

Е. В. Овчинников¹, доктор технических наук, доцент, **Н. М. Чекан**², кандидат физико-математических наук, **И. П. Акула**², кандидат физико-математических наук, **А. А. Пушкарев**³, кандидат физико-математических наук

¹Учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно

²Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», Минск
³Государственное научно-производственное объединение «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению», Минск

ВЛИЯНИЕ КРИОГЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАКУУМНЫХ ПОКРЫТИЙ

Введение. В настоящее время активно разрабатывается и исследуется новый класс композиционных покрытий, отличающихся стабилизированной структурой с наноразмерными включениями керамических и интерметаллидных фаз. Это достигается путем применения в формируемых тонкослойных системах двух, трех и более химических элементов, осаждаемых одновременно в вакууме на субстрат. Данные покрытия на основе рефракторных металлов применяются для получения структур с различными физико-механическими характеристиками. Изменяя условия осаждения (давление реакционного газа в вакуумной камере, ток дуги и т. п.), возможно варьировать фазовым и элементным составом покрытия, изменять концентрацию химических соединений по толщине покрытия, что позволяет получить слои с заданными функциональными характеристиками: прочности, твердости, адгезионной и коррозионной стойкости, высокими триботехническими параметрами. В ряде работ [1; 2] показано влияние процессов кристаллизации на износостойкость вакуумных покрытий, сформированных на базе соединений хрома. Оптимальными триботехническими характеристиками обладают покрытия на базе соединений хрома и азота [1]. В данных работах рассмотрены тройные нитридные системы на основе хрома, такие как (Ti,Cr)N, (Cr,Al)N и (Cr,Ta)N. Однако, как отмечают авторы [1], непосредственное напыление стехиометрических составов соответствующих нитридов на поверхность подложки уменьшает адгезионную прочность благодаря их высокой хрупкости и сжимающим напряжениям. Формирование покрытий, содержащих в своем составе большое количество химических элементов, представляет собой сложную технологическую задачу, что сказывается на физико-механических параметрах, получаемых защитных и триботехнических слоев. В ряде случаев возможно получать высокие эксплуатационные характеристики покрытий путем применения специальных методов термической обработки, в частности обработкой при пониженных температурах [1; 2].

Целью данной работы является изучение структуры и физико-механических характеристик вакуумных покрытий хрома и нитрида хрома, обработанных при криогенных температурах.

Основная часть. Формирование покрытий Cr, CrN катодно-дуговым методом осуществляется на вакуумных установках, оснащенных DC-источниками плазмы хрома, ионными источниками для очистки и травления, а также системами нагрева изделий и источниками высокого напряжения для подачи потенциала смешения на подложку. Для улучшения адгезии перед нанесением покрытий осуществляется ультразвуковая мойка изделий с применением обезжиривающих реагентов, затем сушка и прогрев до 150°C. Нанесения покрытий проводили при токе дуги 55...60 А в атмосфере азота, давление которого поддерживается на уровне 0,05...0,1 Па, на предварительно нагретые до 400°C изделия. Определение значения поверхностной энергии сформированных покрытий проводили исходя из значений краевых углов смачивания полярной и неполярной жидкостей. Твердость измеряется на микротвердомере типа ПМТ-3 с использованием алмазной пирамидки Кнупа при условии, что толщина покрытия не менее 3 мкм. Нагрузка на пирамиду изменялась от ~ 0,1 до 0,5 Н. Величина адгезии оценивается по методу скретч-тестирования на соответствующих приборах, оснащенных алмазным стилусом с радиусом закругления 200 мкм. Фазовый состав покрытий контролируется с использованием стандартных методов рентгеновской дифракции. Низкотемпературная обработка покрытий проводилась при T = -195,75°C. Время выдержки в жидком азоте исследуемых образцов варьировали от 30 до 120 мин. Проведенные исследования по определению значений поверхностной энергии покрытий хрома и нитрида хрома показали уменьшение значений исследуемой физической величины при формировании защитных покрытий на поверхности субстрата, изготовленного из стали 40X (таблица 1).

