердости, связанными с ее упрочнением, то есть увеличением твердости в зависимости от увеличения флюенса облучения. В этом случае упрочнение обусловлено накоплением структурных изменений, при которых увеличение дислокационной плотности приводит к упрочнению за счет создания дополнительных граничных

эффектов, препятствующих распространению микротрещин при внешнем воздействии. При этом максимальное упрочнение (то есть увеличение значений твердости) для обоих типов ионного облучения наблюдается при флюенсах облучения  $5 \times 10^{13}$  ион/см<sup>2</sup>. При дальнейшем увеличении флюенса облучения твердость образцов снижается, однако снижение составляет не более 3–10 % в сравнении с максимальной величиной (рис. 2).

В случае облучения электронами с энергией 500 кэВ изменение твердости с увеличением дозы облучения незначительно, что объясняется природой взаимодействия электронов с материалом, а также малыми размерами самих электронов, неспособных привести к серьезным структурным изменениям. Согласно данным изменения упрочнения покрытий, при облучении электронами при дозах выше 400 кэВ наблюдается уменьшение тренда роста упрочнения, что свидетельствует об эффекте насыщения структурных изменений, вызванных облучением электронами. При этом максимальное упрочнение в случае электронного облучения составляет порядка 8 %, в то время как при ионной модификации максимальное упрочнение составляет порядка 55–58 %, что более чем в 5 раз выше. При этом в отличие от электронного облучения при увеличении флюенса облучения тяжелыми ионами выше  $10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> наблюдается снижение твердости относительно максимального значения, достигнутого при флюенсе облучения  $5 \times 10^{13}$  ион/см<sup>2</sup> (см. рис. 2).

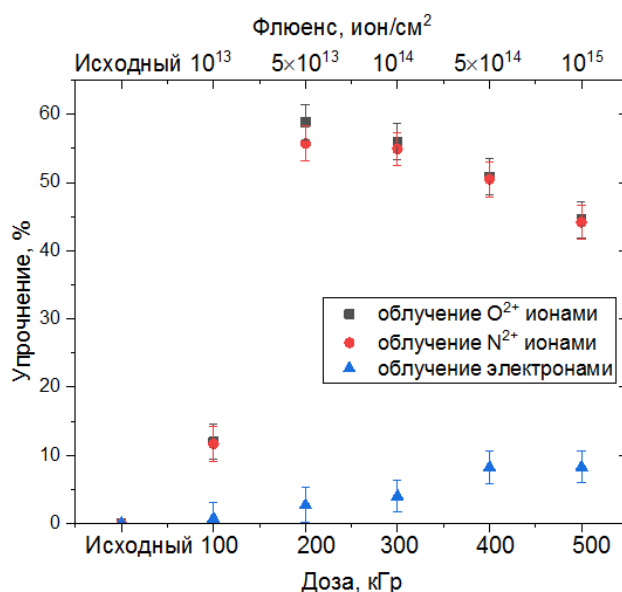


Рис. 2. Данные упрочнения нитридных покрытий в результате облучения ионами и электронами

Снижение твердости при высокодозном облучении может быть объяснено следующими факторами. Во-первых, при облучении тяжелыми ионами (в особенности низкоэнергетическими) основные механизмы взаимодействия ионов с материалом, в частности с электронными оболочками

и ядрами, происходят равновероятно, что приводит к возникновению эффектов перераспределения электронной плотности, а также смещению атомов из позиций. Перераспределение электронной плотности, в свою очередь, сопровождается возникновением вакансионных дефектов, а также искажением кристаллической структуры, что при определенных условиях воздействия в силу эффекта накопления приводит к изменению размеров зерен, и как следствие, увеличению дислокационной плотности (при условии, что размеры зерен уменьшаются). Выбивание же атомов из узлов кристаллической решетки или их смещение приводит к резкому увеличению деформационных искажений, что, в свою очередь, сопровождается возникновением в структуре областей разупорядочения, способных привести к аморфизации. В этой связи увеличение флюенса облучения приводит к тому, что два эффекта (изменение дислокационной плотности и деформационное искажение, приводящее к аморфизации), связанные с взаимодействием ионов с кристаллической структурой, начинают конкурировать друг с другом, что приводит к снижению прочностных характеристик при большой концентрации дефектных включений. В этом случае также с негативной точки зрения может играть и большая концентрация дислокаций, пересыщение которыми может привести к резкому ухудшению прочностных свойств и растрескиванию при внешних воздействиях. Также при высокодозном облучении следует учитывать фактор деформационного объемного искажения структуры, связанного с выдавливанием на поверхность деформированного объема, что, в свою очередь, может привести к образованию хиллоподобных включений на поверхности, наличие которых может привести к созданию дополнительных активационных центров для коррозии и накопления парафиновых отложений. В этой связи следует учитывать данный фактор изменения морфологии поверхности покрытий при ионной модификации.

