

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-3-136-146>

УДК 538.971

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ИОННОЙ МОДИФИКАЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СОПРОТИВЛЯЕМОСТИ К ВНЕШНИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ

А. Л. Козловский^{1,2*}, Д. И. Шлимас^{1,2}, М. Е. Калиекперов^{1,2}, К. К. Мунасбаева², Д. Б. Боргеков^{1,2}

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

² РГП «Институт ядерной физики» МЭ РК, Алматы, Казахстан

* E-mail для контактов: kozlovskiy.a@inp.kz

Ключевая цель представленных результатов исследования заключается в определении влияния ионной модификации на повышение сопротивляемости многослойных покрытий к внешним воздействиям, включая высокотемпературное окисление, воздействие агрессивных сред и механических нагрузок. В качестве метода ионной модификации был выбран метод облучения низкоэнергетическими ионами N^+ , C^+ , O^+ с энергиями 40 кэВ и флюенсами 10^{13} , 10^{14} и 10^{15} см⁻², выбор которых основан на схожести их массы, а также возможности ускорения их с одинаковой энергией, что позволяет исключить энергетический фактор при оценке эффективности модификации. В ходе проведенных исследований было установлено, что эффект упрочнения, наблюдаемый при облучении низкоэнергетическими ионами имеет прямую зависимость от флюенса облучения, вариация которого приводит к формированию большей плотности структурных дефектов в поврежденном слое, а также практически не зависит от типа ионов используемых для модификации. При этом установлено, что максимальный эффект упрочнения достигается при флюенсах облучения 10^{15} см⁻², при которых упрочнение приповерхностного слоя составляет порядка 10–15% по сравнению с немодифицированными покрытиями. Результаты оценки эффективности устойчивости к внешним механическим воздействиям, в частности, к трению, показали, что формирование деформационного слоя за счет ионной модификации приводит к увеличению сопротивляемости к износу при трении, а также увеличению стабильности поверхности покрытий к процессам деградации.

Ключевые слова: многослойные покрытия, антикоррозионные покрытия, упрочнение, сопротивление деградации, ионная модификация.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение сопротивляемости к внешним воздействиям, связанным с процессами коррозии и окисления, а также механических нагрузок для стальных конструкций является одной из ключевых задач современного материаловедения [1, 2]. Увеличение сопротивляемости к процессам коррозии позволяет повысить сроки эксплуатации, а также снизить затраты на замену металлических конструкций, используемых в условиях агрессивных сред, включая высокотемпературное воздействие. При этом большое внимание в последние годы уделяется поиску возможностей применения различных защитных покрытий, в том числе и многослойных покрытий на основе нитридных и оксидных соединений, использование которых позволяет увеличить сопротивляемость к процессам деструкции при коррозионном воздействии, а также увеличить устойчивость к внешним механическим воздействиям [3–5]. В основе данных исследований лежат следующие гипотезы, основанные на ряде экспериментальных данных, включающих в себя оценку применимости использования тонкопленочных покрытий в качестве так называемых «жертвенных» покрытий, которые наносятся на металлические конструкции, тем самым сдерживают внешние воздействия, замедляя процессы деградации [6–9]. В данном случае структура тонкопленочных покрытий, имеющая отличия от стали позволяет сдерживать процессы диффузии кислорода, водорода, сульфидов,

карбонатов в сталь, тем самым замедляя процессы окисления, которые, как правило, приводят к формированию оксидных включений, пирротин или пиритов и т.д. [10, 11]. Замедление процессов деградации способствует увеличению сопротивляемости стали к процессам окисления приповерхностного слоя, а повышение устойчивости к механическим воздействиям за счет уменьшения скорости износа поверхности при трении позволяет увеличить сроки эксплуатации стальных и металлических конструкций, что снижает затраты на их эксплуатацию и вынужденную замену [12–15].

Основная цель данного исследования заключается в определении влияния воздействия низкоэнергетического ионного облучения на повышение сопротивляемости покрытий к внешним воздействиям [16–18], включая высокотемпературное воздействие, агрессивные среды, а также механическое воздействие в виде трения. Основная гипотеза, лежащая в основе данного исследования, заключается в создании деформационного буферного слоя в многослойных покрытиях путем ионного облучения, повышающего сопротивляемость к внешним воздействиям за счет перемешивания слоев, а также формирования большого количества дислокаций, скопление которых на границах слоев приводит к увеличению сопротивляемости и препятствию процессов окисления при высокотемпературном воздействии. Формирование подобного деформационного слоя в покрытиях позво-

ляет увеличить сопротивляемость к внешним воздействиям, за счет сдерживания процессов деградации и окисления, которое связано с изменением дислокационной плотности вблизи границ слоев, препятствующих распространению микротрещин, возникающих в результате внешних воздействий, а также процессам диффузионного проникновения кислорода и продуктов коррозии при взаимодействии с агрессивными средами. Выбор низкоэнергетического ионного облучения в данном случае обусловлен возможностями создания деформированного слоя заданной толщины в покрытиях без прямого воздействия на поверхность металла с целью избегания прямой деструкции поверхности стали в результате облучения. Для этого были выбраны ионы N^+ , C^+ , O^+ с энергиями 40 кэВ, максимальная глубина пробега которых составляет порядка 350 нм, что при толщине наносимых покрытий порядка 1 мкм свидетельствует о том, что основные изменения, вызванные облучением будут происходить только в приповерхностном слое нанесенных покрытий. При этом использование ионов N^+ , C^+ , O^+ при достаточно больших флюенсах облучения может привести к формированию дополнительных деформационных сжимающих напряжений в поврежденном слое, что приводит к подавлению зародышей трещин при внешних нагрузках, тем самым сдерживания процессы деструкции поврежденного слоя при внешних воздействиях и процессах коррозии. В свою очередь ионное перемешивание в случае высокодозного облучения может привести к «размытию» границ слоев, что повышает адгезионную прочность и сопротивляемость покрытий к отслаиванию при механических нагрузках, а также увеличению устойчивости к процессам термического расширения и деструкции в случае высокотемпературного воздействия. Совокупность данных факторов позволяет рассматривать метод ионной модификации многослойных покрытий как один из перспективных способов повышения устойчивости к адгезивному и абразивному износу, циклических термических воздействиях и процессах коррозии, связанных с воздействием высоких температур или агрессивных сред. Одним из потенциальных способов повышения прочностных характеристик покрытий и пленок является использование метода дисперсионного упрочнения, в основе которого лежит размерный эффект, связанный с уменьшением размеров зерен и созданием большого количества границ зерен, препятствующих распространению микротрещин и сколов. Однако данный метод требует высокого уровня контроля за размерами зерен, так как при очень малых размерах, может инициироваться обратный эффект, приводящий к дестабилизации и разупрочнению.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объектов исследования были выбраны многослойные тонкопленочные покрытия на основе Nb_2O_5 – MoN – AlN , полученных методом магнетронного напыления на поверхности стали марки 316L.

