

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-2-120-127>

УДК 29.19.22

ИЗУЧЕНИЕ ВАРИАЦИИ УСЛОВИЙ НАПЫЛЕНИЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК 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

Интерес к тонкопленочным защитным покрытиям на основе нитридных соединений молибдена и хрома обусловлен большими перспективами использования их в качестве износостойких антикоррозионных покрытий, обладающих высокой устойчивостью как внешним воздействиям в виде механического трения, давления, так и процессам коррозии, при воздействии агрессивных сред, наводороживании или высоких температур. Однако показатели устойчивости нитридных покрытий в первую очередь определяются условиями их получения, которые не в последнюю очередь зависят от мощности магнетронного напыления, вариация которой позволяет изменять соотношение элементов в составе покрытий. Ключевая цель проведенных исследований заключается в проведении измерений прочностных характеристик измеренных методом индентирования в зависимости от условий получения покрытий при вариации мощности напыления, а также установлению влияния вариации условий получения тонкопленочных покрытий на изменение твердости и факторов упрочнения. Согласно представленным данным изменение условий магнетронного напыления путем вариации мощности приводит к формированию более прочных устойчивых покрытий, обладающих высокой сопротивляемостью к растрескиванию при изменении внешней нагрузки. В ходе проведенных исследований было определено, что изменение условий магнетронного напыления покрытий, приводящее к увеличению концентрации молибдена в составе покрытий, приводит к более чем 60–80% упрочнению, а также увеличению устойчивости к растрескиванию при внешних воздействиях.

Ключевые слова: тонкопленочные покрытия, упрочнение, твердость, прочность, износостойкость, нитридные покрытия.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы большое внимание уделяется поиску решений проблем защиты от коррозии и деградации, в том числе процессов наводороживания. Одними из наиболее оптимальных решений в данном направлении являются технологические изыскания, связанные с возможностями нанесения защитных покрытий методом магнетронного напыления на поверхности сталей и сплавов в виде тонких пленок, которые способны снизить деградационные процессы, а в некоторых случаях увеличить устойчивость материалов к деградации при коррозии в несколько раз [1–3]. Интерес к использованию данной технологии для нанесения защитных покрытий заключается в большом количестве разработок в данном направлении, широкой распространенности использования методов магнетронного напыления различных соединений, в том числе многокомпонентных оксидных или нитридных соединений, а также возможностях нанесения данных покрытий практически на любую поверхность любой геометрии [4, 5]. При этом варьирования условий магнетронного напыления, в том числе использование различных комбинаций мишеней или условий напыления (мощности, соотношения газов и т.д.) позволяет получать покрытия в виде пленок с различным соотношением элементов, которое, как известно, является определяющим в прочностных характеристиках покрытий [6, 7]. Вариация условий напыления является одним из управляющих

факторов, использование которого позволяет контролируемо получать покрытия с заданным элементным составом, а также управляемыми прочностными и антикоррозионными свойствами. При этом использование метода магнетронного напыления для нанесения защитных покрытий является одним из наиболее продуктивных методов защиты стальных конструкций от процессов высокотемпературной деградации, а также коррозионного воздействия агрессивных сред, включая газовые среды, приводящие к наводороживанию [8–10].

Использование в свою очередь нитридных соединений в последние несколько лет позволило получить ряд новых уникальных данных об эффективности повышения устойчивости к внешним воздействиям, включая процессы наводороживания и деструкции при высокотемпературной коррозии, однако до конца данные вопросы еще не проработаны и остается много нерешенных вопросов в данном направлении [11–14].

Основная цель представленного исследования заключается в определении влияния вариации условий магнетронного напыления, в частности, изменений мощности, на эффекты упрочнения, обусловленные изменением элементного состава получаемых покрытий, а также определении наиболее оптимальных условий получения покрытий, обладающих высокими прочностными характеристиками.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Тонкопленочные покрытия на основе соединений MoCrN полученные методом магнетронного напыления при вариации условий напыления (изменении мощности в диапазоне от 200 до 300 Вт). Напыление покрытий было осуществлено с применением метода высокочастотного магнетронного распыления, реализованном на установке Auto 500 (Edwards). Варьирование мощности было осуществлено в диапазоне от 200 до 300 Вт, при рабочем давлении газа $6 \cdot 10^{-3}$ мбар. Время послойного напыления составляло 2 минуты на слой (толщина 1 слоя составляла порядка 30 нм). Общее количество слоев составляло 35, что позволило получить покрытия толщиной порядка 1 мкм.