На рисунке 3 представлены результаты изменения величины объемного наводораживания кристаллической решетки в результате проведенных экспериментов по наводораживанию.

Как видно из представленных данных, нанесение TiN покрытия на поверхность стало приводить к снижению степени наводораживания почти в 2 раза, что свидетельствует об увеличении устойчивости к деградации при накоплении водорода в приповерхностном слое. В этом случае нанесение покрытия приводит к снижению скорости проникновения водорода в структуру материала, а также снижает его способность к агломерации. Для образцов, облученных ионами  $O^{2+}$  и  $N^{2+}$ , увеличение флюенса облучения приводит к снижению величины объемного распухания кристаллической решетки до 1,5–1,6 %, что более чем в 2,5 раза меньше аналогичной величины для немодифицированных покрытий, а также более чем в 7 раз ниже величины распухания для стали 316L. При этом наиболее эффективным способом модификации является ионное облучение  $O^{2+}$  и  $N^{2+}$  с флюенсом  $5 \times 10^{13}$  ион/см<sup>2</sup>, при котором наблюдается наименьшее значение величины объемного распухания.

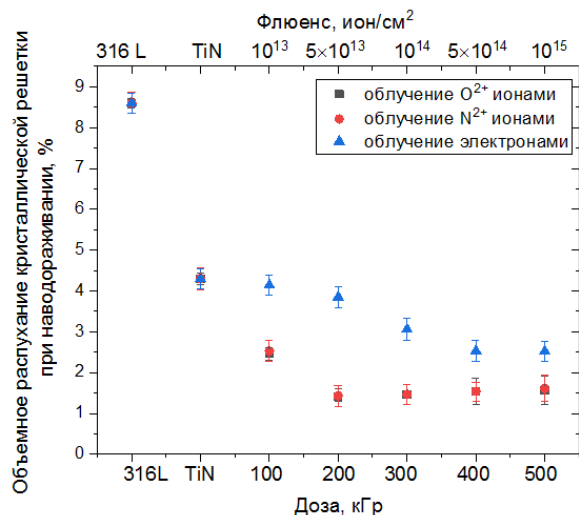


Рис. 3. Результаты изменения величины объемного распухания кристаллической решетки при наводораживании исследуемых образцов

В случае электронной модификации снижение величины распухания наиболее проявляется при дозах 400–500 кГр, а сама величина распухания сравнима с величинами распухания, полученными для образцов, модифицированных ионами O<sup>2+</sup> и N<sup>2+</sup> с флюенсом 10<sup>13</sup> ион/см<sup>2</sup>. Таким образом, из полученных данных можно сделать вывод о том, что использование электронной модификации наиболее эффективно при дозах 400–500 кГр, в то время как при облучении ионами O<sup>2+</sup> и N<sup>2+</sup> наиболее эффективными являются флюенсы 5 × 10<sup>13</sup> ион/см<sup>2</sup>.

На рисунке 4 представлены результаты разупрочнения в результате наводораживания нитридных покрытий.

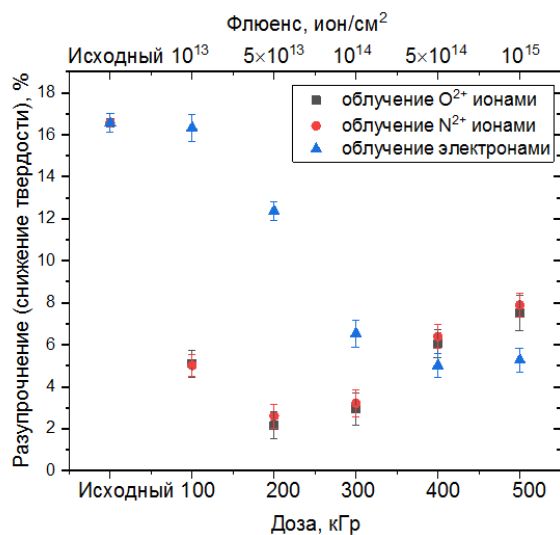


Рис. 4. Результаты разупрочнения покрытий при наводораживании



Анализ результатов изменения величины твердости после процессов наводораживания свидетельствует о том, что ионная модификация приводит к существенному увеличению устойчивости к деградации, вызванной процессами наводораживания, что, в свою очередь, свидетельствует о позитивном влиянии ионной модификации, связанной с созданием в приповерхностном слое дислокационного упрочнения.

В случае электронного облучения основной эффект упрочнения проявляется при дозах 400–500 кГр, применение которых позволяет сохранить высокую стабильность прочностных свойств покрытий (порядка 95 % от начальных значений).

На рисунке 5 представлены результаты оценки изменения коррозионного потенциала в сравнении с данными для стали и модифицированными образцами.