Нанесение покрытий было осуществлено путем послойного напыления слоев оксида ниобия и нитридов молибдена или алюминия, толщиной порядка 150–170 нм. Контроль толщины напыляемых слоев в покрытиях осуществлялся с применением метода эллипсометрии, использование которого позволяет определить равномерность толщины покрытия, а также само значение толщины напыляемого слоя. При этом варьирование соотношением компонент позволило получить двух и трехкомпонентные покрытия. В случае двухкомпонентных покрытий количество слоев составляло по три каждого из компонент, в случае трехкомпонентных покрытий количество каждого выбранного слоя также составляло по три. Контроль за толщиной слоя осуществлялся на основе априорных данных об условиях напыления, путем соблюдения всех требований к параметру нанесения слоев и последующей смене катодов. Согласно данным рентгенофазового анализа получаемые покрытия обладают аморфной или аморфноподобной природой, ввиду явного отсутствия дифракционных рефлексов на дифрактограммах. Также данный эффект может быть обусловлен тем, что в процессе напыления формирование зерен покрытий происходит путем их слияния из малых зерен, размеры которых не позволяют зафиксировать явную дифракционную картину от исследуемых образцов. Согласно проведенным исследованиям было установлено, что вариация слоев в двухкомпонентных покрытиях приводит к незначительному изменению твердости поверхности стали 316L с 1,55 ГПа до 1,73–1,84 ГПа в случае двухкомпонентных покрытий, однако формирование трехкомпонентных покрытий приводит к увеличению твердости до 2,45 ГПа. Таким образом, можно сделать вывод о том, что увеличение количества слоев позволяет увеличить устойчивость к внешним воздействиям за счет межслойных границ, которые в данном случае выступают в качестве сдерживающих факторов при механическом внешнем воздействии в случае индентирования.

Согласно предварительным исследованиям варьирование количеством компонент в составе покрытий приводит к изменению твердости и износостойкости, однако данные параметры можно увеличить за счет создания в приповерхностном слое покрытий деформационно-индуцированного упрочнения за счет облучения низкоэнергетическими ионами N^+ , C^+ , O^+ с энергиями 40 кэВ и флюенсами 10^{13} , 10^{14} и 10^{15} см $^{-2}$. Ионная модификация проводилась на ускорителе тяжелых ионов ДЦ-60, облучение выбранными ионами осуществлялось в вакууме, образцы размещались на специальном водоохлаждаемом держателе, исключающим эффект термического перегрева образцов в процессе облучения. Ввиду аморфной природы полученных покрытий оценки влияния облучения на изменение свойств покрытий проводилась с применением методов оценки механических характеристик, в частности, определения твердости,

износостойкости при испытаниях на сухое трение, а также определения адгезионной прочности на отрыв от поверхности стали 316L. Глубина модификации приповерхностного слоя с использованием ионного облучения, согласно оценке длин пробегов низкоэнергетических ионов N^+ , C^+ , O^+ в материале мишени составляет порядка 250–350 нм. Выбор флюенсов облучения подразумевал формирование в структуре модифицируемого слоя покрытия эффекта перекрытия дефектных включений. При этом выбор ионов позволил исключить эффект распыления покрытия в процессе облучения. Выбор тяжелых ионов для направленной модификации тонких пленок и покрытий не рассматривался, так как при облучении тяжелыми ионами в виду их большой массы и энергии в структуре доминируют деградационные процессы, возникающие в результате взаимодействия ионов с кристаллической структурой. При этом доминирование в результате взаимодействий процессов ионизации приводит к более выраженной дестабилизации приповерхностных слоев, что в свою очередь приводит к распылению приповерхностных слоев.

Определение твердости покрытий, а также динамики изменения величины твердости, отражающей фактор упрочнения, связанный с ионной модификацией, было проведено методом индентирования с использованием микротвердомера Durolin M1 (Metkon, Бурса, Турция).

Определение сцепляемости покрытия с поверхностью, а также влияние на устойчивость к отрыву ионной модификации было проведено с применением метода определения адгезионной прочности. Эксперименты связанные с определением максимальной нагрузки, способной выдержать покрытием до отрыва были проведены на установке Unitest framework SKU UT-750 (Unitest, США).

Для определения износостойкости поверхности покрытия были проведены эксперименты по определению зависимости изменения величины коэффициента сухого трения до и после ионной модификации в зависимости от количества циклов испытаний. Измерения проводились на трибометре UNITEST 750 (Ducom Instruments, Бенгалуру, Индия). При определении коэффициента трения использовалась стандартная схема «шарик на диске».

Определение влияния ионной модификации на устойчивость к процессам высокотемпературной деградации было осуществлено в ходе проведенных экспериментов, моделирующих воздействие высоких температур на исследуемые образцы. Моделирование осуществлялось путем термического нагрева образцов до температур порядка 1000 °C и выдержке их при заданной температуре в течение 500 часов. По достижению данного времени были проведены измерения твердости покрытий и адгезионной прочности. Контроль за температурой образцов осуществлялся путем размещения термопар в камере нагрева, позволяющих с высокой точностью контролировать лю-

бые колебания температуры внутри камеры. Выбор условий проведения экспериментов по термической деградации основывался на возможностях имитации процессов термического старения в условиях максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации. Результаты сравнительного анализа показали устойчивость покрытий к процессам высокотемпературной коррозии, а также позволили оценить влияние формирования деформационного слоя, вызванного ионным облучением на сопротивляемость к внешним воздействиям.

Определение устойчивости к процессам деградации прочностных свойств при взаимодействии с агрессивными средами было осуществлено путем размещения исследуемых образцов в модельном растворе 0,1 M NaCl в течение 10 дней, по истечению которых были измерены прочностные характеристики (твердость, адгезионная прочность), изменение которых отражает процессы деструкции поверхности, а также возможность применения модифицированных покрытий в качестве защитных антикоррозионных материалов, выступающих в качестве «жертвенных» покрытий снижающих скорость деградации металлических конструкций. Использование модельного раствора 0,1 M NaCl основывалось на методике стандартных испытаний на воздействие агрессивных сред на металлические конструкции, позволяющие моделировать естественные условия коррозии при контакте со средой.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 приведены результаты оценки изменения значений твердости покрытий в зависимости от флюенса облучения низкоэнергетическими ионами N^+ , C^+ , O^+ , отражающими изменение механических свойств покрытий. Данные представлены в виде зависимостей изменения значений твердости, измеренных методом индентирования в зависимости от флюенса облучения низкоэнергетическими ионами. Как видно из представленных данных, для исходных образцов, наибольшими значениями твердости обладают трехкомпонентные покрытия, для которых значение твердости превышает 2,4 ГПа, в то время как для двух компонентных покрытий значение твердости в исходном состоянии составляет от 1,73 ГПа до 1,84 ГПа, при этом увеличение твердости обусловлено заменой оксида ниобия на нитрид алюминия, а также нитрид молибдена на нитрид алюминия. Из этого можно сделать вывод о том, что увеличение твердости покрытий обусловлено свойствами нитрида алюминия. В данном случае увеличение твердости для исследуемых трехкомпонентных покрытий также может быть объяснено фактом большего количества межслойных границ, что приводит к созданию дополнительных барьерных включений для распространения микротрещин, возникающих при внешних механических нагрузках.

