

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-2-64-73>

УДК 29.19.22

ИЗУЧЕНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЩИТНЫХ АНТИКОРРОЗИОННЫХ MoCrN ПОКРЫТИЙ

Е. А. Кенжин¹, Д. И. Шлимас^{1,2}, А. М. Зикирина¹, А. Л. Козловский^{2*}

¹ *Казахстанско-Британский технический университет, Алматы, Казахстан*

² *Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан*

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

Проведены экспериментальные работы, направленные на изучение трибологических характеристик MoCrN покрытий. Интерес к подобным исследованиям обусловлен в первую очередь перспективностью использования подобных покрытий в качестве антикоррозионных защитных покрытий, обладающих высокой устойчивостью к внешним механическим воздействиям, позволяющим повысить сопротивляемость стали к процессам деградации при эксплуатации и воздействию высоких температур, при которых происходит ускорение процессов окисления и аморфизации. При этом подбор оптимальных составов защитных покрытий позволяет снизить износостойкость и деградацию приповерхностных слоев стальных конструкций, а также увеличить их устойчивость к механическим повреждениям в ходе трения. Определено, что изменение условий магнетронного напыления покрытий MoCrN, приводящее к изменению соотношения элементов в составе покрытий, приводит к формированию структурно-упорядоченных покрытий, что в свою очередь имеет хорошую корреляцию с результатами упрочнения и повышения сопротивляемости к износу. Согласно полученным данным, изменение соотношения компонент, и как следствие, изменение соотношения кристаллической и аморфной составляющей в составе покрытий приводит к снижению скорости износа, что свидетельствует о повышении сопротивляемости покрытий к внешним механическим воздействиям. Результаты испытаний образцов покрытий в случае оценки устойчивости покрытий к температурному воздействию в процессе трибологических испытаний показали повышение сопротивляемости покрытий за счет вариативности изменения элементного состава и степени кристалличности.

Ключевые слова: защитные покрытия, антикоррозионные покрытия, трибологические свойства, упрочнение, трение, износостойкость.

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к изучению трибологических характеристик защитных покрытий обусловлен необходимостью изучения возможностей повышения долговечности и износостойкости механизмов или стальных конструкций, эксплуатирующихся в экстремальных условиях или агрессивных средах, воздействие которых при механическом воздействии способно привести к ускоренной дестабилизации поверхности [1–3]. Как правило, механизмы коррозии и износа имеют явно выраженную зависимость не только от среды в которой эксплуатируется материал, но и внешних воздействий, большинство из которых включает в себя механическое воздействие, трение в течение длительного времени, что при долгом воздействии может привести к резкому ухудшению поверхности и ускоренной деградации [4, 5]. При этом комбинированные эффекты, в случае, когда механическое воздействие (трение и давление) совмещается с воздействием агрессивной среды или высоких температур, процессы деградации могут быть ускорены, ввиду того, что внешние факторы могут ускорить процесс деструкции путем более интенсивного удаления или истирания защитного слоя, что приводит к дестабилизации поверхности за счет потери покрытия. Также высокие температуры способны инициировать или ускорить процессы окисления, что в свою очередь ускоряет процесс деструкции при износе, а также снижает сопротивляемость материала внешним воздействиям [6–8].

На сегодняшний день нитридные или оксинитридные покрытия являются одними из перспективных антикоррозионных и защитных покрытий, позволяющих повысить износостойкость и защитить стальные конструкции или поверхности режущих инструментов от износа и коррозионного воздействия, связанного с их эксплуатацией [9–12]. Однако, несмотря на достаточно большое количество различных исследований в данном направлении, все еще остается достаточно много нерешенных вопросов, связанных как с влиянием вариации состава покрытий и их однородности на устойчивость к износу, так и оценке влияния внешних факторов, таких как температурный нагрев, способный привести к ускорению дестабилизации покрытий и ускоренному износу и окислению [13–15].

Цель данной работы заключается в определении влияния вариации условий напыления MoCrN покрытий, связанных с вариацией мощности с 200 до 300 Вт, на изменение прочностных и трибологических характеристик исследуемых покрытий, отражающих износостойкость покрытий, а также сопротивляемость к трению и износу. Интерес к данной тематике исследований обусловлен в первую очередь возможностями применения их в качестве антикоррозионных покрытий, используемых для защиты стальных конструкций от коррозии и процессов наводораживания при эксплуатации их в экстремальных условиях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Синтез MoCrN покрытий осуществлялся с применением метода магнетронного напыления, реализация которого осуществлялась с использованием установки Auto 500 (Edwards). Вариация мощности, изменение которой позволило варьировать состав получаемых покрытий осуществлялась в диапазоне от 200 до 300 Вт. Вариация мощности напыления позволило варьировать элементный состав полученных покрытий, что, в свою очередь, позволило получить покрытия с различным соотношением компонент в составе, и, как следствие, вариации структурных особенностей и фазового состава.

Определение структурных параметров исследуемых образцов было осуществлено с использованием метода рентгеноструктурного анализа, выполненного на дифрактометре Rigaku SmartLab. На основе полученных рентгеновских дифрактограмм, путем их аппроксимации и последующего полнопрофильного анализа были определены структурные параметры, включающие в себя тип, параметры и объем кристаллической решетки, плотность упаковки кристаллической структуры, а также степень кристалличности, величина которой позволяет оценить соотношения кристаллической и аморфной фазы в образцах.

Определение элементного состава полученных покрытий было осуществлено с применением метода энергодисперсионного анализа, реализованного на растровом электронном микроскопе Hitachi TM3030. Съемка ЭДА спектров была осуществлена при ускоряющем напряжении 15 кВ с использованием двухпозиционного расположения детекторов. Усреднение полученных величин осуществлялось путем набора статистических данных с последующим вычислением однородности распределения по поверхности и определения стандартного отклонения.

Определение твердости и параметра упрочнения исследуемых образцов в зависимости от вариации условий напыления было осуществлено путем использования метода наноиндентирования, позволяющего определить значения твердости, а также роль изменения условий вариации магнетронного напыления на упрочнение, т.е. изменение твердости при вариации соотношения элементов в составе исследуемых покрытий. Эксперименты были проведены с использованием твердомера Durolin M1 (Metkon, Бурса, Турция), вариация режимов нагрузки в диапазоне 10–200 Н, позволила установить среднее значение твердости исследуемых покрытий, а также связать данные изменения с результатами вариации элементного состава [16].

