

**Изучение перспектив применения ионной модификации нитридных покрытий
к процессам высокотемпературной коррозии в нефтегазовой отрасли**

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, г. Алматы, Республика Казахстан

*Kozlovskiy.a@inp.kz

Аннотация. Использование методов ионной модификации, связанных с высокодозным облучением низкоэнергетическими ионами, является одним из перспективных способов повышения устойчивости материалов к внешним воздействиям, включая высокотемпературную коррозию. Сам процесс ионной модификации заключается в создании приповерхностного слоя материала большой дислокационной плотности за счет имплантационных эффектов, что, в свою очередь, приводит к торможению процессов деструкции в результате коррозионных процессов окисления или механических воздействий. В данной работе, применяя метод ионной модификации с целью повышения устойчивости к высокотемпературной коррозии, авторы модифицировали нитридные покрытия толщиной порядка 500 нм. Основная цель применения метода ионной модификации заключалась в повышении прочностных характеристик нитридных покрытий к высокотемпературной коррозии, а также в снижении эффектов деградации покрытий к механическому разупрочнению и износу после коррозионных испытаний. В ходе проведенных исследований было установлено, что использование низкоэнергетического облучения ионами O^{2+} (40 кэВ) приводит к увеличению стабильности прочностных характеристик при высокотемпературной коррозии (при длительном нагреве в кислородосодержащей среде при температуре 700 °С), а также к снижению износа в сравнении с немодифицированными нитридными покрытиями, нанесенными на поверхность стали 316L. Перспективность данных исследований заключается в разработке новых методов модификации стальных конструкций, что позволит повысить эффективность устойчивости к коррозионным и механическим повреждениям, а также увеличить износостойкость поверхности при внешних механических воздействиях. Возможность увеличения устойчивости за счет деформационных включений, вызванных имплантацией, позволяет увеличить устойчивость к коррозии за счет повышения сопротивляемости материала к высокотемпературному окислению.

Ключевые слова: ионная модификация, защита от коррозии, высокотемпературная деградация, набухание, устойчивость к деградации, дислокационная плотность

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 перспектив применения ионной модификации нитридных покрытий к процессам высокотемпературной коррозии в нефтегазовой отрасли / К. К. Кадыржанов, А. Л. Козловский, Д. И. Шлимас, Г. Ж. Молдабаева. – DOI 10.31660/0445-0108-2024-2-93-103 // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2024. – № 2. – С. 93–103.

**The prospects of applying ionic modification of nitride coatings to high
temperature corrosion processes in the oil and gas industry**

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

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

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

³Satbayev University, Almaty, the Republic of Kazakhstan

*Kozlovskiy.a@inp.kz

Abstract. The use of ion modification methods associated with high-dose irradiation with low-energy ions is one of the promising ways to increase the resistance of materials to external influences, including high-temperature corrosion. The process of ionic modification involves creating a near-surface layer of material with a high dislocation density due to implantation effects. This inhibits destructive processes caused by corrosive oxidation or mechanical influences. In this work, using the ion modification method to improve the resistance to high temperature corrosion, the authors modified nitride coatings of the order of 500 nm thick. The main purpose of using the ion modification method was to increase the strength characteristics of nitride coatings against high-temperature corrosion, as well as to reduce the effects of coating degradation to mechanical softening and wear after corrosion tests. In the course of the studies, it was found that the use of low-energy irradiation with O^{2+} ions (40 keV) leads to an increase in the stability of strength characteristics during high-temperature corrosion (with prolonged heating in an oxygen-containing environment at a temperature 700 °C), as well as a decrease in wear in comparison with unmodified nitride coatings applied to the surface of 316L steel. The promise of these studies lies in the development of new methods for modifying steel structures, which will improve the efficiency of resistance to corrosion and mechanical damage, as well as increase the wear resistance of the surface under external mechanical influences. The possibility of increasing stability due to deformation inclusions caused by implantation makes it possible to increase corrosion resistance by increasing the resistance of materials to high-temperature oxidation.