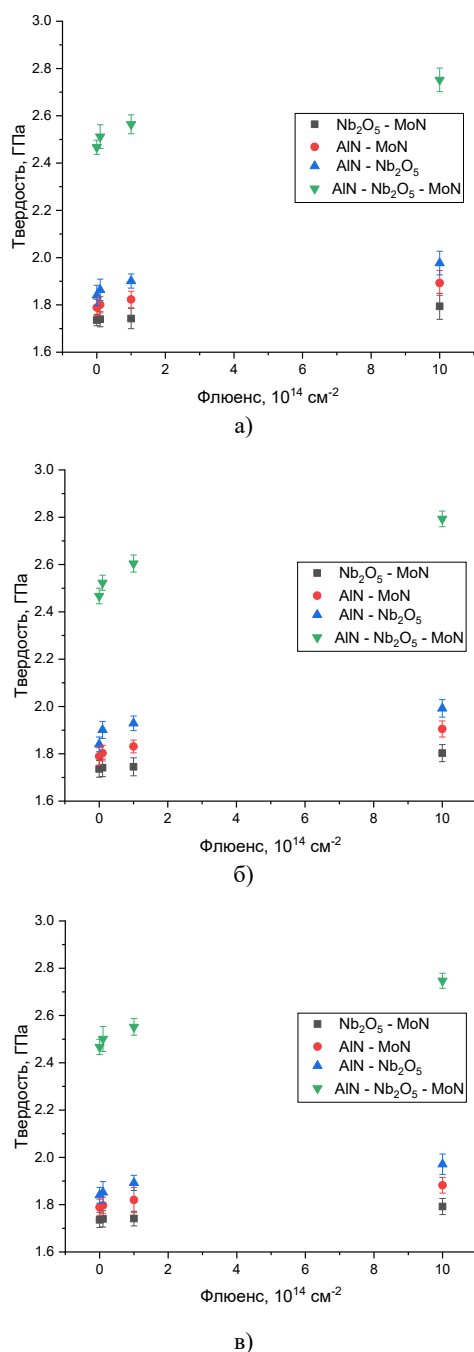


Рисунок 1. Результаты оценки механических свойств:
а) облучение ионами N^+ ; б) облучение ионами C^+ ;
в) облучение ионами O^+

Общий вид представленных зависимостей изменения твердости образцов покрытий в случае вариации флюенса облучения свидетельствует об увеличении твердости при изменении флюенса облучения, что свидетельствует о формировании в структуре покрытий деформационно-индуцированного упрочняющего слоя, обусловленного воздействием ионного облучения [19, 20]. При этом следует отметить, что изменение типа ионов не приводит к существенным различиям в изменении значений твердости, в то

время как основные изменения обусловлены эффектами, связанными с увеличением флюенса облучения, и как следствие, процессами, обусловленными увеличением плотности структурных изменений, вызванных взаимодействием налетающих ионов с кристаллической структурой [21, 22]. В данном случае, увеличение флюенса облучения приводит к увеличению плотности структурно-деформированных областей, возникающих вдоль траектории движения ионов в материале. Чем выше флюенс облучения, тем больше плотность данных включений, и как следствие, увеличивается плотность их перекрытия, что приводит в свою очередь к формированию дислокационных включений, в виде отдельных дислокаций или дислокационных петель, наличие которых в данном случае создает дополнительные барьерные эффекты, обуславливающие упрочнение приповерхностного слоя, а также увеличивая сопротивляемость к внешним воздействиям [23–25]. Таким образом, наблюдаемые изменения твердости в зависимости от флюенса облучения свидетельствуют о положительном влиянии ионной модификации на упрочнение покрытий за счет формирования деформационного слоя в приповерхностном слое, препятствующем внешним воздействиям. В случае трехкомпонентных покрытий, увеличение устойчивости к внешним воздействиям и повышение твердости может быть также обусловлено тем, что ионное облучение приводит к размытию границ слоев, тем самым формируя дополнительные дефекты, сочетание которых с мелкодисперсной фракцией из которой состоят покрытия приводит к увеличению сопротивляемости внешним воздействиям.

На рисунке 2 представлены результаты оценки изменения фактора упрочнения, отражающего увеличение механических свойств, обусловленных влиянием ионной модификации. Данные были рассчитаны путем сравнения величин твердости образцов в исходном необлученном состоянии с результатами величин твердости после облучения низкоэнергетическими ионами. Общий тренд изменения величины фактора упрочнения отражает положительное воздействие ионного облучения по увеличению сопротивляемости механическим воздействиям. При этом общий вид представленных данных свидетельствует о том, что наиболее оптимальными флюенсами облучения, используемыми для модификации, являются флюенсы 10^{15} cm^{-2} , при которых упрочнение составляет более 3–10% в зависимости от типа покрытий, а самые высокие показатели упрочнения наблюдаются для трехкомпонентных покрытий. Также следует отметить, что облучение флюенсами ниже 10^{15} cm^{-2} приводит к менее выраженному упрочнению, обусловленному малой концентрацией структурных дефектов, вызванных воздействием тяжелых ионов. При этом, сравнивая наблюдаемые изменения величин твердости и рассчитанных на их основе факторов упрочнения, можно сделать вывод о том, что измене-

ние типа низкоэнергетических ионов не приводит к существенным различиям в упрочнении, величина которого при максимальном флюенсе составляет порядка 10–13% по сравнению с исходными значениями. Из полученных результатов можно сделать вывод, что в случае низкоэнергетических ионов имеющих близкие массы и энергию, структурные изменения, возникающие в результате облучения имеют схожий характер и не имеют прямой зависимости от типа ионов.

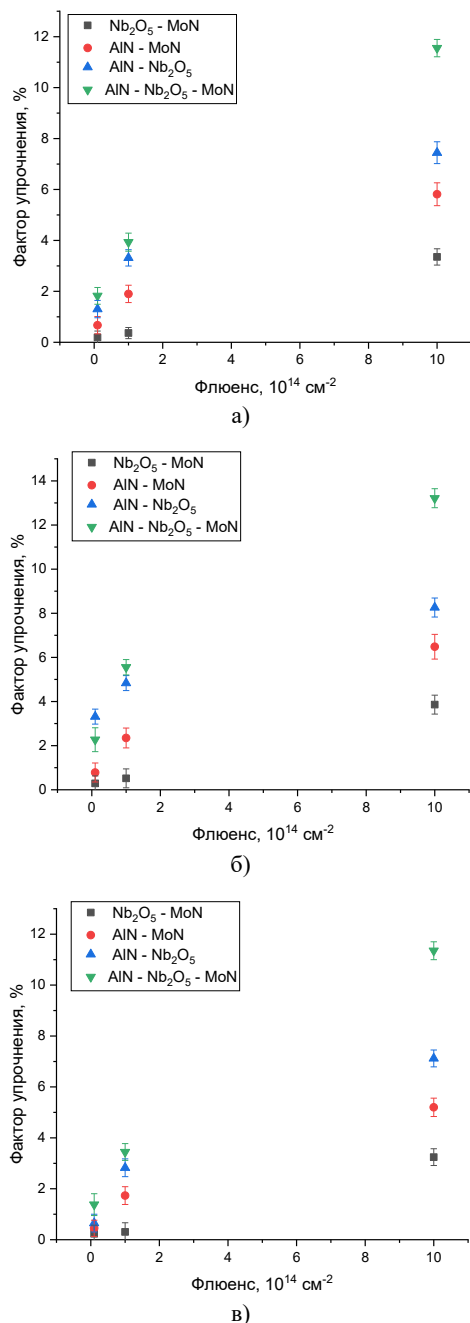


Рисунок 2. Результаты оценки фактора упрочнения в зависимости от типа ионов и флюенса облучения:
а) облучение ионами N⁺; б) облучение ионами C⁺; в) облучение ионами O⁺

На рисунке 3 приведены результаты оценки изменений величины адгезионной прочности покрытий, отражающие устойчивость покрытий к отрыву от поверхности при механических воздействиях. Данные представляют собой величину критической нагрузки, при которой происходит отслаивание покрытия от поверхности стали при механическом воздействии индентора.