Испытания на измерение коэффициента сухого трения, а также определения устойчивости к внешним механическим воздействиям было выполнено с использованием трибометра UNITEST 750 (Ducom Instruments, Бенгалуру, Индия). Испытания проводились путем последовательных испытаний с помощью индентора в форме шарика, который воздействовал

на поверхность при различной нагрузке (от 50 до 200 Н). Количество циклов повторений трения составило 20000. На основе полученных данных трибологических испытаний были определены коэффициент сухого трения (а также динамика его изменения в зависимости от количества циклов последовательных испытаний), а также профиль износа покрытий, свидетельствующих о деградации поверхности покрытий в зависимости от их типа. Причина выбора большего количества циклов обусловлена необходимостью определения кинетики деградации трибологических характеристик исследуемых покрытий, а также проведению сравнительного анализа изменений коэффициента трения при различном количестве циклов.

Для определения влияния температурных эффектов на снижение износостойкости были проведены трибологические испытания при нагреве образцов до заданных температур, что позволило оценить влияние внешних факторов на изменение скорости износа образцов. Испытания проводились в условиях вариации нагрузки на индентор с шариком, а также температуры образца, поддержание которой проводилось с использованием специальных держателей, оснащенных спиралью для нагрева и термопарами для контроля за температурой образцов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения трибологических характеристик исследуемых тонкопленочных покрытий на основе соединений MoCrN полученные методом магнетронного напыления при вариации мощности напыления в диапазоне от 200 до 300 Вт (что позволило получить 5 образцов с различным соотношением элементов в составе) был применен метод испытаний образцов на устойчивость и износостойкость к внешним факторам при механическом воздействии на поверхность покрытий. В качестве индентора, воздействующего на поверхность MoCrN покрытий был выбран шарик из карбида кремния, обладающий высокой устойчивостью к трению, а также позволяющий проводить достаточно длительные испытания на поверхности образцов без потери массы шарика в результате трения. Образцы MoCrN покрытий помещались в специальные держатели для испытаний, после чего на них воздействовал индентор при постоянной нагрузке в выбранном режиме испытаний. Вариация диапазона нагрузки от 50 до 200 Н была обусловлена возможностью определения устойчивости MoCrN покрытий к различным типам воздействий, а также определению скорости деградации поверхности при увеличении нагрузки. На рисунке 1 представлены результаты тестовых испытаний трибологических характеристик (коэффициента сухого трения) в зависимости от нагрузки на индентор для всех исследуемых MoCrN покрытий в сравнении с результатами коэффициента сухого трения для стали 316 L, которая использовалась в качестве основы для нанесения покрытий. Общий вид представленных зависимостей

изменения коэффициента сухого трения для исследуемых образцов MoCrN покрытий в сравнении с образцом стали 316 L свидетельствует о незначительном увеличении коэффициента сухого трения для покрытий, что может быть объяснено их морфологическими особенностями, связанными с увеличением шероховатости поверхности за счет нанесенного покрытия, сформированного методом магнетронного напыления. При этом вариация условий магнетронного напыления MoCrN покрытий (при изменении мощности) не приводит к существенным изменениям значений коэффициента сухого трения в случае сравнения величин коэффициента для покрытий, полученных при различных условиях напыления. Стоит отметить, что во всех случаях испытаний на износостойкость (при вариации изменений величины нагрузки на индентор), основные изменения величины коэффициента сухого трения наблюдаются после 10000–12000 последовательных испытаний, что свидетельствует о достаточно высокой устойчивости материалов к внешним воздействиям при механическом трении. При этом в отличие от образцов стали 316 L, для которых наблюдается резкое увеличение

величины коэффициента сухого трения после 15000–17000 испытаний, которое свидетельствует об ухудшении поверхности стали и образованию дополнительных препятствий, увеличивающих трение, для покрытий данные изменения величины коэффициента сухого трения менее выражены, чем для стали 316 L. Такое различие в изменениях величины коэффициента сухого трения для образцов с нанесенными на них MoCrN покрытиями свидетельствует о повышенной устойчивости к износу и трению. При этом характер изменений коэффициента сухого трения для MoCrN покрытий после 15000 циклов более плавный, чем для стали 316 L.

Анализ данных изменений величины коэффициента сухого трения для исследуемых образцов в зависимости от величины нагрузки на индентор свидетельствует о том, что при увеличении силы давления на индентор, деградация поверхности при большом количестве испытаний становится более выраженной, о чем свидетельствует увеличение изменений коэффициента сухого трения после 15000 циклов испытаний (данные изменения наиболее выражены при нагрузках в 150–200 Н).