Keywords: ionic modification, corrosion protection, high temperature degradation, swelling, resistance to degradation, dislocation density

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). The prospects of applying ionic modification of nitride coatings to high temperature corrosion processes in the oil and gas industry. *Oil and Gas Studies*, (2), pp. 93-103. (In Russian). DOI: 10.31660/0445-0108-2024-2-93-103

Введение

Повышение сроков эксплуатации трубопроводов и нефтепроводов является одним из важных направлений исследований не только с научной точки зрения, но и с экономической, ввиду того что увеличение сроков использования металлических труб позволит уменьшить затраты на их производство и замену, а также уменьшит риски выхода из строя. Проблема риска выхода из строя связана с процессами коррозии, а также накопления осадков внутри трубопроводов, что, в свою очередь, может привести к частичному закупориванию труб, снижению протока, а в случае накопления коррозионных отложений загрязнению прокачиваемых жидкостей и охрупчиванию поврежденных участков, в особенности мест соединений. Также достаточно серьезные проблемы для снижения устойчивости материалов возникают из-за высоких температур, воздействие которых может привести к ускоренной деструкции материалов за счет окислительных процессов и обра-

зованию питтинговой или язвенной коррозии, приводящей к охрупчиванию стальных конструкций и трубопроводов.

Наиболее эффективным способом повышения устойчивости стальных конструкций к деградации, в том числе и к высокотемпературной коррозии, является нанесение защитных нитридных [1–3] или карбидных покрытий [4–6] на поверхность стальных конструкций, что позволяет существенно снизить риск деструктивного охрупчивания при коррозии за счет замедления процессов окисления в нанесенном покрытии и способствует увеличению стабильности материала к внешним воздействиям [7, 8]. При этом в последнее время достаточно активно рассматривается способ направленной модификации, связанной с ионным или электронным облучением нанесенных покрытий, которое позволяет повысить устойчивость материала покрытий к деструкции. В основе данного способа модификации лежит теория о создании дислокационного упрочнения, связанного с изменением дислокационной плотности в приповерхностном слое нанесенных покрытий за счет увеличения деформационных искажений и точечных дефектов, которые в аморфноподобных покрытиях формируют упрочняющий слой, наличие которого способно повысить устойчивость к износу и коррозии [9, 10].

На основании вышесказанного основной целью данной работы является изучение перспектив применения ионной модификации для повышения устойчивости к высокотемпературной деградации нитридных покрытий, нанесенных на поверхность стали 316L, а также оценка влияния деформационного искажения и дислокационного упрочнения на повышение стабильности к износу при высокотемпературной коррозии.

Объект и методы исследования

Объектами исследования были выбраны нитридные покрытия (TiN) толщиной порядка 500 нм, нанесенные методом магнетронного напыления на поверхность стали 316L, выбор которой обусловлен ее практически повсеместным использованием при изготовлении газо- и нефтепроводов, а также при изготовлении металлических конструкций, эксплуатируемых в экстремальных условиях.

Модификация приповерхностного слоя нитридных покрытий была выполнена путем облучения низкоэнергетическими ионами O^{2+} с энергией 40 кэВ, пробивная способность которых в нитриде титана, согласно оценочным данным результатов моделирования ионизационных потерь налетающих ионов и глубины проникновения, составляет порядка 300–450 нм, что сравнимо по величине с толщиной нанесенных покрытий. Облучение было выполнено с флюенсами от 10^{13} до 10^{15} ион/см², выбор которых обусловлен возможностями моделирования эффектов изменения дислокационной плотности в поврежденном слое, за счет деформационного искажения кристаллической структуры покрытий.

Определение степени гидрофильности/гидрофобности поверхности нанесенных покрытий, а также ее изменений в результате ионной модификации было осуществлено методом определения контактного угла смачивания. Для этого на поверхность образца пленки с применением метода «сидячей капли» наносилась одиночная капля жидкости (дистиллированной воды), после чего проводилась фотофиксация геометрии нанесенной капли на поверхность. С использованием программного обеспечения ImageJ проводилось определение величины контактного угла смачивания.

Определение величины коэффициента сухого трения исследуемых нитридных покрытий до и после модификации, а также в зависимости от времени нахождения в печи в ходе экспериментов по высокотемпературной коррозии было осуществлено с применением трибометра UNITEST 750 (Ducum Instruments, Бенгалуру, Индия). Испытания проводились путем воздействия индентера в форме шарика на поверхность покрытия при нагрузке в 100 Н, а количество повторений при циклических испытаниях составило 20 000 циклов. Определение изменений величины коэффициента сухого трения до и после 20 000 циклов испытаний позволило выявить износостойкость покрытий, а также установить влияние ионной модификации на устойчивость покрытий к износу.