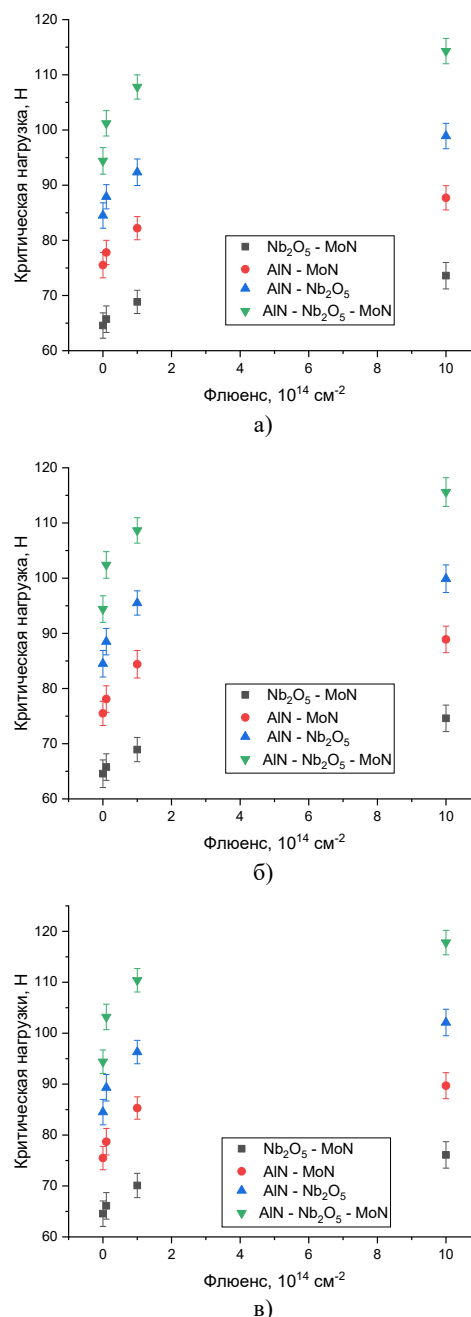


Рисунок 3. Результаты оценки изменений величины адгезионной прочности в зависимости от типа ионов и флюенса облучения: а) облучение ионами N⁺; б) облучение ионами C⁺; в) облучение ионами O⁺

Общий анализ изменений величины адгезионной прочности, определяемой как величина максимальной нагрузки на индентор, при которой происходит отрыв покрытия от поверхности стали на которую он нанесен, показал, что использование в составе покрытий нитрида алюминия приводит к увеличению стабильности покрытий к внешним механическим воздействиям прямого действия (на отрыв, трение), а в случае трехкомпонентных покрытий, чередование слоев приводит к увеличению устойчивости к отрыву в исходном состоянии более чем в 1,5 раза в сравнении с двухкомпонентными покрытиями $\text{Nb}_2\text{O}_5\text{--MoN}$. Изменение величины адгезионной прочности в зависимости от флюенса облучения низкоэнергетическими ионами показало схожий тренд увеличения устойчивости материалов покрытий, как и в случае изменений твердости. При этом наиболее выраженные изменения наблюдаются при максимальном флюенсе облучения – 10^{15} см^{-2} .

На рисунке 4 приведены результаты оценки эффективности упрочнения, приводящие к повышению сопротивляемости к отрыву, полученные на основе измерений величин адгезионной прочности покрытий. Расчеты проводились путем сравнения величин критических нагрузок полученных для исходных образцов покрытий с результатами, полученными для образцов, подверженных ионной модификации.

Как видно из представленных данных, увеличение флюенса облучения приводит к повышению сопротивляемости к отслаиванию от поверхности, что в свою очередь обусловлено эффектом деформационно-индуцированного упрочнения, которое возникает в результате накопления дислокационной плотности, а также возможному перемешиванию слоев за счет эффектов «термо-пиков», возникающих в результате взаимодействия налетающих ионов с кристаллической структурой покрытий. В случае низкоэнергетического облучения, вероятность структурных изменений, связанных с процессами ионизации, а также атомными смещениями, имеют равновероятный характер, так как величины ионизационных потерь при взаимодействии ионов с электронной и ядерной подсистемами сравнимы друг с другом. В данном случае чередование слоев может способствовать ускорению процессов перемешивания, тем самым размывая границы слоев, что создает дополнительные дефектные включения, препятствующие к расслоению покрытий при внешних воздействиях.

При этом, как и в случае результатов оценки твердости и упрочнения (сопротивляемости к внешним механическим нагрузкам), наибольшая эффективность достигается при облучении флюенсом 10^{15} см^{-2} , а сам характер изменений устойчивости к сопротивлению на отрыв (адгезионная прочность) имеет схожий характер с результатами оценки упрочнения (изменения твердости), и также как и в случае с изменениями твердости результаты адгезионной прочности не имеют прямой зависимости от типа об-

лучаемых ионов, так как характер трендов изменений практически идентичен для всех типов ионов.

Таким образом, наблюдаемое упрочнение и увеличение устойчивости к отслаиванию покрытий за счет изменений, вызванных облучением можно рассматривать как один из положительных эффектов, позволяющих увеличить сопротивляемость материалов к внешним воздействиям.