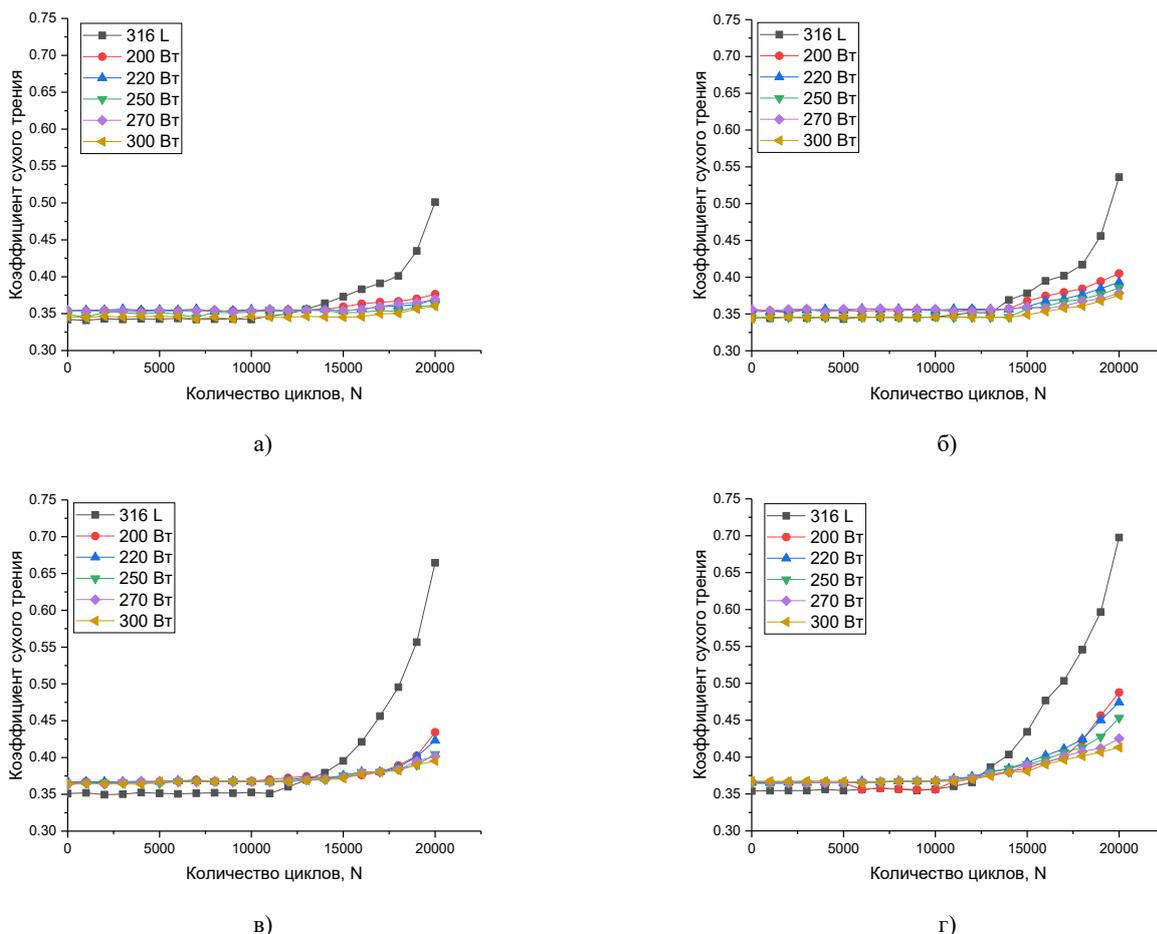


Рисунок 1. Результаты испытаний на определение трибологических характеристик исследуемых MoCrN покрытий при изменении величины нагрузки на индентор: а) при нагрузке в 50 Н; б) при нагрузке в 100 Н; в) при нагрузке в 150 Н; г) при нагрузке в 200 Н

Данные изменения связаны с ухудшением поверхности образцов в результате внешних механических воздействий, связанных с длительным воздействием индентора (тела трения), что приводит к деградации поверхности за счет деформационных искажений, возникающих в результате внешнего давления. При этом увеличение нагрузки на индентор приводит к более ускоренному процессу деградации поверхности за счет увеличения деформационных искажений в приповерхностном слое, вызванных механическим трением. Стоит отметить, что наиболее выраженные деформации наблюдаются для стали 316 L, для которой увеличение нагрузки на индентор приводит к увеличению коэффициента сухого трения с 0,55 до 0,65–0,72 после 20000 циклов испытаний. При этом для MoCrN покрытий изменение коэффициента сухого трения значительно меньше, чем для стали 316 L.

На рисунке 2 представлены результаты изменения профиля износа поверхности исследуемых образцов стали 316 L и MoCrN покрытий после 20000 циклов испытаний на износостойкость, которые отражают деградацию поверхности при трении, а величина профиля по глубине отражает потерю массы образца в ходе трибологических испытаний.

Как видно из представленных данных, увеличение нагрузки на индентор приводит к большему износу поверхности (увеличение глубины профиля износа), которое наиболее проявлено для стали 316 L. В случае MoCrN покрытий изменение элементного состава, т.е. доминирование в составе покрытий молибдена приводит к снижению величины профиля износа (уменьшение глубины износа), которое свидетельствует об увеличении устойчивости к износу и деградации поверхности в результате внешних механических воздействий.

Определение прочностных характеристик проводилось на основе сравнительного анализа изменений коэффициента сухого трения поверхности MoCrN покрытий в зависимости от величины нагрузки, а скорость износа определялась как изменение величины коэффициента сухого трения поверхности MoCrN покрытий до и после циклических испытаний (после 20000 циклов испытаний). На рисунке 3а представлены результаты сравнительного анализа изменений коэффициента сухого трения образцов MoCrN покрытий и стали 316 L при изменении величины нагрузки на индентор.