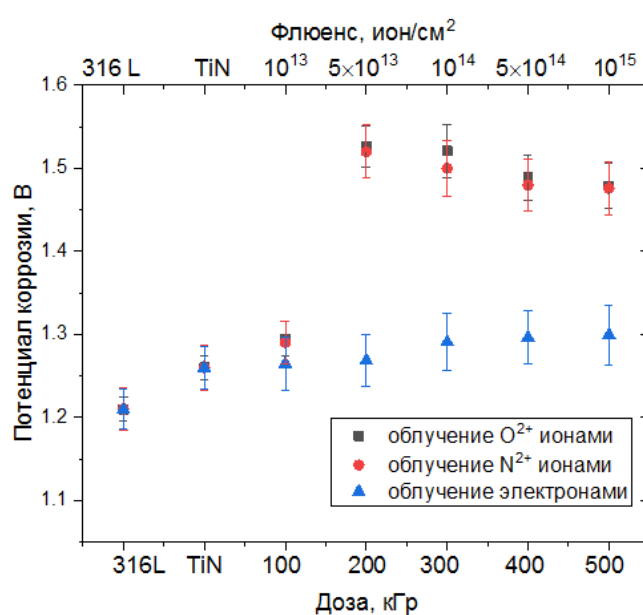


Рис. 5. Результаты оценки величины потенциала коррозии в ходе коррозионных испытаний

Анализ изменения данных коррозионного потенциала показал, что при ионной модификации наблюдается увеличение величины коррозионного потенциала, что свидетельствует о повышении сопротивляемости к деградации при воздействии агрессивных сред. При этом в отличие от нанесенных покрытий, для которых увеличение величины коррозионного потенциала составило не более 4 % в сравнении с величиной для стали 316L, ионная модификация при флюенсах выше  $10^{13}$  ион/см<sup>2</sup> приводит к увеличению коррозионного потенциала более чем на 20 %. Такие изменения характерны для снижения скорости деградации и окисления, а также разупрочнения образцов.

## **Выводы**

В ходе проведенных экспериментальных работ было установлено положительное влияние ионной и электронной модификации не только на изменение прочностных характеристик нанесенных TiN покрытий, но и увеличение устойчивости к наводороживанию и распуханию. При этом облучение тяжелыми ионами  $O^{2+}$  и  $N^{2+}$  с флюенсом  $5 \times 10^{13}$  ион/см<sup>2</sup> приводит к достижению максимальной эффективности в упрочнении нитридных покрытий, связанной с изменением дислокационной плотности и структурными изменениями. В случае электронного облучения с дозами 400–500 кГр упрочнение составляет порядка 8 %, однако устойчивость к распуханию в случае модифицированных покрытий сравнима с данными для модифицированных покрытий в случае облучения тяжелыми ионами с флюенсами  $10^{13}$  ион/см<sup>2</sup>.

## **Список источников**

1. Ionomer Optimization for Water Uptake and Swelling in Anion Exchange Membrane Electrolyzer : Oxygen Evolution Electrode / G. Huang, M. Mandal, N. U. Hassan [et al.]. – Text : electronic // Journal of The Electrochemical Society. – 2020. – Vol. 167, Issue 16. – URL: <https://doi.org/10.1149/1945-7111/abcde3>.
2. Synergistic effects of helium and hydrogen on self-ion-induced swelling of austenitic 18Cr10NiTi stainless steel / O. V. Borodin, V. V. Bryk, A. S. Kalchenko [et al.]. – DOI 10.1016/j.jnucmat.2013.05.022. – Direct text // Journal of Nuclear Materials. – 2013. – Vol. 442, Issue 1–3. – P. S817–S820.
3. Swelling measurement during sorption and decompression in a NBR exposed to high-pressure hydrogen / S. Castagnet, H. Ono, G. Benoit [et al.]. – DOI 10.1016/J.IJHYDENE.2017.06.138. – Direct text // International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. – Vol. 42, Issue 30. – P. 19359–19366.
4. Mechanical characterization of reactively magnetron-sputtered TiN films / F. Vaz, P. Machado, L. Rebouta [et al.]. – Direct text // Surface and Coatings Technology. – 2003. – Vol. 174. – P. 375–382.
5. Investigation of fracture properties of magnetron-sputtered TiN films by means of a FIB-based cantilever bending technique / S. Massl, W. Thomma, J. Keckes, R. Pippan. – DOI 10.1016/j.actamat.2008.12.018. – Direct text // Acta materialia. – 2009. – Vol. 57, Issue. 6. – P. 1768–1776.
6. Influence of particle and energy flux on stress and texture development in magnetron sputtered TiN films / G. Abadias, W. P. Leroy, S. Mahieu, D. Depla. – Text : electronic // Journal of Physics D : Applied Physics. – 2012. – Vol. 46, Issue 5. – URL: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/46/5/055301>.
7. Influence of Friction Stir Processing on the Friction, Wear and Corrosion Mechanisms of Solid-State Additively Manufactured 316L Duplex Stainless Steel / A. Ralls, M. Daroonparvar, A. K. Kasar [et al.]. – Text : electronic // Tribology International. – 2023. – Vol. 178. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.108033>.
8. Ralls, A. M. Friction Stir Processing on the Tribological, Corrosion, and Erosion Properties of Steel : A Review / A. M. Ralls, A. K. Kasar, P. L. Menezes. – DOI 10.3390/jmmp5030097. – Direct text // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2021. – Vol. 5, Issue 3. – P. 97–103.