Определение прочностных характеристик в зависимости от флюенса облучения было выполнено путем индентирования поверхности образцов с помощью микротвердомера Duroline M1 (Metkon, Бурса, Турция) с последующим вычислением твердости при заданных величинах нагрузки на индентер.

Постановка эксперимента

Эксперименты, моделирующие процессы высокотемпературной коррозии, были выполнены путем размещения образцов нитридных покрытий, нанесенных на поверхность стали 316L в исходном и модифицированном состоянии (после ионного облучения), в муфельные печи с кислородосодержащей средой, после чего образцы подвергались длительному термическому нагреву в течение 500 часов при температуре 700 °С. По достижении временных промежутков, равных 100 часам, часть образцов извлекалась для проведения измерений коэффициента сухого трения и твердости образцов, изменение величин которых отражает деградацию прочностных характеристик покрытий в результате высокотемпературных окислительных процессов. На основе проведенных исследований были определены основные критерии упрочнения, вызванные ионной модификацией поверхностного слоя нитридных покрытий.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлены результаты изображений капель на поверхности нитридных покрытий в зависимости от флюенса облучения низкоэнергетическими ионами, отражающих изменение контактного угла сма-

чивания поверхности, а также изменение гидрофильных/гидрофобных свойств покрытий в зависимости от условий ионной модификации.

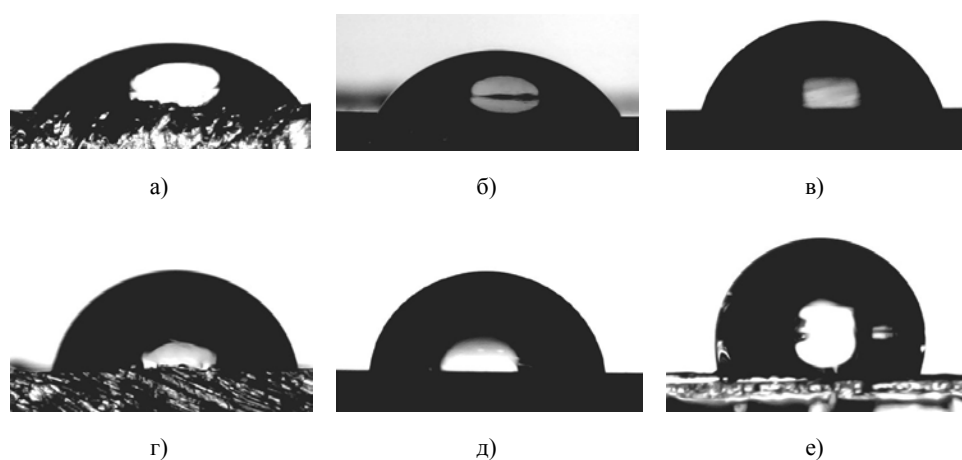


Рис. 1. Изображения капель на поверхности нанесенных и модифицированных нитридных покрытий, отражающие изменения величины контактного угла смачивания и степени гидрофобности: а) исходное покрытие; б) облученное с флюенсом 10^{13} ион/см²; в) облученное с флюенсом 5×10^{13} ион/см²; г) облученное с флюенсом 10^{14} ион/см²; д) облученное с флюенсом 5×10^{14} ион/см²; е) облученное с флюенсом 10^{15} ион/см²

Согласно данным изображений капля на поверхности покрытий отчетливо видно, что увеличение флюенса облучения приводит к изменению формы каплей, которая отражает изменение гидрофильных характеристик покрытий. При высокодозном облучении ионами O^{2+} (при флюенсах выше 10^{14} ион/см²) форма капли становится более сферичной, что свидетельствует о слабой растекаемости жидкости по поверхности покрытий за счет увеличения гидрофобности поверхности.

На рисунке 2 представлена зависимость изменения величины контактного угла смачивания поверхности исследуемых нитридных покрытий, отражающая изменения степени гидрофильности/гидрофобности поверхности.