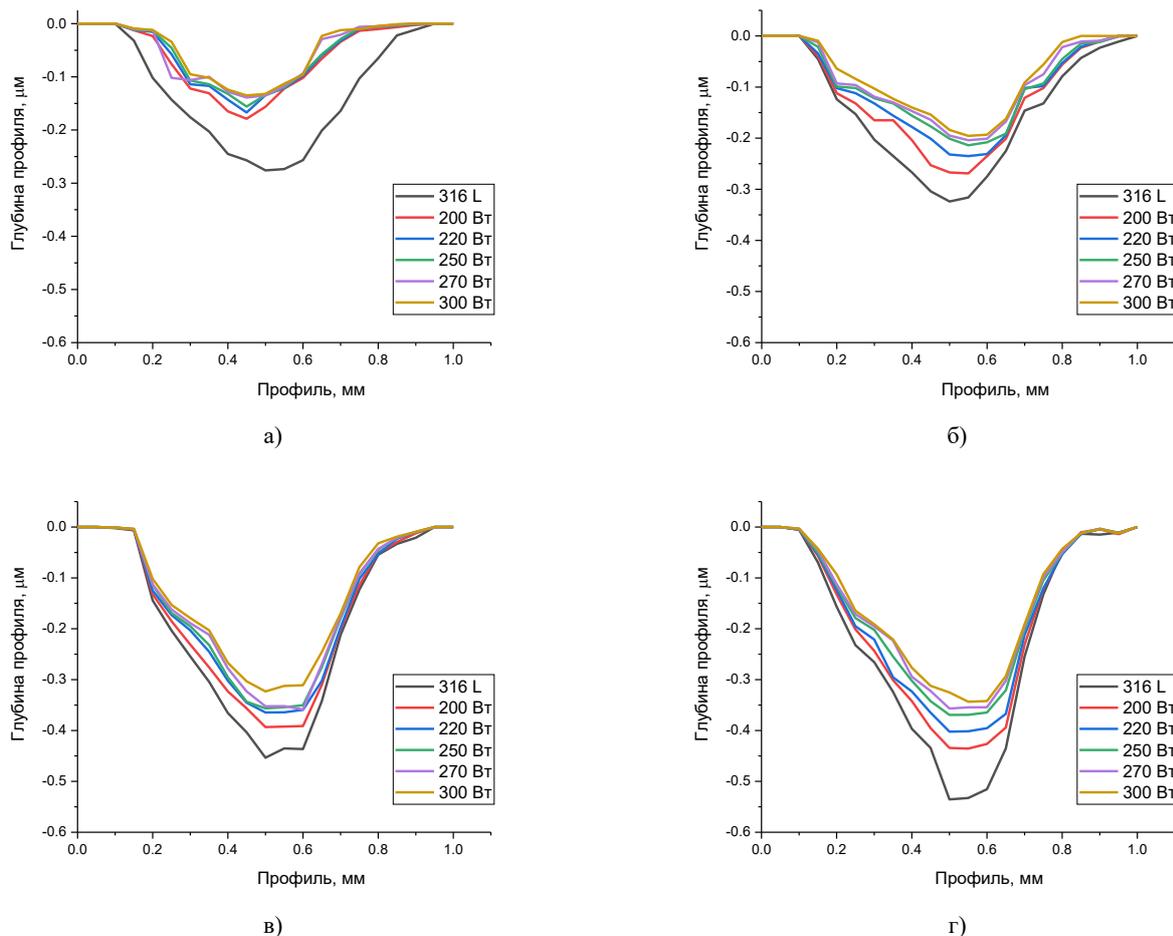


Рисунок 2. Результаты оценки профиля повреждений после 20000 циклов испытаний на устойчивость к трению: а) при нагрузке в 50 Н; б) при нагрузке в 100 Н; в) при нагрузке в 150 Н; г) при нагрузке в 200 Н

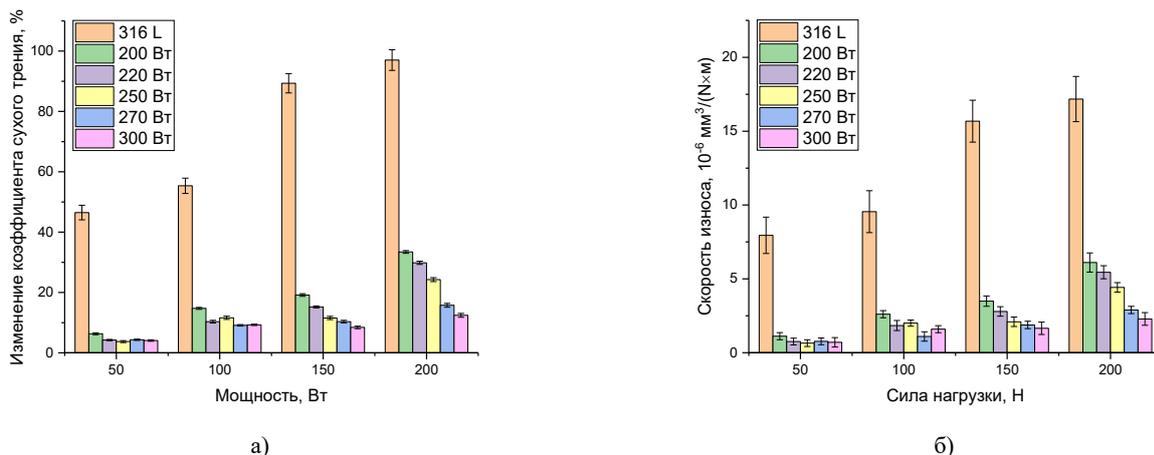


Рисунок 3. а) Результаты изменения коэффициента сухого трения стали 316 L и MoCrN покрытий; б) Результаты сравнительного анализа скорости износа в ходе определения трибологических характеристик MoCrN покрытий при изменении силы нагрузки на индентор

Как видно из представленных данных, увеличение нагрузки на индентор с 50 до 150–200 Н для образцов стали приводит к более чем 1,5–2 кратному увеличению изменений коэффициента сухого трения, что свидетельствует об ускоренной деградации поверхности образцов стали. При этом следует отметить, что при малых величинах нагрузки (50–100 Н) изменение условий получения покрытий не сказывается на изменениях коэффициента сухого трения (деградация величины коэффициента составляет порядка 3–10% от начального значения), в то время как при больших нагрузках на индентор наблюдается более чем 1,5–2,5 кратная разница в величинах деградации коэффициента сухого трения. В этом случае доминирование в составе покрытий молибдена приводит к увеличению устойчивости к деградации и повышению износостойкости покрытий при больших нагрузках и длительных испытаниях.

Сравнительный анализ влияния условий получения MoCrN покрытий на изменение трибологических характеристик проводился на основе полученных данных скоростей износа, а также профилей износа, возникающих в результате длительных циклических испытаний качающегося тела по поверхности образца покрытий при различных типах воздействия. Определение скорости износа было осуществлено для всех типов образцов подвергнутых испытаниям при различных величинах нагрузки и температурах испытаний. На рисунке 3б представлены результаты оценки сравнительного анализа скорости износа в ходе определения трибологических характеристик MoCrN покрытий в зависимости от величины нагрузки на индентор. Как видно из представленных данных, в случае использования MoCrN покрытий

наблюдается существенное снижение скорости износа, что свидетельствует об увеличении износостойкости поверхности и защиты от деградации поверхности. При этом в случае малых нагрузок (50–100 Н) существенной разницы в величины скорости износа между типами покрытий не наблюдается, что свидетельствует о том, что при малых нагрузках на индентор, изменение элементного состава покрытий не оказывает существенного влияния.

Также была проведена серия испытаний при нагрузке на индентор 100 Н при вариации температуры образцов во время испытаний от 25 °С до 300 °С, что позволило оценить влияние температурных факторов нагрева на скорость деградации поверхности. Для подобных испытаний образцы размещались на нагревателе, с прикрепленными термодатчиками на образце, позволяющими контролировать прогрев образца, а также температуру образца в ходе испытаний. Следует отметить, что при испытаниях на износостойкость образцов в результате изменений температуры, существенных изменений температуры образцов при длительном механическом воздействии вблизи индентора не установлено, что свидетельствует о том, что данные покрытия сохраняют термическую стабильность и теплопроводность при механическом трении, что в свою очередь свидетельствует об отсутствии процессов перегрева поверхности образцов при механическом трении. Результаты испытаний по определению трибологических характеристик при изменении температуры образцов представлены на рисунке 4. На рисунке 5 представлены результаты оценки профиля износа поверхности исследуемых образцов стали 316 L и MoCrN покрытий в зависимости от температуры нагрева.