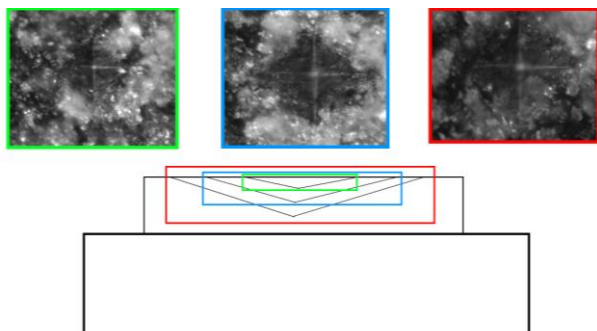


Рисунок 1. Схема проведения измерений индентирования с целью определения твердости при вариации величины нагрузки на индентор (цветами обозначены участки измерений на различной глубине с отражением размеров отпечатка индентора)

В качестве основного метода определения механических характеристик был выбран метод индентирования реализованный с применением микротвердомера Duroline M1 (Metkon, Бурса, Турция), в котором в качестве индентора использовалась пирамида Виккерса (алмазная пирамидка), а измерение проводилось путем воздействия индентора на образец при различной нагрузке (от 10 до 200 Н) с целью определения однородности твердости образцов на различной глубине. Количество измерений на каждый тип покрытий составлял порядка 20–25 измерений, количество которых было выбрано с целью установления изотропности значений твердости образцов, полученных методом магнетронного напыления, а также получения величин среднеквадратичного отклонения и погрешности измерений. Все измерения были выполнены путем перемещения индентора по поверхности образца на расстояние между двумя последовательными измерениями (расстояние между отпечатками индентора) порядка 30–50 мкм, с целью избегания воздействия микротрещин на значение твердости. Вариация нагрузки на индентор позволило определить значение твердости образцов на различной глубине, за счет изменения глубины проникновения индентора в образец при увеличении нагрузки. На рисунке 1 приведена схема измерений методом

индентирования при вариации нагрузки на индентор с приведенными примерами различных отпечатков.

Согласно предложенной схеме экспериментов по определению твердости образцов на различной глубине было определено, что вариация величины нагрузки от 10 Н до 200 Н позволяет измерить твердость покрытий на различной толщине покрытий при максимальной глубине проникновения индентора порядка 1 мкм, что составляет максимальную толщину полученных покрытий. В результате подобных измерений можно определить изотропность твердости покрытий по глубине, а также их вариации в зависимости от условий получения.

Твердость (по Виккерсу) определялась по формуле для индентора в виде правильной алмазной пирамиды с квадратным основанием и углом $136^\circ \pm 30'$ у вершины:

$$HV = 1,854 \frac{P}{d^2}, \quad (1)$$

где P – приложенное давление, d – средняя длина диагонали отпечатка.

На основе изменений диагоналей трещин и отпечатков индентора была оценена величина критического коэффициента интенсивности напряжений (K_{Ic}) в образцах при индентировании (2):

$$K_{Ic} = 0,16 \cdot H \cdot a^{1/2} \cdot \left(\frac{c}{a} \right)^{-3/2} \quad (2)$$

где H – величина твердости по Виккерсу, c – полу-длина трещины, и a – полудиagonal отпечатка индентора.

Спелляемость покрытий с поверхностью стали была изучена путем определения критической нагрузки при отрыве покрытия (метод определения адгезионной прочности). Эксперименты по определению критической нагрузке были выполнены на установке Unitest framework SKU UT-750 (Unitest, США).

Шероховатость поверхности определялась с применением метода атомно-силовой микроскопии, реализованном с использованием Smart SPM (AIST-NT, Зеленоград, Россия).

Определение изменений концентрации молибдена в составе покрытий было осуществлено с применением метода энергодисперсионного анализа, реализованного с применением растрового электронного микроскопа Hitachi TM3030 (Hitachi, Токио, Япония), оснащенного приставкой для анализа элементного состава исследуемых объектов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунках 2–6 представлены примеры измерений твердости образцов (отпечатков индентора при смещении индентора при вариации нагрузки на индентор для всех исследуемых образцов (на рисунках 2–6 цифрами обозначен порядковый номер измерения при различной нагрузке). Данные примеры представлены с целью демонстрации вариации размеров отпечатков индентора при изменении нагрузки, а

также изотропность формы отпечатка при воздействии индентора на поверхность образцов, которая отражает результаты трещиностойкости поверхности. Общий вид представленных изменений отпечатков индентора в зависимости от нагрузки отражает не только глубину проникновения индентора в материал, но и стабильность материала к растрескиванию при изменении внешних воздействий, которая выражается в отсутствии видимых изменений формы отпечатка индентора при изменении нагрузки. Как видно из представленных данных, вариация условий на-

грузки на индентор приводит к получению достаточно четких отпечатков индентора различных размеров (в зависимости от величины нагрузки), при этом сам размер отпечатка представляет собой ромбовидную пирамиду с одинаковыми четкими гранями, что свидетельствует о высокой устойчивости к внешним воздействиям нанесенных покрытий, а отсутствие дополнительных дефектов вблизи граней отпечатка (дефекты Палмквиста) свидетельствуют о высокой устойчивости к растрескиванию и трещиностойкости при внешних воздействиях.