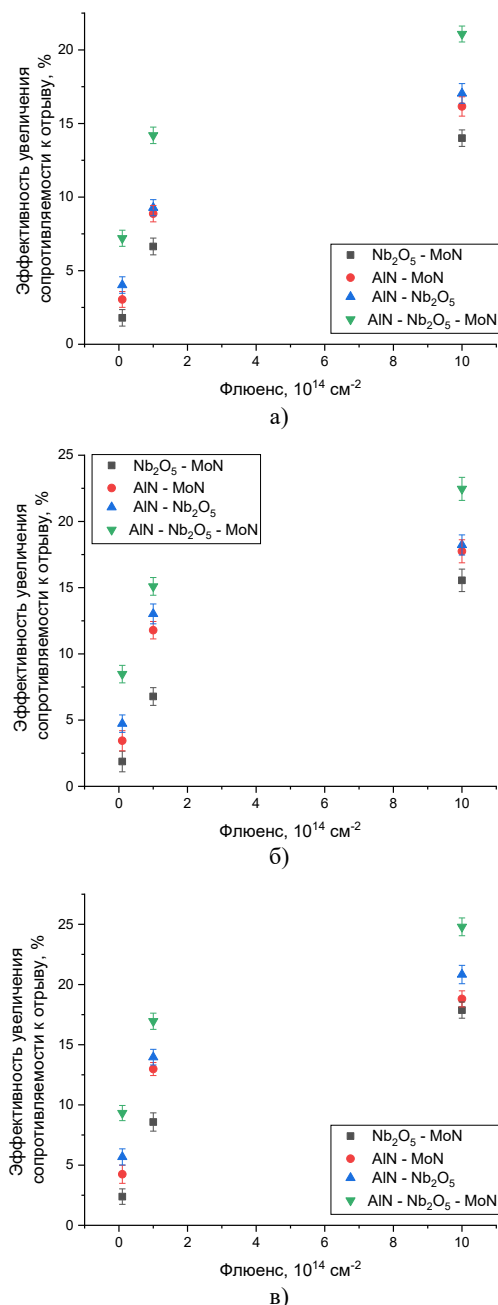


Рисунок 4. Результаты оценки эффективности упрочнения, основанные на измерениях величины адгезионной прочности в зависимости от типа ионов и флюенса облучения: а) облучение ионами N^+ ; б) облучение ионами C^+ ; в) облучение ионами O^+

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ИОННОЙ МОДИФИКАЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СОПРОТИВЛЯЕМОСТИ К ВНЕШНИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ

На рисунке 5 представлены результаты трибологических исследований, направленных на изучение влияния ионного облучения на увеличение устойчивости покрытий к внешним механическим воздействиям. Данные представлены в виде зависимости изменения коэффициента сухого трения от количества циклов для всех исследуемых покрытий подвергнутых облучению низкоэнергетическими ионами с различным флюенсом. Также приведены результаты сравнительного анализа изменений коэффициента сухого трения для исходных (необлученных) образцов.

Как видно из представленных данных, сравнивая зависимости изменений коэффициента сухого трения от количества циклов испытаний можно сделать вывод о том, что переход от двухкомпонентных покрытий к трехкомпонентным покрытиям приводит к увеличению сопротивляемости к износу, которое выражается в изменениях трендов износа, рост которых свидетельствует о деструкции поверхности и потере устойчивости к внешним воздействиям.

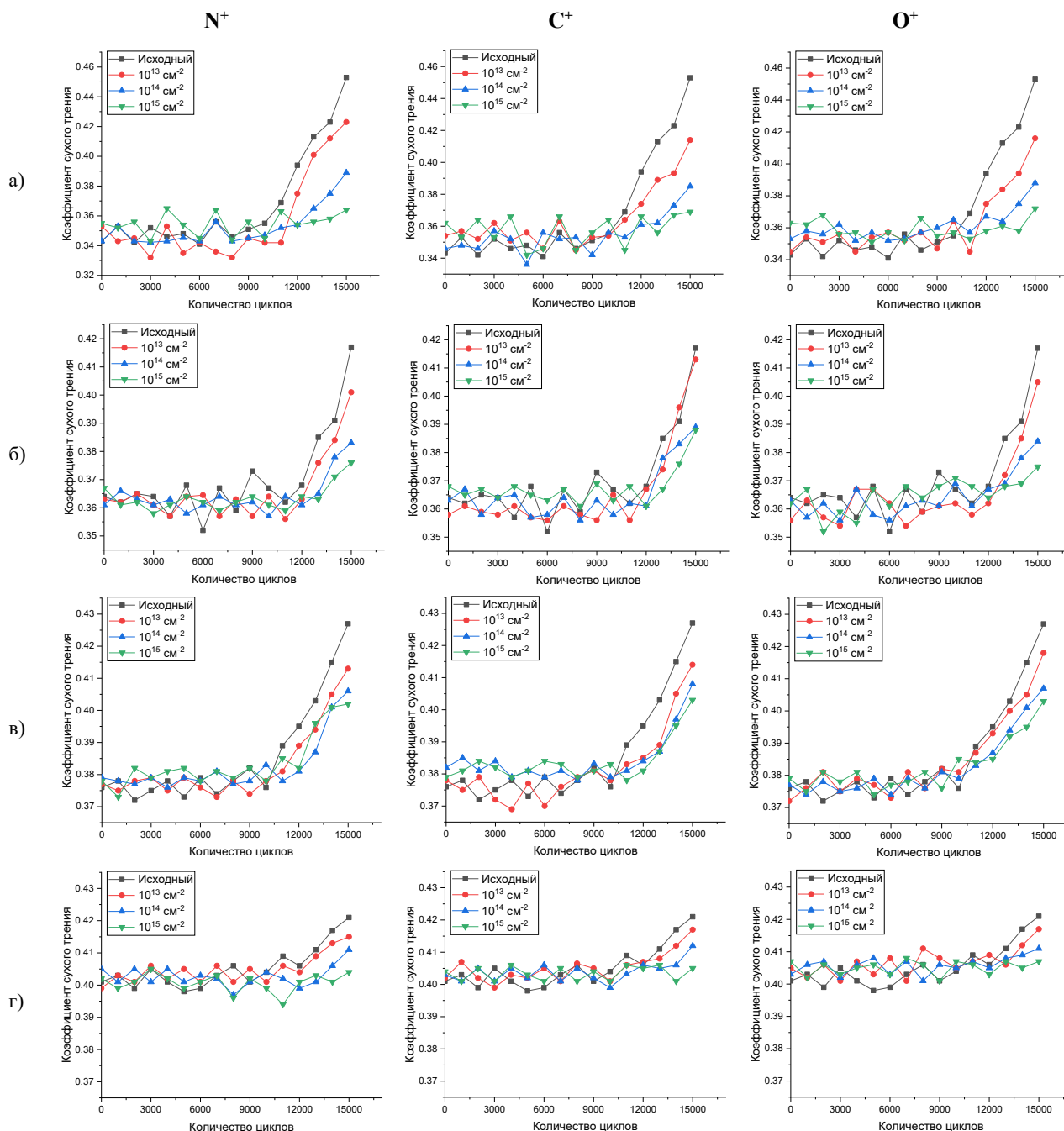


Рисунок 5. Результаты оценки изменения коэффициента сухого трения в зависимости от условий модификации:
а) $\text{Nb}_2\text{O}_5\text{--MoN}$; б) AlN--MoN ; в) $\text{AlN--Nb}_2\text{O}_5$; г) $\text{AlN--Nb}_2\text{O}_5\text{--MoN}$

Анализируя зависимости изменения коэффициента сухого трения в зависимости от типа ионов и флюенса облучения можно сделать вывод о том, что создаваемое деформационно-индуцированное упрочнение за счет ионной модификации увеличивает устойчивость к износу, которое выражается в более низких изменениях коэффициента трения при длительном количестве испытаний (более 10 000 циклов). Согласно полученным данным, в случае трехкомпонентных покрытий наблюдается наибольшая эффективность повышения сопротивляемости к износу при облучении низкоэнергетическими ионами, из чего можно сделать вывод о том, что вызванные облучением структурные изменения, связанные с увеличением дислокаций и дефектов в поврежденном слое, повышают устойчивость к износу. В данном случае увеличение дозы облучения в случае трехкомпонентных покрытий приводит не только к замедлению износа в сравнении с другими типами покрытий, но и увеличению циклов испытаний, при котором не наблюдается каких-либо значимых изменений, вызванных внешними воздействиями.