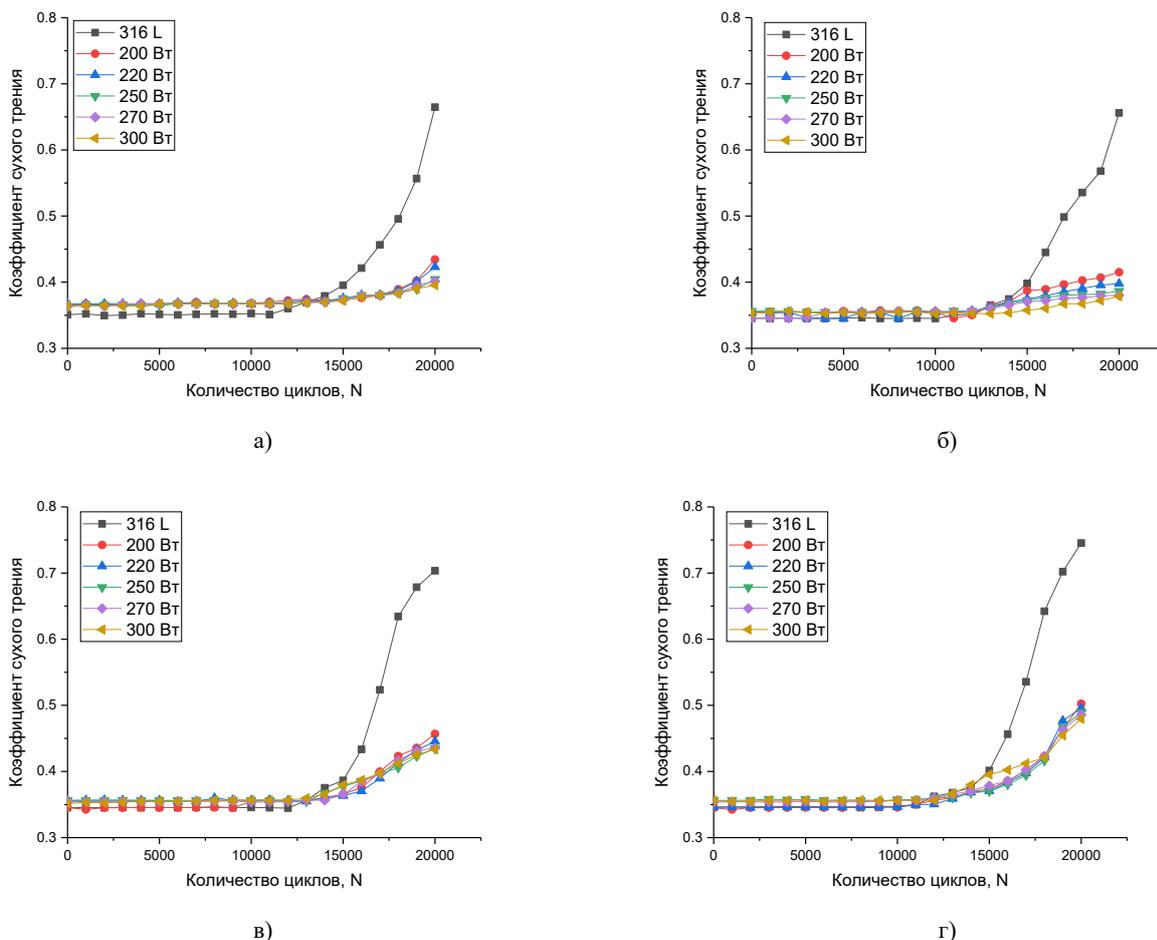


Рисунок 4. Результаты испытаний по определению трибологических характеристик исследуемых MoCrN покрытий при вариации температуры испытаний: а) при температуре 25 °С; б) при температуре 100 °С; в) при температуре 200 °С; г) при температуре 300 °С

Таблица 1. Данные элементного состава и твердости MoCrN покрытий

Параметр	Условия напыления (мощность), Вт				
	200	220	250	270	300
Соотношение элементов Mo/Cr/N, ат. %	23,2/33,3/43,5	25,5/32,2/42,3	27,2/31,2/41,6	33,5/25,1/41,4	41,1/18,7/40,2
Твердость, ГПа	1,63±0,15	1,78±0,12	2,21±0,13	2,54±0,15	2,78±0,12

Общий вид представленных данных изменений трибологических характеристик исследуемых MoCrN покрытий в зависимости от температуры испытаний, свидетельствует о том, что при увеличении температуры образцов, износ поверхности проявляется более сильнее, чем при комнатной температуре, что может быть объяснено эффектами ускорения деградации кристаллической структуры поверхности покрытий за счет изменения величины амплитуды тепловых колебаний кристаллической решетки.

В таблице 1 приведены результаты изменения соотношения элементов в составе покрытий при вариации

условий напыления, а также величины твердости, отражающие эффект упрочнения покрытий за счет изменения элементного состава.

Согласно представленным данным, полученным с применением метода индентирования было установлено, что частичное вытеснение хрома молибденом при изменении мощности напыления приводит к увеличению твердости покрытий, и как следствие, повышению сопротивляемости к внешним воздействиям, что также в свою очередь объясняет результаты изменения износостойкости покрытий при трибологических испытаниях.