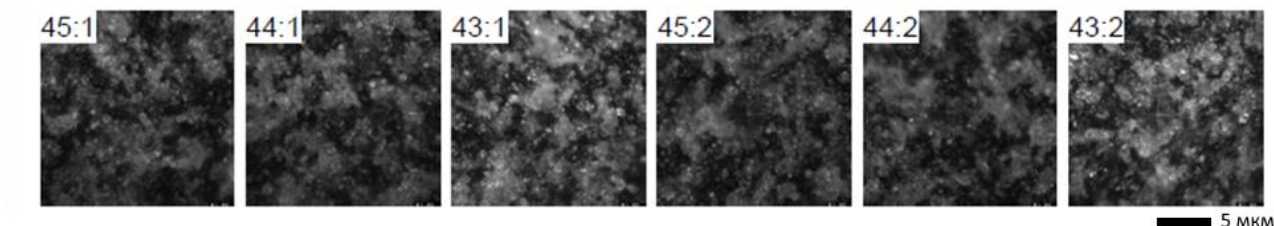


Рисунок 2. Результаты измерений индентирования поверхности образцов MoCrN покрытий, полученных при величине мощности 200 Вт

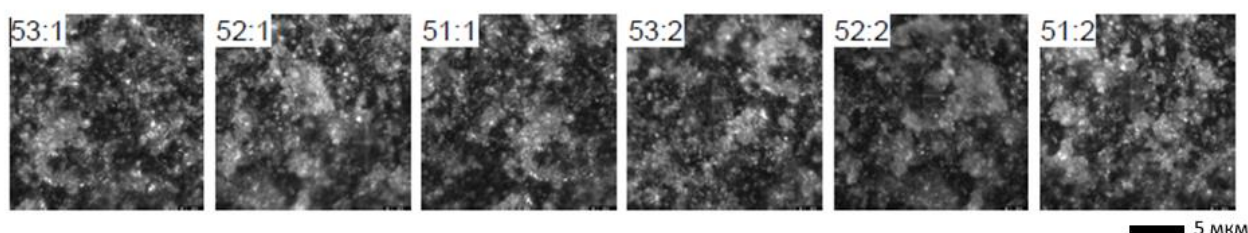


Рисунок 3. Результаты измерений индентирования поверхности образцов MoCrN покрытий, полученных при величине мощности 220 Вт

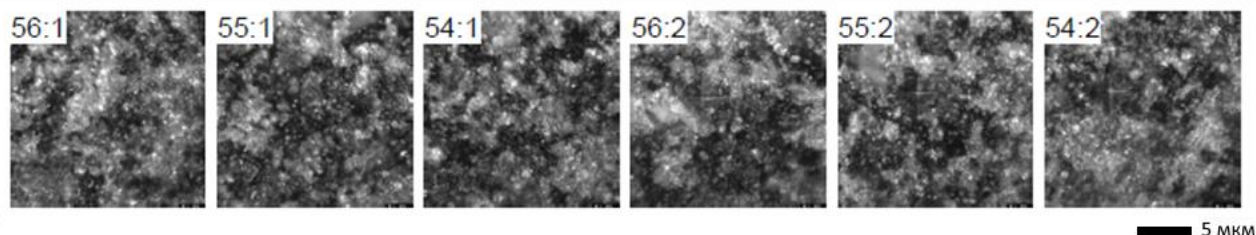


Рисунок 4. Результаты измерений индентирования поверхности образцов MoCrN покрытий, полученных при величине мощности 250 Вт

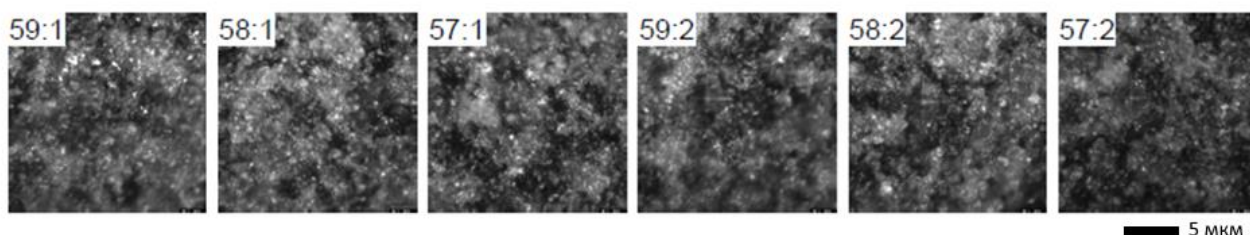


Рисунок 5. Результаты измерений индентирования поверхности образцов MoCrN покрытий, полученных при величине мощности 270 Вт