Одним из ключевых параметров определяющих перспективы использования покрытий в качестве защитных антикоррозионных материалов является определение их устойчивости к внешним воздействиям, не только к механическим, но и высокотемпературному нагреву в течение длительного времени, агрессивным средам, способным привести к деструкции за счет процессов окисления. Как правило, использование защитных покрытий направлено на сдерживание процессов диффузии химических реакций окисления, возникающих при взаимодействии поверхности материала с агрессивными средами или подверженых температурным воздействиям. В данном случае, покрытия выступают в роли так называемых «жерт-

венных» слоев которые подвергаются интенсивному воздействию агрессивных сред и высоких температур, что приводит к замедлению деградации стальных конструкций.

В таблице 1 приведены результаты оценки показателей твердости и адгезионной прочности образцов покрытий после моделирования высокотемпературной деградации, вызванной длительным воздействием высокой температуры (порядка 1000 °С в течение 500 часов). В качестве тестируемых образцов были выбраны покрытия, подвергнутые облучению низкоэнергетическими ионами N⁺, C⁺, O⁺ с флюенсами 10¹⁵ ион/см².

Как видно из представленных данных, изменений прочностных характеристик (твердости и адгезионной прочности) длительное термическое воздействие (порядка 500 часов) в случае исходных (немодифицированных ионным облучением) образцов приводит к снижению показателей приблизительно на 5,2–4,7%, в зависимости от типа покрытий. В данном случае для AlN–Nb₂O₅–MoN покрытий снижение прочностных параметров ниже примерно на 0,5%, из чего можно сделать вывод о том, что наличие трех типов слоев приводит к замедлению процессов высокотемпературного окисления более интенсивно, чем двух компонентные покрытия, для которых изменения прочностных параметров составляет порядка 5,1–5,2%. Для модифицированных покрытий, согласно сравнительной оценке изменений величин твердости и адгезионной прочности наблюдается заметное уменьшение степени разупрочнения, которое составляет порядка 2,8–2,1% для твердости, и 2,8–1,8% для адгезионной прочности в зависимости от типа покрытий (для AlN–Nb₂O₅–MoN покрытий степень деградации прочностных свойств значительно меньше).

Таблица 1. Данные экспериментов, направленных на моделирование высокотемпературной деградации образцов покрытий

Образец	Параметр	Твердость, ГПа			
		исходный	облучение ионами N ⁺	облучение ионами C ⁺	облучение ионами O ⁺
Nb ₂ O ₅ –MoN	до испытаний	1,74±0,05	1,79±0,04	1,80±0,05	1,79±0,04
	после испытаний	1,64±0,06	1,74±0,05	1,75±0,04	1,74±0,03
AlN–MoN	до испытаний	1,79±0,03	1,89±0,05	1,90±0,05	1,88±0,07
	после испытаний	1,70±0,04	1,85±0,06	1,86±0,06	1,83±0,05
AlN–Nb ₂ O ₅	до испытаний	1,84±0,07	1,98±0,06	1,99±0,07	1,97±0,06
	после испытаний	1,75±0,06	1,93±0,07	1,94±0,08	1,92±0,06
AlN–Nb ₂ O ₅ –MoN	до испытаний	2,47±0,11	2,75±0,09	2,79±0,10	2,74±0,09
	после испытаний	2,35±0,09	2,69±0,10	2,73±0,11	2,69±0,09
Образец	Параметр	Величина критической нагрузки, Н (адгезионная прочность)			
		исходный	облучение ионами N ⁺	облучение ионами C ⁺	облучение ионами O ⁺
Nb ₂ O ₅ –MoN	до испытаний	64,6±2,1	73,6±2,5	74,6±2,2	76,1±2,1
	после испытаний	61,2±1,7	71,5±2,2	72,5±2,1	73,9±2,2
AlN–MoN	до испытаний	75,5±2,4	87,7±3,1	88,9±2,1	89,7±2,5
	после испытаний	71,6±2,2	85,3±2,3	86,7±2,6	87,4±2,2
AlN–Nb ₂ O ₅	до испытаний	84,6±2,6	98,9±3,2	99,9±2,5	102,1±3,2
	после испытаний	80,3±2,5	96,5±3,1	97,6±2,3	99,8±2,1
AlN–Nb ₂ O ₅ –MoN	до испытаний	94,4±3,6	114,3±3,8	115,6±3,9	117,8±4,3
	после испытаний	90,1±3,1	111,7±2,9	113,3±2,7	115,7±2,5

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ИОННОЙ МОДИФИКАЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СОПРОТИВЛЯЕМОСТИ К ВНЕШНИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ

Таблица 2. Данные экспериментов, направленных на моделирование воздействия агрессивной среды на покрытия

Образец	Параметр	Твердость, ГПа			
		исходный	облучение ионами N ⁺	облучение ионами C ⁺	облучение ионами O ⁺
Nb ₂ O ₅ –MoN	до испытаний	1,74±0,05	1,79±0,04	1,80±0,05	1,79±0,04
	после испытаний	1,58±0,04	1,70±0,06	1,71±0,05	1,70±0,04
AlN–MoN	до испытаний	1,79±0,03	1,89±0,05	1,90±0,05	1,88±0,07
	после испытаний	1,63±0,05	1,80±0,05	1,82±0,06	1,79±0,06
AlN–Nb ₂ O ₅	до испытаний	1,84±0,07	1,98±0,06	1,99±0,07	1,97±0,06
	после испытаний	1,69±0,06	1,89±0,04	1,90±0,05	1,88±0,05
AlN–Nb ₂ O ₅ –MoN	до испытаний	2,47±0,11	2,75±0,09	2,79±0,10	2,74±0,09
	после испытаний	2,78±0,09	2,65±0,08	2,69±0,09	2,64±0,11
Образец	Параметр	Величина критической нагрузки, Н (адгезионная прочность)			
		исходный	облучение ионами N ⁺	облучение ионами C ⁺	облучение ионами O ⁺
Nb ₂ O ₅ –MoN	до испытаний	64,6±2,1	73,6±2,5	74,6±2,2	76,1±2,1
	после испытаний	57,4±2,2	69,7±2,2	70,8±2,3	72,1±2,3
AlN–MoN	до испытаний	75,5±2,4	87,7±3,1	88,9±2,1	89,7±2,5
	после испытаний	67,8±2,3	83,2±2,2	84,4±2,2	85,2±2,3
AlN–Nb ₂ O ₅	до испытаний	84,6±2,6	98,9±3,2	99,9±2,5	102,1±3,2
	после испытаний	76,3±2,4	93,8±2,5	95,1±2,7	97,2±2,6
AlN–Nb ₂ O ₅ –MoN	до испытаний	94,4±3,6	114,3±3,8	115,6±3,9	117,8±4,3
	после испытаний	85,6±2,8	110,3±3,3	111,7±2,6	113,9±3,2

Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что создание структурно-деформированного слоя в покрытиях за счет ионного воздействия приводит к сдерживанию процессов высокотемпературной коррозии, приводящей к деструкции и разупрочнению покрытий. Таким образом, можно сделать вывод о том, что использование ионного облучения позволяет значительно (более чем в два раза) повысить устойчивость к внешним высокотемпературным воздействиям, что увеличивает срок эксплуатации покрытий, используемых в качестве «жертвенных» покрытий для защиты металлических конструкций от процессов высокотемпературного окисления.