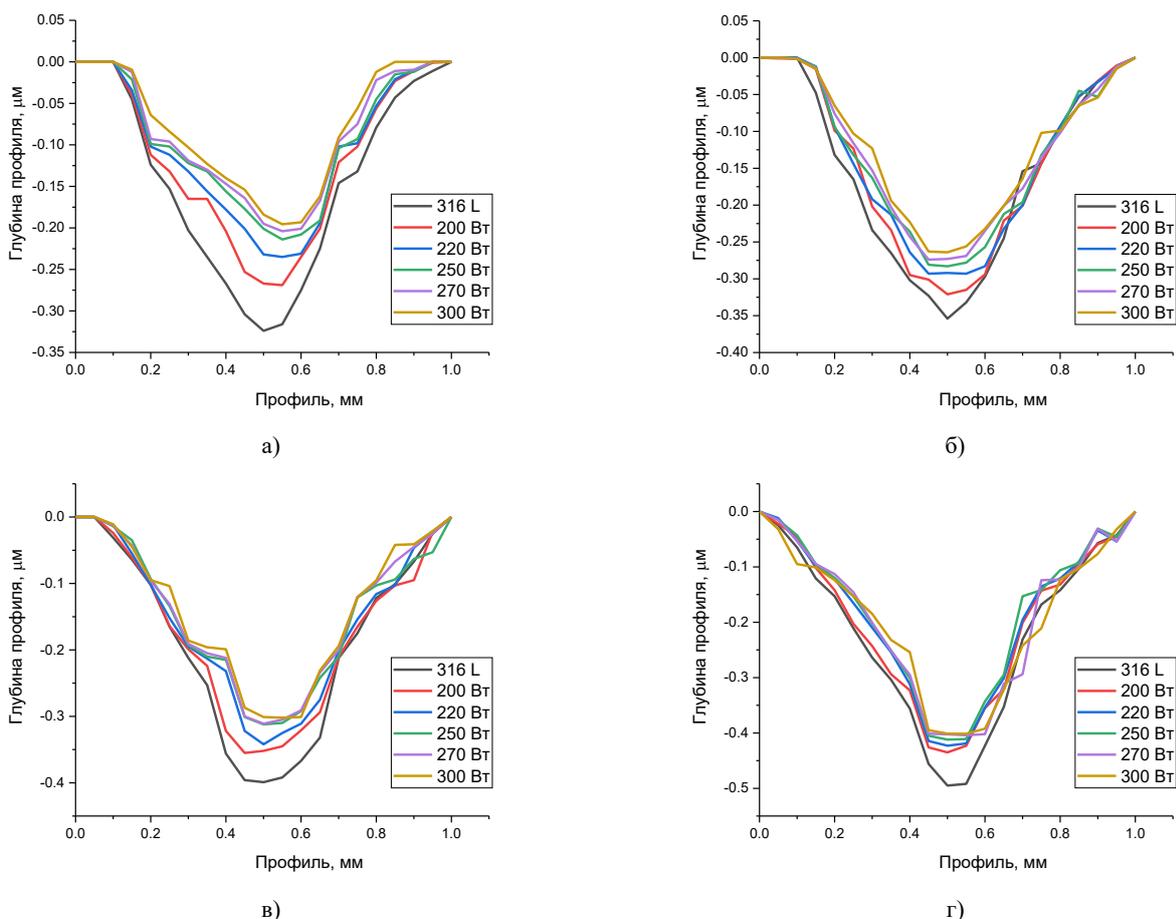


Рисунок 5. Результаты оценки профиля повреждений после 20000 циклов испытаний на устойчивость к трению: а) при температуре 25 °С; б) при температуре 100 °С; в) при температуре 200 °С; г) при температуре 300 °С

Для определения влияния условий напыления на изменение фазового состава пленок, а также соотношения степени кристалличности и концентрации аморфных включений, а также их роли в изменении прочностных характеристик MoCrN покрытий и факторов упрочнения были проведены работы, связанные с изучением фазового состава покрытий с применением метода рентгенофазового анализа.

Согласно полученным данным, основной фазой в образцах MoCrN является кубическая фаза MoN, пространственной сингонии Fm-3m(225) с параметрами кристаллической решетки, отличающимися от эталонных значений ввиду искажений кристаллических связей Mo-N за счет частичного замещения катионов Mo³⁺ катионами Cr³⁺ в позициях октаэдра.

В таблице 2 приведены результаты оценки структурных параметров для наблюдаемой фазы MoN кубического типа, а также отражены величины степени кристалличности (степень структурного упорядочения, отражающая изменение соотношения кристаллической и аморфной фазы в составе образцов) и параметра сходимости кристаллической решетки, отражающего упорядоченность кристаллической структуры относительно эталонных значений для фазы MoN (a = 4,36 Å).

Таблица 2. Данные структурных параметров для исследуемых MoCrN покрытий

Структурный параметр	Условия напыления (мощность), Вт				
	200	220	250	270	300
Параметр кристаллической решетки, Å	4,3745	4,3716	4,3625	4,3592	4,3563
Объем кристаллической решетки, Å ³	83,71	83,54	83,02	82,83	82,67
Плотность упаковки кристаллической структуры, %	1,01	0,82	0,17	0,06	0,25
Параметр сходимости кристаллической решетки	0,985	0,988	0,997	1,001	1,004
Степень кристалличности, %	56,64	59,65	63,44	67,83	69,72

Как видно из представленных данных, изменение элементного состава в покрытиях при замещении молибдена хромом, наблюдаемое уменьшение параметров кристаллической решетки фазы MoN обусловлено различиями в ионных радиусах, величины которых составляют 83 пм и 63 пм для катионов Mo³⁺ и Cr³⁺ соответственно. Катионное замещение приводит к изменению не только параметра кристаллической

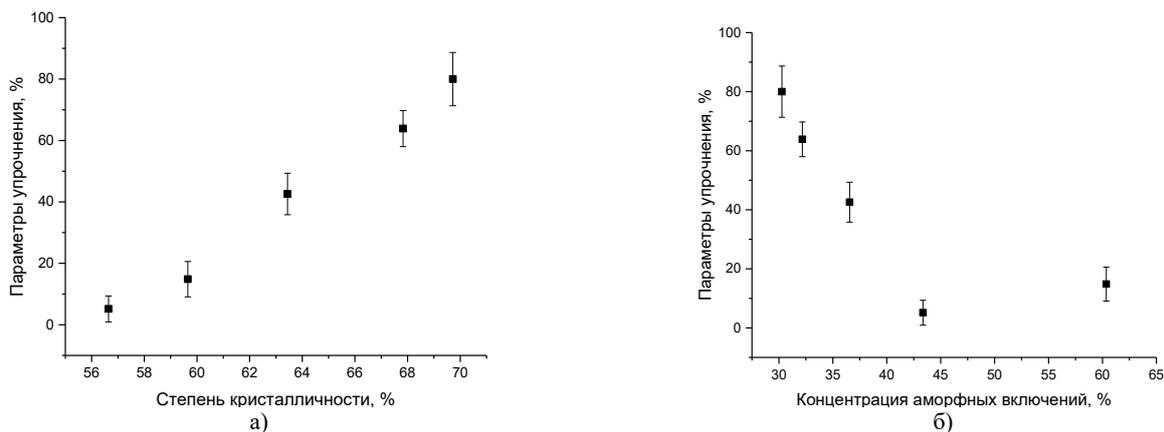


Рисунок 6. Результаты сравнительного анализа взаимосвязи между упрочнением и концентрациями кристаллической (а) и аморфной (б) фазы

решетки, но и уменьшению ее объема, изменение которого свидетельствует об уплотнении кристаллической структуры получаемых покрытий. Наблюдаемое уплотнение обусловлено формированием более упорядоченной кристаллической структуры, из чего можно сделать вывод о том, что при вариации мощности напыления, установленное изменение соотношение элементов в составе покрытий напрямую влияет на изменение структурных параметров, изменение которых обуславливает получение более структурно-упорядоченных покрытий, а также образованию покрытий с параметром сходимости кристаллической решетки максимально приближенной к эталонному значению, а сама величина параметра сходимости в совокупности с результатами плотности упаковки кристаллической структуры и параметров свидетельствует о снижении деформационных искажений и напряжений в получаемых пленках.