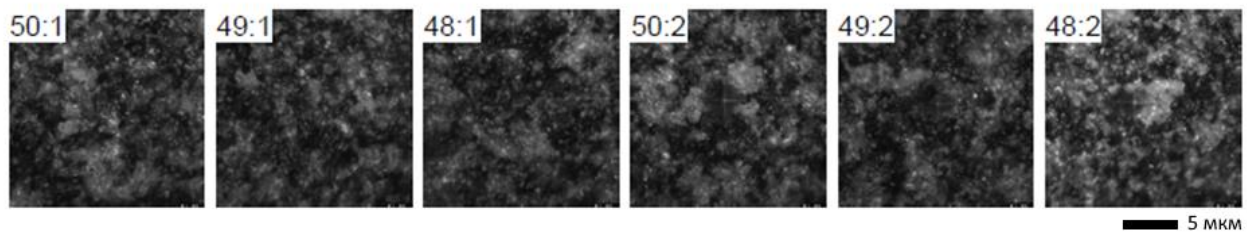


Рисунок 6. Результаты измерений индентирования поверхности образцов MoCrN покрытий, полученных при величине мощности 300 Вт

Анализ полученных отпечатков индентора в зависимости от нагрузки на индентор, представленных на рисунках 2–6, показал, что увеличение мощности напыления приводит к формированию более четкого отпечатка меньшей формы с явными границами отпечатка, что свидетельствует об изменении твердости образцов, полученных при различных условиях напыления. При этом отсутствие видимых микротрещин вблизи вершин пирамиды отпечатка свидетельствует о достаточно хорошей устойчивости полученных покрытий к растрескиванию при внешних нагрузках. Также следует отметить, что вариация условий напыления приводит к изменению морфологических особенностей покрытий, которые обусловлены изменением соотношения элементов в составе покрытий, вариация которого обусловлена увеличением молибдена в составе покрытий.

В таблице представлены результаты оценки степени шероховатости поверхности исследуемых MoCrN покрытий в зависимости от условий получения, а также величины критической нагрузки, при которой наблюдается отрыв покрытия от поверхности стали.

Таблица. Данные шероховатости и величины критической нагрузки, определяющей адгезионную прочность

Параметр	Мощность напыления, Вт				
	200	220	250	270	300
Шероховатость, нм	15±2	23±3	24±2	26±3	31±4
Критическая нагрузка, Н	71±3	75±4	81±3	85±4	97±6

Как видно из представленных в таблице данных, изменение условий напыления, приводит к увеличению шероховатости поверхности более чем в 1,5–2 раза (в случае крайних точек, выбранных для вариации условий напыления), а также увеличению сопротивляемости к отрыву (величина возрастает с 71 Н до 85–97 Н). Изменение данных параметров свидетельствует не только об изменении морфологии поверхности, за счет формирования более крупных зерен, оказывающих влияние на увеличение шероховатости, но и повышению сопротивляемости к отрыву нанесенных покрытий при механических воздействиях.

На рисунке 7а представлены результаты изменений значений твердости при вариации нагрузки на индентор исследуемых MoCrN покрытий в зависимости от условий получения. Полученные результаты

характеризуют изотропность изменения значений твердости образцов покрытий по глубине, а также о равномерности напыления в зависимости от времени напыления толстых покрытий.

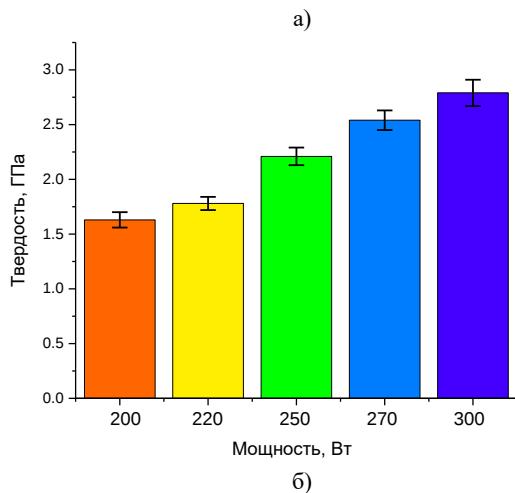
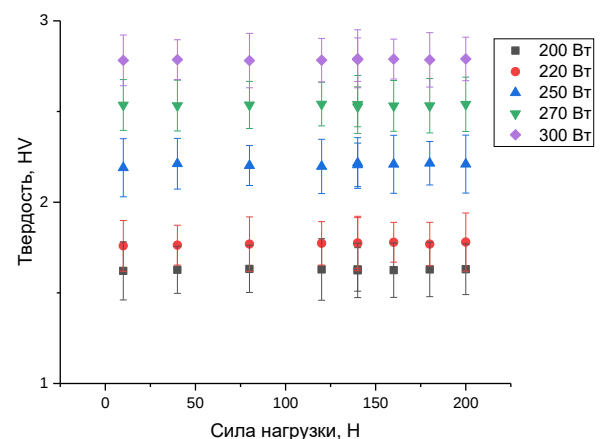