В таблице 2 приведены результаты оценки изменений прочностных параметров исследуемых покрытий после испытаний на коррозионную стойкость при длительном нахождении их в модельном растворе 0,1 М NaCl, имитирующем воздействие агрессивной среды. Данные приведены в виде сравнительной таблицы величин твердости и адгезионной прочности до и после испытаний.

Результаты коррозионных испытаний показали, что использование ионной модификации более чем в 2,5–3,0 раза снижает негативное воздействие агрессивной среды на покрытия за счет сдерживания процессов диффузии ионов в приповерхностный слой, тем самым замедляя процессы разупрочнения приповерхностного слоя покрытия. Наблюдаемый эффект сдерживания процессов коррозии свидетельствует о положительном влиянии структурно-деформированного слоя, возникающего при облучении низкоэнергетическими ионами в приповерхностном слое покрытий, что приводит к явно выраженному увеличению устойчивости покрытий к процессам деструкции, свя-

занным с окислением при длительном контакте с агрессивной средой. Увеличение устойчивости к окислению в случае модифицированных покрытий обусловлено эффектом перемешивания атомов и стиранию границ между слоями, а также наличием дополнительных дислокационных дефектов, препятствующих диффузии кислорода, а также ионов хлора вглубь образцов, не давая возможности образовывать метастабильные включения на поверхности, тем самым сдерживая процессы деградации и разупрочнения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных исследований было установлено, что основной вклад в упрочнение, вызванное воздействием ионизирующего излучения, оказывает флюенс облучения, а не тип низкоэнергетического иона, используемых для модификации. В данном случае, увеличение флюенса облучения приводит к увеличению плотности структурных дефектов в поврежденном слое, что приводит к увеличению сопротивляемости к внешним воздействиям. Согласно результатам испытаний на износостойкость было установлено, что модификация ионным облучением приповерхностного слоя покрытий приводит к сдерживанию процессов износа и потери массы за счет увеличения сопротивляемости к трению при длительном воздействии. При этом наибольшей устойчивостью к износу обладают трехкомпонентные покрытия, полученные путем послойного напыления слоев AlN–Nb₂O₅–MoN. Анализ результатов экспериментов направленных на выявление устойчивости покрытий к высокотемпературной коррозии и процессам окисления в агрессивной среде показал положительное влияние формирования структурно-деформированного слоя в покрытиях на сдерживание процессов де-

струкции и разупрочнения. Полученные зависимости свидетельствуют о положительном влиянии ионной модификации с применением низкоэнергетического облучения ионами N^+ , C^+ , O^+ на упрочнение покрытий, а также увеличению их устойчивости к внешним воздействиям, включая высокотемпературную деградацию и агрессивные среды.

Данная работа выполнена в рамках программно-целевого финансирования BR21882390 «Разработка технологии решений создания и модификации высокопрочных, тугоплавких, жаропрочных композитных керамик и ТОТЭ элементов для альтернативной энергетики и приборостроения», реализуемого при поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Szindler M. M. et al. Al₂O₃/ZnO Multilayer Coatings for Improvement in Functional Properties of Surgical Scalpel Blades // *Coatings*. – 2025. – Vol. 15, No. 4. – P. 436.
2. Zhao X. et al. Enhanced corrosion protection of steel strip through advanced Zn-Mg alloy coatings manufactured by Continuous Physical Vapor Deposition: A review // *Materials Chemistry and Physics*. – 2024. – P. 129884.
3. Yan J. et al. Wear and corrosion resistance of textured and functionally particle-enhanced multilayer dual-biomimetic polymer coatings // *Tribology International*. – 2025. – Vol. 202. – P. 110335.
4. Johar M. et al. Development of novel Nb and Ta multilayer coatings for corrosion protection of Ti-based bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells // *Corrosion Science*. – 2025. – Vol. 245. – P. 112707.
5. Zhang J. et al. Alternating multilayer structural epoxy composite coating for corrosion protection of steel // *Macromolecular Materials and Engineering*. – 2019. – Vol. 304, No. 12. – P. 1900374.
6. Fenker M., Balzer M., Kappl H. Corrosion protection with hard coatings on steel: Past approaches and current research efforts // *Surface and Coatings Technology*. – 2014. – Vol. 257. – P. 182–205.
7. Tan A. L. K. et al. Multilayer sol-gel coatings for corrosion protection of magnesium // *Surface and coatings technology*. – 2005. – Vol. 198, No. 1–3. – P. 478–482.
8. Khelifa F. et al. A multilayer coating with optimized properties for corrosion protection of Al // *Journal of Materials Chemistry A*. – 2015. – Vol. 3, No. 31. – P. 15977–15985.
9. Dobrzański L. A. et al. Structure and corrosion resistance of gradient and multilayer coatings // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. – 2006. – Vol. 18, No. 1–2. – P. 75–78.
10. Song Z. et al. Progress in superhydrophobic surfaces for corrosion protection of Mg alloys—a mini-review // *Anti-Corrosion Methods and Materials*. – 2024. – Vol. 71, No. 2. – P. 124–131.
11. Ortiz C. H., Hernandez-Renjifo E., Caicedo J. C. Study of corrosion protection through the implementation of TiC/TiSiCN multilayer coatings // *Materials Chemistry and Physics*. – 2024. – Vol. 315. – P. 128821.
12. Kasi V. et al. Improved Corrosion Protection of Copper in Electronic Devices via CAP-Assisted Multilayer SiO_x Coatings // *Applied Materials Today*. – 2024. – Vol. 41. – P. 102517.
13. Gergely A. A review on corrosion protection with single-layer, multilayer, and composites of graphene // *Corrosion Reviews*. – 2018. – Vol. 36, No. 2. – P. 155–225.
14. Zhang X. et al. Multi-layer structure improves wear and corrosion resistance of chromium // *Surface and Coatings Technology*. – 2025. – P. 132165.
15. Wan Q. et al. Irradiation-decelerated corrosion behavior of CrN/TiSiN multilayer coating in liquid Pb–Bi eutectic alloy // *Ceramics International*. – 2024. – Vol. 50, No. 16. – P. 28209–28219.
16. Sun W. et al. Enhanced corrosion resistance and electrical conductivity of Nb/NbN multilayer coatings prepared by the combination methods of magnetron sputtering and pulse laser deposition // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2025. – Vol. 127. – P. 160–168.
17. Chen Q. et al. Improving the corrosion resistance and conductivity of 316L bipolar plates used for PEMFCs by applying Cr/CrN multilayer coating // *Applied Surface Science*. – 2025. – P. 162573.
18. Jeevitha M. et al. High temperature erosion-corrosion behaviour of magnetron sputtered TiCr/TiCrN ultrathin multilayer thin films for gas turbine engine applications // *Surface and Coatings Technology*. – 2025. – P. 131869.
19. Daghbouj N. et al. Revealing nanoscale strain mechanisms in ion-irradiated multilayers // *Acta Materialia*. – 2022. – Vol. 229. – P. 117807.
20. An B. et al. Interface-controlled mechanical properties and irradiation hardening in nanostructured Cr₇₅Al₂₅/Zr multilayers // *Materials Science and Engineering: A*. – 2022. – Vol. 850. – P. 143558.
21. Ni J. et al. Recent studies on the fabrication of multilayer films by magnetron sputtering and their irradiation behaviors // *Coatings*. – 2021. – Vol. 11, No. 12. – P. 1468.
22. Callisti M., Polcar T. Combined size and texture-dependent deformation and strengthening mechanisms in Zr/Nb nano-multilayers // *Acta Materialia*. – 2017. – Vol. 124. – P. 247–260.
23. Seita M. et al. Direct evidence for stress-induced texture evolution and grain growth of silver thin films upon thermal treatment and self-ion bombardment // *Acta materialia*. – 2010. – Vol. 58, No. 19. – P. 6513–6525.
24. Wang L. et al. Modulation-ratio-dependent deformation mechanisms in Cr/CrN/Cr-DLC multilayer triggered by nanoindentation // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2024. – Vol. 1004. – P. 175922.
25. Bykov P. V. et al. Effect of Aluminum Ion Irradiation on Chemical and Phase Composition of Surface Layers of Rolled AISI 321 Stainless Steel // *Metals*. – 2021. – Vol. 11, No. 11. – P. 1706.