Установленные величины степени кристалличности, отражающие изменение соотношения вкладов кристаллической и аморфной фазы в составе покрытий в зависимости от мощности напыления показали, что увеличение мощности приводит к вытеснению из состава аморфной фазы за счет ускорения процессов кристаллизации и уплотнения покрытий, получаемых в результате вариации соотношения элементов в составе. При этом сравнительный анализ оценки величины степени кристалличности и упрочнения (величины изменения твердости) свидетельствует о прямой корреляции между концентрацией аморфных включений и изменений твердости покрытий (см. данные на рисунке 6).

Согласно представленным данным, прямая корреляция между изменением соотношения кристаллической и аморфной фазы в составе образцов и упрочнением свидетельствует о возможности упрочнения покрытий не только за счет изменения элементного состава, но и за счет вариации степени кристалличности, изменение которой в свою очередь можно добиться не только варьированием условий напыления,

но и методами термической релаксации деформации и снижения аморфных включений при термическом отжиге образцов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты оценки влияния вариации условий магнетронного напыления MoCrN покрытий, включающие в себя изменения мощности в диапазоне от 200 до 300 Вт, на изменение прочностных и трибологических параметров исследуемых покрытий с целью выявления оптимальных условий получения высокопрочных и износостойких покрытий, обладающих большим потенциалом использования в качестве антикоррозионных покрытий.

Согласно проведенным исследованиям, установленная прямая корреляция между изменением степени кристалличности, выражающейся в уменьшении концентрации структурно-разупорядоченных (аморфных) включений в составе покрытий, и упрочнением, т.е. увеличение твердости покрытий.

Определение трибологических характеристик проводилось с использованием стандартного метода скреж-теста на определение устойчивости к износостойкости при длительном механическом воздействии на поверхность образца качающегося тела (шарика из карбида кремния). В ходе проведенных испытаний на определение трибологических характеристик было установлено, что нанесение MoCrN покрытий на поверхность стали приводит к увеличению износостойкости поверхности более чем в 1,5–2 раза в сравнении со сталью 316 L. При этом устойчивость к износу наблюдается как в случае увеличения нагрузки на индентор, так и в случае проведения экспериментальных работ при увеличении температуры образцов. Следует также отметить, что в случае малых нагрузок (50–100 Н) изменение условий нанесения MoCrN покрытий (при вариации которых наблюдается изменение соотношения элементного состава) не оказывает существенного влияния на изменение устойчивости к износу, в то время как при больших на-

грузках (150–200 Н) доминирование в составе покрытий молибдена приводит к увеличению износостойкости покрытий более чем в 1.5 раза.

Дальнейшие планы в данном направлении исследований будут направлены на изучение перспектив применения предлагаемых покрытий для защиты стальных конструкций от процессов наводороживания и сдерживания коррозионных процессов возникающих при взаимодействии покрытий с агрессивными средами. При этом полученные результаты трибологических испытаний позволят оценить кинетику устойчивости покрытий к внешним воздействиям.

Сведения об авторах

Е. А. Кенжин – к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник Казахстанско-Британского технического университета, Алматы, Казахстан.

E-mail: kenzhin@inp.kz

Д. И. Шлимас – PhD, преподаватель-исследователь ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан.

E-mail: shlimas@mail.ru

А.М. Зикирина – PhD, старший преподаватель ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан.

E-mail: agun_zikirina@mail.ru

А. Л. Козловский – PhD, доцент, преподаватель-исследователь ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан. E-mail: kozlovskiy.a@inp.kz

Финансирование

Исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (№ BR21882301).