Рисунок 7. Результаты измерений твердости образцов MoCrN покрытий при изменении нагрузки на индентор (а) и изменений значений твердости в зависимости от условий напыления (б)

Как видно из данных, представленных на рисунке 7а, результаты твердости, определенные по отпечаткам индентора при различных нагрузках на индентор свидетельствуют об изотропности твердости полученных покрытий по глубине, а также о равномерности напыления при изменении времени напыления, из чего можно сделать вывод о том, что при вариации

времени напыления или количества слоев напыления не приводит к существенным различиям в изменении значений твердости (изотропность значений близка к 1). Также из полученных данных можно сделать вывод о том, что при выбранных условиях напыления (послойное напыления) наблюдается достаточно хорошая адгезия между слоями, что также не приводит к возникновению различий в значениях твердости. На рисунке 7б представлены результаты оценки влияния вариации условий напыления (вариации мощности) на изменение твердости образцов (среднего значения твердости, определенного по результатам измерений данных с различной глубины и по поверхности). Как видно из представленных данных изменений твердости для исследуемых MoCrN покрытий, изменение условий магнетронного напыления (вариация мощности) приводит к увеличению значений твердости, более чем в 1,3–1,5 раза при увеличении мощности с 200 до 250 Вт и выше. Такое изменение твердости может быть объяснено изменениями элементного состава MoCrN покрытий, изменение которого было установлено с применением метода энерго-дисперсионного анализа. Согласно полученным данным, вариация условий напыления (мощности) приводит к вытеснению хрома и доминированию молибдена в составе получаемых покрытий. В результате чего в покрытиях, полученных при мощности напыления 300 Вт, содержания молибдена более чем в 2 раза превышает содержание хрома, в то время как при мощности напыления 200 Вт, концентрация молибдена на 30% меньше чем концентрации хрома в составе пленок. Изменение соотношения элементов в составе пленок является одним из ключевых факторов, оказывающих влияние на упрочнение и повышение стабильности прочностных характеристик покрытий при внешних воздействиях. На рисунке 8а представлены результаты сравнительного анализа фактора упрочнения покрытий в сравнении с величиной твердости стали 316 L, которая использовалась в данных экспериментах в качестве подложки для нанесения покрытий. Значение твердости для стали 316 L составило 1,55 ГПа, согласно измерениям с применением метода индентирования в тех же условиях, что и при измерении твердости покрытий, нанесенных методом магнетронного напыления.

Общий вид представленных изменений фактора упрочнения MoCrN покрытий в сравнении с результатами твердости для стали 316 L свидетельствует о том, что наиболее выраженные изменения твердости наблюдаются для образцов, полученных при мощности магнетронного напыления 270–300 Вт, при которых, согласно данным энергодисперсионного анализа, наблюдается доминирование молибдена в составе покрытий. На рисунке 8б представлены результаты сравнения фактора упрочнения с изменениями концентрации молибдена в составе покрытий. Анализ полученных зависимостей, позволил установить прямую корреляцию между изменением концентрации

молибдена в составе покрытий и упрочнением покрытий. При этом, двукратное увеличение концентрации молибдена в составе MoCrN покрытий приводит к более чем 80% увеличению твердости в сравнении со сталью 316 L, что свидетельствует о высокой устойчивости материалов покрытий к внешним воздействиям, а также увеличению устойчивости к растрескиванию и образованию микротрещин.