КӨП ҚАБАТТЫ ЖАБЫНДАРДЫҢ СЫРТҚЫ ӘСЕРЛЕРГЕ ТӨЗІМДІЛІКТІ АРТТЫРУ ҮШІН ИОНДЫҚ МОДИФИКАЦИЯНЫҢ ҚОЛДАНЫЛУЫН БАҒАЛАУ

А. Л. Козловский^{1,2*}, Д. И. Шлимас^{1,2}, М. Е. Калиекперов^{1,2}, К. К. Мунасбаева², Д. Б. Боргеков^{1,2}

¹ КЕАҚ «Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті», Астана, Қазақстан

² ҚР ЭМ «Ядролық физика институты» РМК, Алматы, Қазақстан

* Байланыс үшін E-mail: kozlovskiy.a@inp.kz

Ұсынылған зерттеу нәтижелерінің негізгі мақсаты иондық модификацияның көп қабатты жабындардың сыртқы әсерлерге, соның ішінде жоғары температуралық тотығуға, агрессивтік ортаға және механикалық жүктемелерге төзімділігін арттыруға әсерін анықтау болып табылады. Иондық модификация әдісі ретінде 40 кэВ энергиясы бар төмен энергиялы N^+ , C^+ , O^+ иондарымен және 10^{13} , 10^{14} және 10^{15} см^{-2} флюенсімен сәулелену әдісі таңдалды, бұл таңдау олардың массасының ұқсастығына, сондай-ақ оларды бірдей энергиямен жеделдету мүмкіндігіне негізделген, бұл модификацияның тиімділігін бағалау кезінде энергия факторын жоққа шығаруға мүмкіндік береді. Зерттеулер барысында төмен энергиялы иондармен сәулелену кезінде байқалатын беріктену әсері сәулелену флюенсіне тікелей тәуелді екендігі анықталды, оның өзгеруі зақымдалған қабатта құрылымдық ақаулардың үлкен тығыздығының пайда болуына әкеледі, сонымен қатар модификация үшін қолданылатын иондардың түріне байланысты емес. Бұл ретте беріктенудің максималды әсеріне 10^{15} см^{-2} сәулелену флюенстері кезінде қол жеткізілетіні анықталды, бұл кезде модификацияланбаған жабындармен салыстырғанда беткі қабаттың беріктенуі шамамен 10–15% құрайды. Сыртқы механикалық кернеулерге, атап айтқанда үйкеліске төзімділіктің тиімділігін бағалау нәтижелері иондық модификация арқылы деформациялық қабаттың пайда болуы үйкеліс кезінде тозуға төзімділіктің жоғарылауына, сондай-ақ тозу процестеріне жабын бетінің тұрақтылығының жоғарылауына әкелетінін көрсетті. Жабындардың термотосқауыл қасиеттерін тестілік сынау, иондық модификация әдісін қолдану жабындардағы жылу тасымалдау процестерін тежеу арқылы жабындардың жылу оқшаулау қасиеттерінің жоғарылауына әкелетінін көрсетті.

Түйін сөздер: көп қабатты жабындар, антикоррозиялық жабындар, беріктену, деградацияға қарсыластық, иондық модификация.

EVALUATION OF THE APPLICABILITY OF IONIC MODIFICATION TO ENHANCE THE RESISTANCE TO EXTERNAL INFLUENCES OF MULTILAYER COATINGS

A. L. Kozlovskiy^{1,2*}, D. I. Shlimas^{1,2}, M. E. Kaliekperov^{1,2}, K. K. Munasbayeva², D. B. Borgekov^{1,2}

¹ NJSC L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

² RSE “Institute of Nuclear Physics” ME RK, Almaty, Kazakhstan

* E-mail for contacts: kozlovskiy.a@inp.kz

The key aim of the presented research results is to determine the effect of ionic modification on enhancement of the resistance of multilayer coatings to external influences, including high-temperature oxidation, exposure to aggressive environments and mechanical loads. The method of irradiation with low-energy N^+ , C^+ , O^+ ions with energies of 40 keV and fluences of 10^{13} , 10^{14} and 10^{15} cm^{-2} was chosen as the ion modification method. The choice of these ions is based on the similarity of their masses, alongside the possibility of their acceleration with the same energy, which makes it possible to exclude the energy factor during the modification efficiency assessment. During the studies conducted it was established that the strengthening effect observed during irradiation with low-energy ions has a direct dependence on the irradiation fluence, the variation of which leads to the formation of a higher density of structural defects in the damaged layer, and is also practically independent of the type of ions used for modification. Moreover, it has been established that the maximum hardening effect is achieved at irradiation fluences of 10^{15} cm^{-2} , at which the hardening of the near-surface layer is about 10–15% compared to unmodified coatings. The results of the assessment of the efficiency of resistance to external mechanical influences, in particular, to friction, showed that the formation of a deformation layer due to ionic modification leads to an increase in resistance to wear during friction, as well as an increase in the stability of the coating surface to degradation processes. Tests of thermal barrier properties of coatings have shown that the use of the ion modification method leads to an increase in the thermal insulation properties of coatings by inhibiting heat transfer processes in the coatings.

Keywords: multilayer coatings, anticorrosive coatings, hardening, degradation resistance, ion modification.