Согласно полученным данным, при флюенсах выше 10^{14} ион/см² увеличение величины контактного угла смачиваемости составляет более чем $10-12^\circ$, в то время как при флюенсе 10^{15} ион/см² величина контактного угла смачивания составляет порядка 104° , что характерно для достаточно гидрофобных поверхностей. Такое изменение величины контактного угла смачивания для облученных образцов покрытий вызвано накоплением структурных искажений поверхности пленок за счет деформационного выдавливания искаженного объема из приповерхностного слоя, что, в свою очередь, создает препятствия для растекания жидкости по поверхности покрытия.

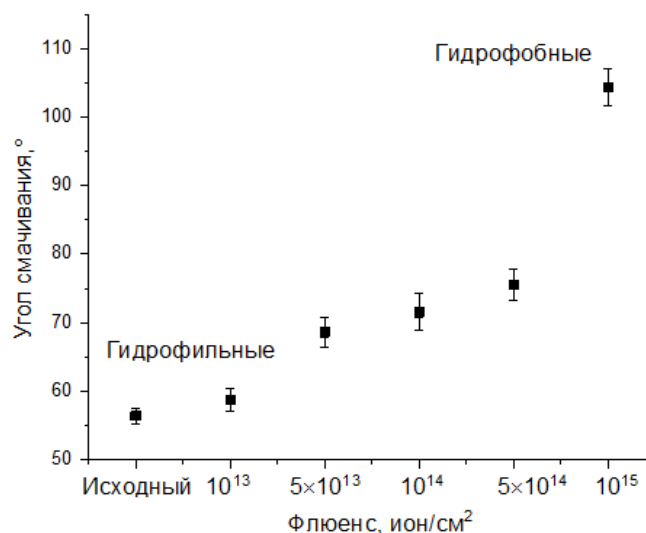


Рис. 2. Результаты изменения величины контактного угла смачивания поверхности нитридных покрытий в зависимости от флюенса облучения

На рисунке 3 представлены результаты измерений величины коэффициента сухого трения исследуемых покрытий в зависимости от флюенса облучения, которые также отражают изменение устойчивости к износу и деформации поверхности при длительных механических испытаниях.

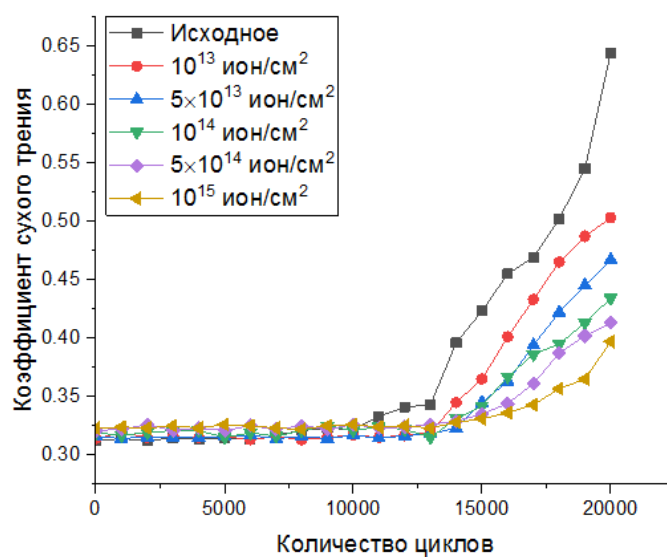


Рис. 3. Результаты изменения величины коэффициента сухого трения поверхности нитридных покрытий в зависимости от флюенса облучения

Как видно из представленных данных, увеличение флюенса облучения приводит к снижению износа поверхности, что выражается в уменьшении разницы изменений коэффициента сухого трения в начале испытания.