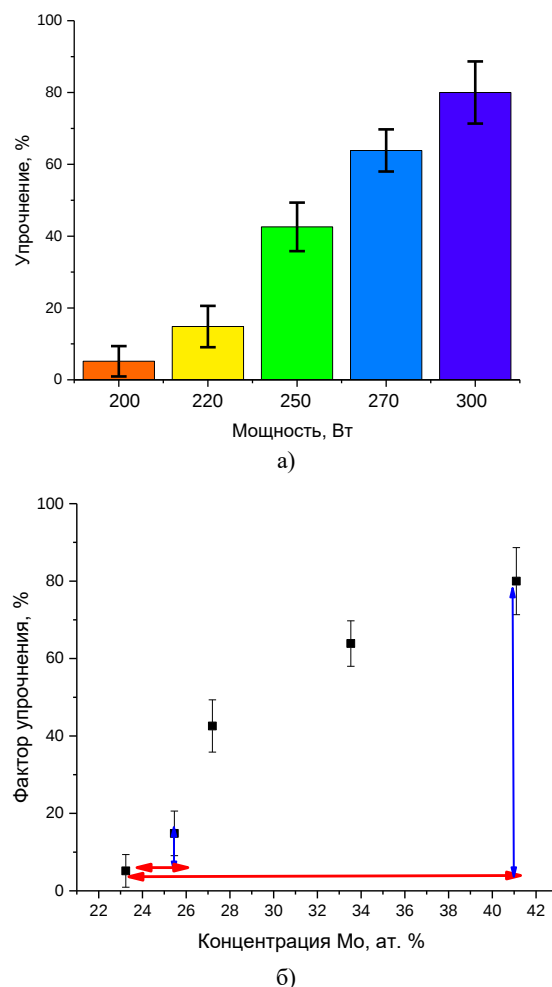


Рисунок 8. Результаты упрочнения MoCrN покрытий в сравнении с результатами твердости для стали 316 L (а) и результаты сравнения фактора упрочнения с изменением концентрации молибдена в составе MoCrN покрытий (б), синими и красными стрелками представлены зависимости при крайних случаях условий напыления 200 и 300 Вт

На рисунке 9а представлены результаты изменений величины критического коэффициента интенсивности напряжений определенного с использованием формулы (2).

Анализ данных изменений величины величины K_{Ic} в зависимости от условий получения MoCrN покрытий свидетельствует о том, что увеличение трещиностойкости наблюдается для образцов, в составе которых доминирует молибден, что как следствие приводит к повышению сопротивляемости материа-

ла покрытий к распространению микротрещин при внешних нагрузках на индентор, а также образованию трещин Палмквиста или полудисковых трещин (согласно оценке профиля отпечатков индентора).

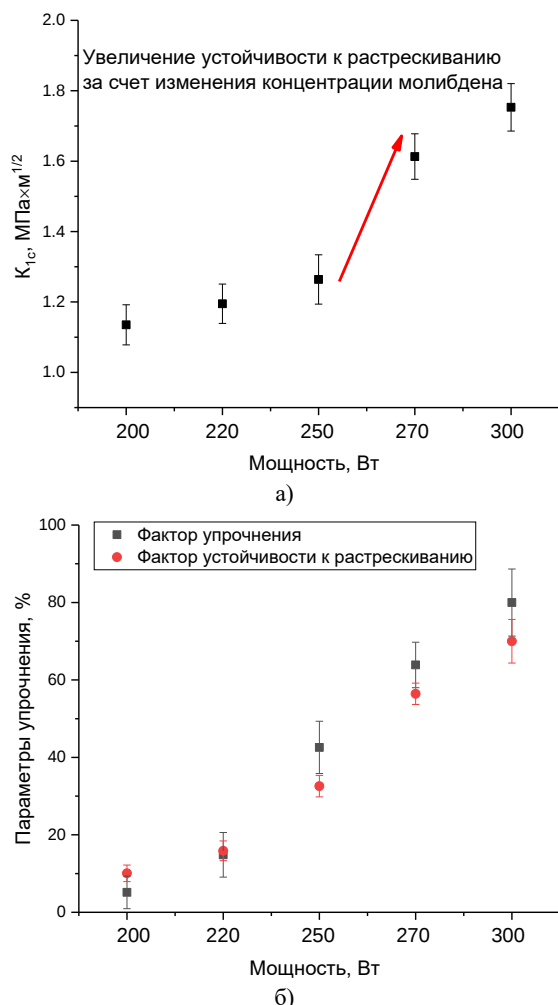


Рисунок 9. Результаты оценки величины K_{1c} в зависимости от условий получения MoCrN покрытий при вариации изменения мощности (а) и сравнительного анализа параметров упрочнения MoCrN покрытий в зависимости от условий получения (б)

На рисунке 9б представлены результаты сравнительного анализа изменений параметров упрочнения MoCrN покрытий в зависимости от условий получения (при вариации мощности при магнетронном напылении образцов). В качестве параметров упрочнения были выбраны фактор упрочнения (изменения значений твердости) и фактор устойчивости к растрескиванию, определенный на основе изменений величины K_{1c} для исследуемых покрытий. Сравнительный анализ параметров упрочнения был проведен в сравнении с данными величин твердости и трещиностойкости стали 316 L, которая в данном случае являлась основой для нанесения MoCrN покрытий. Как видно из представленных данных, изменение условий напыления (увеличение мощности) с 200 до

220 Вт не приводит к существенным изменениям прочностных параметров (изменения составляют не более 10–12%), в то время как при изменении мощности напыления до 250 Вт наблюдается увеличение прочностных параметров до 35–40% в сравнении с величинами для стали 316 L. При величинах мощности 270–300 Вт изменения прочностных параметров составляет порядка 60–80%, что в свою очередь обусловлено факторами изменения элементного состава покрытий, связанных с доминированием в составе покрытий молибдена (более 35–40 ат.%) для образцов, полученных при данных условиях магнетронного напыления.