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Fenker M. et al. Formation of solid lubricants during high temperature tribology of silver-doped molybdenum nitride coatings deposited by dcMS and HIPIMS // *Coatings*. – 2021. – Vol. 11, No. 11. – P. 1415.
- Liu C. et al. Influence of copper on the compositions, microstructure and room and elevated temperature tribological properties of the molybdenum nitride film // *Surface and Coatings Technology*. – 2020. – Vol. 395. – P. 125811.
- Gilewicz A., Warcholinski B., Murzynski D. The properties of molybdenum nitride coatings obtained by cathodic arc evaporation // *Surface and Coatings Technology*. – 2013. – Vol. 236. – P. 149-158.
- Hudec T. et al. Tribological behaviour of Mo-SN solid lubricant coatings in vacuum, nitrogen gas and elevated temperatures // *Surface and Coatings Technology*. – 2021. – Vol. 405. – P. 126722.
- Liu C. et al. Tribological properties of Mo₂N films at elevated temperature // *Coatings*. – 2019. – Vol. 9, No. 11. – P. 734.
- Wang J. et al. Nanostructured molybdenum nitride-based coatings: Effect of nitrogen concentration on microstructure and mechanical properties // *Thin Solid Films*. – 2019. – Vol. 682. – P. 82–92.
- Polcar T., Parreira N. M. G., Cavaleiro A. Tribological characterization of tungsten nitride coatings deposited by reactive magnetron sputtering // *Wear*. – 2007. – Vol. 262, No. 5–6. – P. 655–665.
- Рахадиллов Б. К. и др. Исследование трибологических свойств детонационных покрытий на основе оксида алюминия и карбида вольфрама // *Вестник НЯЦ РК*. – 2023. – № 3. – С. 168-173. [Rakhadilov B.K. et al. Investigation of tribological properties of detonation coatings based on aluminum oxide and tungsten carbide // *NNC RK Bulletin*. – 2023. No. 3. – P. 168–173. (In Russ.)] <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-3-168-173>
- Liu Y., Shi J. Design of a smart protective coating with molybdate-loaded halloysite nanotubes towards corrosion protection in reinforced concrete // *Cement and Concrete Composites*. – 2024. – Vol. 147. – P. 105419.
- Shuai W. et al. Preparation and characterization of La-doped Y3Al5O12 as a potential protective coating material against CMAS corrosion // *Surface and Coatings Technology*. – 2024. – Vol. 476. – P. 130188.
- Thakran M., Lata S. Polybenzopyrrole/nano-alumina composite blend with zirconium silicate reinforced epoxy as protective coating to subside corrosion of carbon steel within a dilute NaCl solution // *Journal of Molecular Structure*. – 2024. – Vol. 1298. – P. 137068.
- Belgroune A. et al. In Vitro Corrosion and Wear Investigation of Multifunctional TiAlMoN Sputtered Coatings on Cold-Sprayed SS316L // *ACS Applied Engineering Materials*. – 2024. – Vol. 2, No. 2. – P. 345–359.
- Yang Q. Wear resistance and solid lubricity of molybdenum-containing nitride coatings deposited by cathodic arc evaporation // *Surface and Coatings Technology*. – 2017. – Vol. 332. – P. 283–295.
- Yi B. et al. The influences of pulsed bias duty cycle on tribological properties of solid lubricating TiMoCN coatings // *Vacuum*. – 2020. – Vol. 180. – P. 109552.
- Ibrahim K. et al. A first-principles study of the electronic, structural, and optical properties of CrN and Mo: CrN clusters // *Ceramics International*. – 2019. – Vol. 45, No. 14. – P. 17094–17102.
- Кенжин Е. А. и др. Изучение вариации условий напыления на изменение механических характеристик MoCrN покрытий // *Вестник НЯЦ РК*. – 2024. – № 2. – С. 120–127. [Kenzhin Ye.A. et al. Investigation of variation of spraying conditions on variation of strength characteristics of MoCrN coatings // *NNC RK Bulletin*. – 2024. No. 2. – P. 120–127. (In Russ.)] <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-2-120-127>

**ҚОРҒАУШЫ АНТИКОРРОЗИЯЛЫҚ MoCrN ЖАБЫНДАРЫНЫҢ
ТРИБОЛОГИЯЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫН ЗЕРТТЕУ****Е. А. Кенжин¹, Д. И. Шлимас^{1,2}, А. М. Зикирина¹, А. Л. Козловский^{2*}**¹ *Қазақстан-Британ техникалық университеті, Алматы, Қазақстан*² *Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан** *Байланыс үшін E-mail: kozlovskiy.a@inp.kz*

MoCrN жабындарының трибологиялық сипаттамаларын зерттеуге бағытталған эксперименттік жұмыстар жүргізілді. Мұндай зерттеулерге қызығушылық, ең алдымен, олардың жоғары механикалық төзімділігімен ерекшеленетін антикоррозиялық қорғаныш жабындар ретінде қолдану әлеуетімен байланысты. Бұл жабындар болатын пайдалану кезіндегі деградация процестеріне және тотығу мен аморфизацияны жылдамдататын жоғары температуралардың әсеріне төзімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Қорғаныш жабындарының оңтайлы құрамын таңдау арқылы болат конструкциялардың беттік қабаттарының тозуы мен деградациясын төмендетуге және үйкеліс кезінде олардың механикалық зақымдануға төзімділігін арттыруға болады. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, MoCrN жабындарын магнетрондық бүрку шарттарын өзгерту жабындардың құрамындағы элементтердің арақатынасының өзгеруіне алып келеді, бұл өз кезегінде құрылымдық реттелген жабындардың қалыптасуын қамтамасыз етеді. Бұл процесс жабындардың қаттылығы мен тозуға төзімділігінің артуымен жақсы корреляцияланады. Алынған деректерге сәйкес, құрамдас бөліктердің арақатынасын өзгерту, яғни жабындардың кристалды және аморфты фазаларының арақатынасының өзгеруі, тозу жылдамдығының төмендеуіне әкеледі, бұл олардың сыртқы механикалық әсерлерге төзімділігінің артқанын көрсетеді. Трибологиялық сынақтар барысында жабындардың температуралық әсерлерге төзімділігін бағалау нәтижелері элементтік құрам мен кристалдылық дәрежесінің өзгеруінің жабындардың тозуға төзімділігін арттыруға ықпал ететінін көрсетті.

Түйін сөздер: *қорғаныш жабындар, антикоррозиялық жабындар, трибологиялық қасиеттер, беріктендіру, үйкеліс, тозуға төзімділік.*

**STUDY OF TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS
OF PROTECTIVE ANTICORROSIVE MoCrN COATINGS****E. A. Kenzhin¹, D. I. Shlimas^{1,2}, A. M. Zikirina¹, A. L. Kozlovskiy^{2*}**¹ *Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan*² *L.N. Gumilev Eurasian National University, Astana, Kazakhstan** *E-mail for contacts: kozlovskiy.a@inp.kz*

Experimental works aimed at studying tribological characteristics of MoCrN coatings have been carried out. Interest in such studies is primarily due to the prospect of using such coatings as anticorrosive protective coatings with high resistance to external mechanical effects, allowing to increase the resistance of steel to degradation processes during operation and high temperatures at which oxidation and amorphization processes are accelerated. The selection of optimal compositions of protective coatings allows to reduce wear resistance and degradation of near-surface layers of steel structures, as well as to increase their resistance to mechanical damage during friction. It is determined that the change of conditions of magnetron sputtering of MoCrN coatings, leading to a change in the ratio of elements in the composition of coatings, leads to the formation of structurally-ordered coatings, which in turn has a good correlation with the results of hardening and increasing resistance to wear. According to the obtained data, the change in the ratio of components, and as a consequence, the change in the ratio of crystalline and amorphous components in the composition of coatings leads to a decrease in the rate of wear, which indicates an increase in the resistance of coatings to external mechanical influences. The test results of coating samples in the case of assessing the resistance of coatings to temperature effects in the process of tribological tests showed an increase in the resistance of coatings due to the variability of changes in the elemental composition and degree of crystallinity.

Keywords: *protective coatings, anticorrosive coatings, tribological properties, hardening, friction, wear resistance.*