ний (первые циклы) и в конце испытаний (по достижении 20 000 циклов). Также в зависимости от флюенса облучения наблюдается смещение начала деградации коэффициента сухого трения (то есть количества циклов, после которых наблюдается заметное увеличение коэффициента сухого трения, свидетельствующего о деградации поверхности в результате износа). При этом если в случае исходного покрытия деградация коэффициента сухого трения после 20 000 циклов составляет более чем 2 раза, то для модифицированных покрытий с флюенсом облучения 5×10^{14} – 10^{15} ион/см² деградация составляет не более 25–30 % в сравнении с начальными значениями коэффициента сухого трения. Такое упрочнение для модифицированных покрытий обусловлено эффектами дислокационного и деформационного упрочнения, возникающего в приповерхностном слое при высокодозном облучении за счет накопления структурных искажений, наличие которых создает дополнительные дислокации в структуре. При этом наличие высокой дислокационной плотности может привести не только к упрочнению и увеличению износа поверхности (о чем свидетельствуют данные на рисунке 3), но и повышению стабильности прочностных свойств, в частности твердости и износостойкости к высокотемпературной коррозии.

На рисунке 4 представлены результаты оценки изменений твердости образцов нитридных покрытий в зависимости от времени коррозионных испытаний при различном времени выдержки образцов.

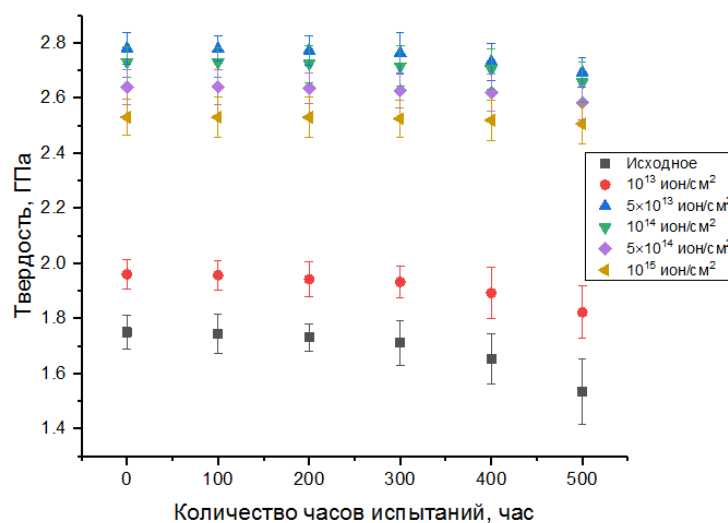


Рис. 4. Результаты изменения величины твердости образцов нитридных покрытий в зависимости от времени испытаний на устойчивость к высокотемпературной коррозии

Анализ изменения твердости нитридных покрытий после испытаний на высокотемпературную коррозию показал, что наименее устойчивыми

являются немодифицированные покрытия, для которых снижение твердости после 500 часов испытаний составляет более 12 % в сравнении с начальными значениями твердости покрытий. Такое большое снижение твердости обусловлено деградационными процессами, которые, согласно представленным данным, наиболее проявлены после 200–300 часов высокотемпературного воздействия. В случае же облученных образцов снижение твердости после 500 часов испытаний на высокотемпературную коррозию составляет порядка 1–5 %, что достаточно приемлемо для столь длительного воздействия температур, а также свидетельствует о высокой устойчивости покрытий к высокотемпературному окислению.

На рисунке 5 представлены данные изменения коэффициента сухого трения после трибологических испытаний образцов, подвергнутых высокотемпературной коррозии в зависимости от времени испытаний.

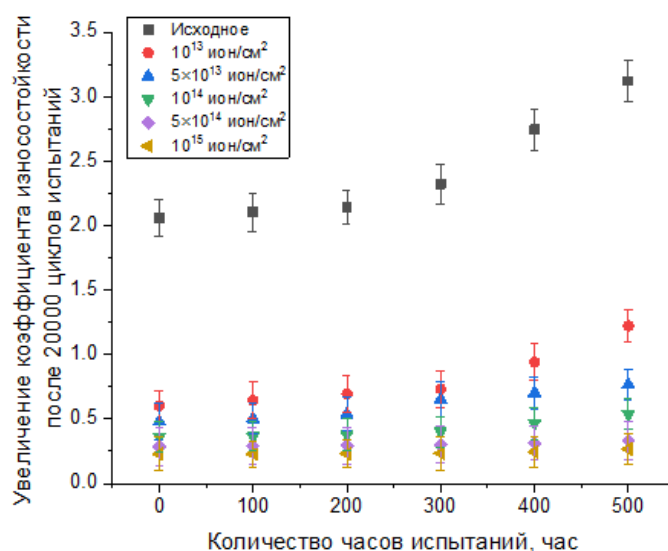


Рис. 5. Результаты изменения величины коэффициента сухого трения после трибологических испытаний образцов, подвергнутых высокотемпературной коррозии