Сравнивая полученные результаты твердости и трещиностойкости MoCrN покрытий с результатами работы [15], в которой рассмотрены способы получения и механические свойства TiSiCN покрытий, можно сделать вывод о том, что полученные покрытия обладают сравнимыми параметрами твердости с нитридными и карбонитридными покрытиями, полученными методом реактивно-плазменного напыления. Также в сравнении с результатами работ [16, 17], в которых в качестве объектов исследования авторами были выбраны многослойные пленки CrN/MoN и однокомпонентные пленки Mo-N с различным содержанием азота в составе, можно сделать вывод о том, что полученные MoCrN покрытия обладают более высокими значениями твердости в сравнении с однокомпонентными пленками и многослойными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены результаты оценки твердости и трещиностойкости MoCrN покрытий в зависимости от их условий получения (в случае вариации мощности магнетронного напыления). Установлены зависимости влияния изменения элементного состава (вариации соотношения молибдена и хрома) на изменение прочностных параметров (фактора упрочнения и трещиностойкости покрытий). Определено, что двукратное увеличение концентрации молибдена в составе MoCrN покрытий приводит к более чем 80% увеличению твердости в сравнении со сталью 316 L. С применением метода оценки факторов упрочнения было определено, что основные изменения прочностных параметров обусловлены вариативностью элементного состава покрытий, в частности, увеличением содержания молибдена в составе, увеличение которого способствует упрочнению покрытий и повышению сопротивляемости внешним воздействиям.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о перспективности использования MoCrN покрытий в качестве материалов для нанесения на поверхность стали с целью повышения ее твердости и устойчивости к внешним воздействиям.

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

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Aissani L. et al. Magnetron sputtering of transition metal nitride thin films for environmental remediation // *Coatings*. – 2022. – Vol. 12. – No. 11. – P. 1746.
2. Medina L. Z. et al. Enhancing corrosion resistance, hardness, and crack resistance in magnetron sputtered high entropy CoCrFeMnNi coatings by adding carbon // *Materials & Design*. – 2021. – Vol. 205. – P. 109711.
3. Sathish M., Radhika N., Saleh B. Current Status, Challenges, and Future Prospects of Thin Film Coating Techniques and Coating Structures // *Journal of Bio-and Tribo-Corrosion*. – 2023. – Vol. 9. – No. 2. – P. 35.
4. Constantin D. G. et al. Magnetron sputtering technique used for coatings deposition; technologies and applications // *7th International Conference on Materials Science and Engineering*. – 2011. – Vol. 12. – P. 29–33.
5. Rachbauer R., Holec D., Mayrhofer P. H. Increased thermal stability of Ti–Al–N thin films by Ta alloying // *Surface and Coatings Technology*. – 2012. – Vol. 211. – P. 98–103.
6. Jung M. J. et al. Deposition of Ti thin film using the magnetron sputtering method // *Thin Solid Films*. – 2003. – Vol. 435. – No. 1–2. – P. 145–149.
7. Safi I. Recent aspects concerning DC reactive magnetron sputtering of thin films: a review // *Surface and Coatings Technology*. – 2000. – Vol. 127. – No. 2–3. – P. 203–218.
8. Ru L. et al. Hydrophobic, anticorrosion, and frictional properties of F-DLC films prepared by magnetron sputtering // *Vacuum*. – 2023. – Vol. 217. – P. 112567.
9. Heidari E., Atapour M., Obeydavi A. The effect of Cr-content on the corrosion behavior of Ti_{0.5}Mo_{0.5}CoNiMnCr_x high-entropy alloy thin films deposited by direct current magnetron sputtering // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2024. – Vol. 976. – P. 173265.
10. Shi Z. et al. Improvement on corrosion resistance of sintered Nd-Fe-B with bilayer Al/Cr thin films // *Journal of magnetism and magnetic materials*. – 2023. – Vol. 565. – P. 170222.
11. Castro J. D. et al. Wettability and corrosion resistance of zirconium nitride films obtained via reactive high-power impulse magnetron sputtering // *Journal of Vacuum Science & Technology A*. – 2023. – Vol. 41. – No. 2. – P. 1–10.
12. Zhang X. et al. Microstructure, mechanical and corrosion behavior of CrN_x/Al₂O₃ multilayer films deposited by magnetron sputtering // *Materials Today Communications*. – 2024. – P. 108976.
13. Shi X. et al. Anti-corrosive yet color-tunable AlN/Si multilayer hard coatings on 304 stainless steel by magnetron sputtering // *Ceramics International*. – 2024. – Vol. 50. – No. 1. – P. 1166–1178.
14. Ghantasala S. B., Sharma S. Magnetron sputtered thin films based on transition metal nitride: structure and properties // *Physica Status Solidi (a)*. – 2023. – Vol. 220. – No. 2. – P. 2200229.
15. Баймолданова Л. С. и др. Краткий обзор способов получения покрытий TiSiCN и метода реактивно-плазменного напыления // *Вестник НЯЦ РК*. – 2024. – № 1. – С. 13–23. [Baimoldanova L. S. et al. Brief Overview of methods for producing TiSiCN coatings and the method of reactive plasma spraying // *NNC RK Bulletin*. – 2024. Vol. 1. – P. 13–23. (In Russ.)] <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-1-13-23>
16. Postolnyi B. O. et al. Multilayer design of CrN/MoN protective coatings for enhanced hardness and toughness // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2017. – Vol. 725. – P. 1188–1198.
17. Klimashin F. F. et al. The impact of nitrogen content and vacancies on structure and mechanical properties of Mo-N thin films // *Journal of Applied Physics*. – 2016. – Vol. 120. – No. 18. – P. 1–10.