9. The role of electronic energy loss in ion beam modification of materials / W. J. Weber, D. M. Duffy, L. Thomé, Y. Zhang. – Text : electronic // *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. – 2015. – Vol. 19, Issue 1. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2014.09.003>.

10. Steel thermal sprayed coatings : superficial hardening by Nitrogen ion implantation / M. Belotserkovsky, A. Yelistratov, A. Byeli, V. Kukareko. – Direct text // *Welding journal*. – 2009. – Vol. 88, Issue 12. – P. 243–248.

### **References**

1. Huang, G., Mandal, M., Hassan, N. U., Groenhout, K., Dobbs, A., Mustain, W. E., & Kohl, P. A. (2020). Ionomer Optimization for Water Uptake and Swelling in Anion Exchange Membrane Electrolyzer: Oxygen Evolution Electrode. *Journal of the Electrochemical Society*, 167(16). (In English). Available at: <https://doi.org/10.1149/1945-7111/abcde3>

2. Borodin, O. V., Bryk, V. V., Kalchenko, A. S., Melnichenko, V. V., Voyevodin, V. N., & Garner, F. A. (2013). Synergistic effects of helium and hydrogen on self-ion-induced swelling of austenitic 18Cr10NiTi stainless steel. *Journal of Nuclear Materials*, 442(1-3), pp. S817-S820. (In English). DOI: 10.1016/j.jnucmat.2013.05.022

3. Castagnet, S., Ono, H., Benoit, G., Fujiwara, H., & Nishimura, S. (2017). Swelling measurement during sorption and decompression in a NBR exposed to high-pressure hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(30), pp. 19359-19366. (In English). DOI: 10.1016/J.IJHYDENE.2017.06.138

4. Vaz, F., Machado, P., Rebouta, L., Cerqueira, P., Goudeau, P., Riviere, J. P., & De Rijk, J. (2003). Mechanical characterization of reactively magnetron-sputtered TiN films. *Surface and Coatings Technology*, 174, pp. 375-382. (In English).

5. Massl, S., Thomma, W., Keckes, J., & Pippan, R. (2009). Investigation of fracture properties of magnetron-sputtered TiN films by means of a FIB-based cantilever bending technique. *Acta materialia*, 57(6), pp. 1768-1776. (In English). DOI: 10.1016/j.actamat.2008.12.018

6. Abadias, G., Leroy, W. P., Mahieu, S., & Depla, D. (2012). Influence of particle and energy flux on stress and texture development in magnetron sputtered TiN films. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 46(5). (In English). Available at: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/46/5/055301>

7. Ralls, A., Daroonparvar, M., Kasar, A. K., Misra, M., & Menezes, P. L. (2022). Influence of Friction Stir Processing on the Friction, Wear and Corrosion Mechanisms of Solid-State Additively Manufactured 316L Duplex Stainless Steel. *Tribology International*, 178. (In English). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.108033>

8. Ralls, A. M., Kasar, A. K., & Menezes, P. L. (2021). Friction Stir Processing on the Tribological, Corrosion, and Erosion Properties of Steel: A Review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 5(3), pp. 97-103. (In English). DOI: 10.3390/jmmp5030097

9. Weber, W. J., Duffy, D. M., Thomé, L., & Zhang, Y. (2015). The role of electronic energy loss in ion beam modification of materials. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 19(1). (In English). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2014.09.003>

10. Belotserkovsky, M., Yelistratov, A., Byeli, A., & Kukareko, V. (2009). Steel thermal sprayed coatings: superficial hardening by Nitrogen ion implantation. *Welding journal*, 88(12), pp. 243-248. (In English).

#### **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, the 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@inpr.kz

**Artem L. Kozlovskiy**, PhD, Teacher-Researcher, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Atyrau University named after Kh. Dosmukhamedov, Atyrau, the Republic of Kazakhstan

**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, the 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, the Republic of Kazakhstan

Статья поступила в редакцию 29.09.2023; одобрена после рецензирования 09.10.2023; принята к публикации 11.10.2023.

The article was submitted 29.09.2023; approved after reviewing 09.10.2023; accepted for publication 11.10.2023.