Как видно из представленных данных, изменений величины коэффициента сухого трения после 20 000 циклов испытаний, наименее устойчивыми к высокотемпературной деградации являются немодифицированные нитридные покрытия, для которых ухудшение износа проявляется уже после 200 часов последовательных испытаний, в то время как облученные покрытия проявляют большую устойчивость к износу и высокотемпературной деградации, сохраняя свои показатели износа в пределах допустимых погрешностей (изменения составляют не более 1–2 % после 500 часов высокотемпературных испытаний).

Выводы

В заключение можно сделать ряд выводов, которые подводят общие итоги проведенных экспериментальных работ. Во-первых, анализ полученных данных изменений величин контактного угла смачивания поверхности нитридных покрытий после ионной модификации показал увеличение степени гидрофобности покрытий, что, в свою очередь, снижает скорость растекания жидкости по поверхности, а также препятствует ее проникновению вглубь покрытий при длительном воздействии, что снижает риск коррозионного воздействия. Увеличение степени гидрофобности поверхности покрытий обусловлено в первую очередь деформационными искажениями поверхности, вызванными накоплением структурных искажений в приповерхностном слое покрытий, подверженных облучению. Во-вторых, результаты оценки изменений коэффициента сухого трения в зависимости от флюенса облучения показали, что для покрытий, подвергнутых облучению флюенсом выше 10^{14} ион/см², наблюдается снижение скорости деградации поверхности в результате износа, что обусловлено деформационным упрочнением приповерхностного слоя за счет увеличения дислокационной плотности. В-третьих, в ходе проведенных испытаний на устойчивость к высокотемпературной деградации было установлено, что ионная модификация путем облучения низкоэнергетическими ионами приповерхностного слоя нитридных покрытий приводит к увеличению сопротивляемости снижению прочностных характеристик покрытий и повышению коррозионной стойкости за счет наличия дислокационных дефектов в модифицированном слое.

Список источников

1. Schiffmann, K. I. Determination of fracture toughness of bulk materials and thin films by nanoindentation : comparison of different models / K. I. Schiffmann. – DOI 10.1080/14786435.2010.487984. – Direct text // Philosophical Magazine. – 2011. – Vol. 91, Issue 7–9. – P. 1163–1178.
2. Weppelmann, E. R. Observations and simple fracture mechanics analysis of indentation fracture delamination of TiN films on silicon / E. R. Weppelmann, X. Z. Hu, M. V. Swain. – Direct text // Journal of adhesion science and technology. – 1994. – Vol. 8, Issue 6. – P. 611–624.
3. Sriram, K. A numerical fracture analysis of indentation into thin hard films on soft substrates / K. Sriram, R. Narasimhan, S. K. Biswas. – Direct text // Engineering Fracture Mechanics. – 2003. – Vol. 70, Issue 10. – P. 1323–1338.
4. Rupa, P. K. P. Mechanical and deformation behaviour of titanium diboride thin films deposited by magnetron sputtering / P. K. P. Rupa, P. C. Chakraborti, S. K. Mishra. – DOI 10.1016/j.tsf.2008.12.028. – Direct text // Thin Solid Films. – 2009. – Vol. 517, Issue 9. – P. 2912–2919.
5. Small-scale fracture toughness of ceramic thin films: the effects of specimen geometry, ion beam notching and high temperature on chromium nitride toughness evaluation / J. P. Best., J. Zechner, J. M. Wheeler [et al.]. – DOI 10.1080/14786435.2016.1223891. – Direct text // Philosophical Magazine. – 2016. – Vol. 96, Issue 32–34. – P. 3552–3569.