MoCrN ЖАБЫНДАРЫНЫҢ БЕРІКТІК СИПАТТАМАЛАРЫНЫҢ ӨЗГЕРУІНЕ БҮРКУ ЖАҒДАЙЛАРЫНЫҢ ВАРИАЦИЯСЫН 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*

*Байланысуға арналған e-mail: kozlovskiy.a@inp.kz

Молибден мен хромның нитридті қосылыстарына негізделген жұқа қабықшалы қорғаныс жабындарына деген қызығушылық оларды тозуға төзімді коррозияға қарсы жабындар ретінде пайдаланудың үлкен перспективаларына байланысты, олар механикалық үйкеліс, қысым және коррозия процестері түріндегі сыртқы әсерлерге, агрессивті ортаға, су тасқынына немесе жоғары температураға ұшыраған кезде жоғары төзімділікке ие. Алайда, нитридті жабындардың тұрақтылық көрсеткіштері, ең алдымен, оларды алу шарттарымен анықталады, олар магнетронды бүрку қуатына тәуелді емес, оның өзгеруі жабындардың құрамындағы элементтердің қатынасын өзгертуге мүмкіндік береді. Жүргізілген зерттеулердің негізгі мақсаты бүрку қуатының өзгеруі кезінде жабындарды алу шарттарына байланысты индекс теу әдісімен өлшенген беріктік сипаттамаларын өлшеу, сондай-ақ жұқа қабықшалы жабындарды алу шарттарының вариациясының қаттылық пен қатаю факторларының өзгеруіне әсерін анықтау болып табылады. Ұсынылған мәліметтерге сәйкес, қуаттың өзгеруі арқылы магнетронды бүрку жағдайларының өзгеруі сыртқы жүктеме өзгерген кезде крекингке жоғары төзімділікке ие күшті төзімді жабындардың пайда болуына әкеледі. Жүргізілген зерттеулер барысында жабындардың құрамындағы молибден концентрациясының ұлғаюына әкелетін жабындардың магнетронды тоздандыру жағдайларының өзгеруі 60–80%-дан астам қатаюына, сондай-ақ сыртқы әсерлерде жарылуға төзімділіктің артуына әкелетіні анықталды.

Түйінді сөздер: жұқа қабықшалы жабындар, қатаю, қаттылық, беріктік, тозуға төзімділік, нитридті жабындар.

INVESTIGATION OF VARIATION OF SPRAYING CONDITIONS ON VARIATION
OF STRENGTH CHARACTERISTICS OF MoCrN COATINGS

Ye. A. Kenzhin¹, D. I. Shlimas^{1,2}, A. M. Zikirina¹, A. L. Kozlovskiy^{2*}

¹ *Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan*

² *L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan*

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

Interest in thin-film protective coatings based on nitride compounds of molybdenum and chromium is due to the great prospects for their use as wear-resistant anti-corrosion coatings with high resistance to both external effects in the form of mechanical friction, pressure, and corrosion processes, when exposed to aggressive media, hydrogenation or high temperatures. However, the stability of nitride coatings are primarily determined by the conditions of their obtaining, which not least depend on the power of magnetron sputtering, the variation of which allows you to change the ratio of elements in the composition of coatings. The key objective of this research is to measure the strength characteristics measured by indentation method depending on the conditions of obtaining coatings under variation of sputtering power, as well as to establish the influence of variation of conditions of obtaining thin film coatings on the change of hardness and hardening factors. According to the presented data, changing the conditions of magnetron sputtering by varying the power leads to the formation of stronger stable coatings with high resistance to cracking under changing external load. In the course of research it was determined that changing the conditions of magnetron sputtering coatings, leading to an increase in the concentration of molybdenum in the composition of coatings leads to more than 60–80% hardening, as well as an increase in resistance to cracking under external influences.

Keywords: *thin-film coatings, hardening, hardness, strength, wear resistance, nitride coatings.*