6. Beake, B. D. Nano-impact testing of TiFeN and TiFeMoN films for dynamic toughness evaluation / B. D. Beake, V. M. Vishnyakov, J. S. Colligon. – Text : electronic // *Journal of Physics D : Applied Physics*. – 2011. – Vol. 44, Issue 8. – URL: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/8/085301>
7. Fracture properties of thin film TiN at elevated temperatures / J. Buchinger L. Löfler, J. Ast [et al.]. – Text : electronic // *Materials & design*. – 2020. – Vol. 194. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108885>
8. Wang, A. N. Fracture toughness measurement on TiN hard coatings using internal energy induced cracking / A. N. Wang, G. P. Yu, J. H. Huang. – DOI 10.1016/j.surfcoat.2013.11.010. – Direct text // *Surface and Coatings Technology*. – 2014. – Vol. 239. – P. 20–27.
9. Di Maio, D. Measuring fracture toughness of coatings using focused-ion-beam-machined microbeams / D. Di Maio, S. G. Roberts. – DOI 10.1557/JMR.2005.0048. – Direct text // *Journal of materials research*. – 2005. – Vol. 20, Issue 2. – P. 299–302.
10. Mechanical behaviour of metallic thin films on polymeric substrates and the effect of ion beam assistance on crack propagation / M. George, C. Coupeau, J. Colin, J. Grilhé. – DOI 10.1016/j.actamat.2004.09.036. – Direct text // *Acta Materialia*. – 2005. – Vol. 53, Issue 2. – P. 411–417.

References

1. Schiffmann, K. I. (2011). Determination of fracture toughness of bulk materials and thin films by nanoindentation: comparison of different models. *Philosophical Magazine*, 91(7-9), pp. 1163-1178. (In English). DOI: 10.1080/14786435.2010.487984
2. Weppelmann, E. R., Hu, X. Z., & Swain, M. V. (1994). Observations and simple fracture mechanics analysis of indentation fracture delamination of TiN films on silicon. *Journal of adhesion science and technology*, 8(6), pp. 611-624. (In English).
3. Sriram, K., Narasimhan, R., & Biswas, S. K. (2003). A numerical fracture analysis of indentation into thin hard films on soft substrates. *Engineering Fracture Mechanics*, 70(10), pp. 1323-1338. (In English).
4. Rupa, P. K. P., Chakraborti, P. C., & Mishra, S. K. (2009). Mechanical and deformation behaviour of titanium diboride thin films deposited by magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 517(9), pp. 2912-2919. (In English). DOI: 10.1016/j.tsf.2008.12.028
5. Best, J. P., Zechner, J., Wheeler, J. M., Schoeppner, R., Morstein, M., & Michler, J. (2016). Small-scale fracture toughness of ceramic thin films: the effects of specimen geometry, ion beam notching and high temperature on chromium nitride toughness evaluation. *Philosophical Magazine*, 96(32-34), pp. 3552-3569. (In English). DOI: 10.1080/14786435.2016.1223891
6. Beake, B. D., Vishnyakov, V. M., & Colligon, J. S. (2011). Nano-impact testing of TiFeN and TiFeMoN films for dynamic toughness evaluation. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 44(8). (In English). Available at: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/8/085301>
7. Buchinger, J., Löfler, L., Ast, J., Wagner, A., Chen, Z., Michler, J., & Bartosik, M. (2020). Fracture properties of thin film TiN at elevated temperatures. *Materials & design*, (194). (In English). DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108885

8. Wang, A. N., Yu, G. P., & Huang, J. H. (2014). Fracture toughness measurement on TiN hard coatings using internal energy induced cracking. *Surface and Coatings Technology*, (239), pp. 20-27. (In English). DOI: 10.1016/j.surfcoat.2013.11.010
9. Di Maio, D., & Roberts, S. G. (2005). Measuring fracture toughness of coatings using focused-ion-beam-machined microbeams. *Journal of materials research*, 20(2), pp. 299-302. (In English). DOI: 10.1557/JMR.2005.0048
10. George, M., Coupeau, C., Colin, J., & Grilhé, J. (2005). Mechanical behaviour of metallic thin films on polymeric substrates and the effect of ion beam assistance on crack propagation. *Acta Materialia*, 53(2), pp. 411-417. (In English). DOI: 10.1016/j.actamat.2004.09.036

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, 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, 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 24.01.2024; одобрена после рецензирования 02.02.2024; принята к публикации 06.02.2024.

The article was submitted 24.01.2024; approved after reviewing 02.02.2024; accepted for publication 06.02.2024.