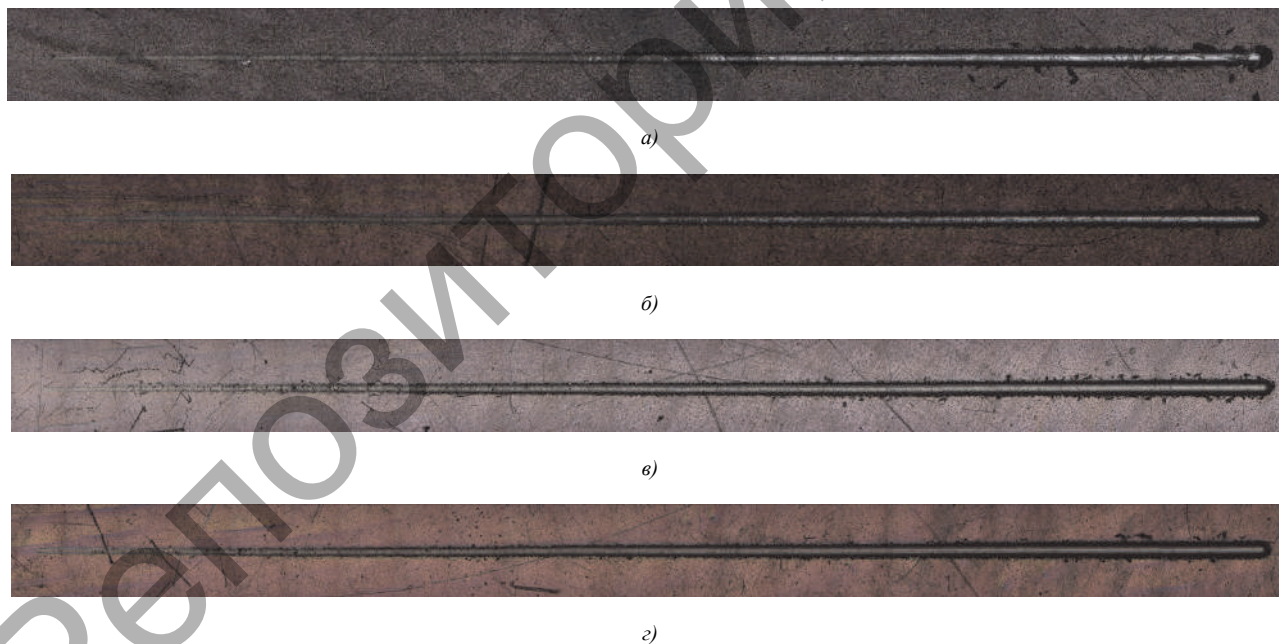
Наименьшей поверхностной энергией обладают вакуумные покрытия, сформированные из хрома. Соединения на базе нитридов хрома имеют значения поверхностной энергии на ~ 30% больше, чем для хромового покрытия. Обработка вакуумных покрытий в криогенных жидкостях приводит к неоднозначным результатам. При небольших временах выдержки в жидком азоте наблюдается уменьшение значения поверхностной энергии для покрытий нитрида хрома. Дальнейшее возрастание времени выдержки в криогенной среде исследуемых образцов приводит к резкому увеличению значений поверхностной энергии, что может свидетельствовать о структурных превращениях, происходящих в покрытиях при криогенной обработке. Согласно данным, полученным методом рентгеноструктурного анализа, происходит уменьшение размеров областей когерентного рассеяния рентгеновского излучения при обработке вакуумных покрытий в криогенных жидкостях.

Т а б л и ц а 1 — Значения поверхностной энергии вакуумных покрытий на базе соединений хрома в зависимости от времени выдержки при криогенной температуре

Тип подслоя, вид обработки	Сталь 40X	CrN	CrN, 30 мин*	CrN, 60 мин*	CrN, 120 мин*	Cr, 60 мин*
Угол смачивания вазелинового масла, °	32°30'	16°50'	19°50'	29°55'	16°15'	21°30'
Угол смачивания водой, °	81°10'	76°40'	78°55'	55°51'	56°10'	82°25'
Работа адгезии вазелинового масла, мДж	55,36	58,76	58,24	56,03	58,82	57,95
Работа адгезии воды, мДж	83,09	88,88	86,24	112,51	112,10	81,66
Дисперсионный компонент поверхностной энергии, мДж / м ²	0,67	0,92	0,50	21,08	16,19	0,02
Полярный компонент поверхностной энергии, мДж / м ²	40,38	46,94	42,26	118,39	109,85	33,86
Поверхностная энергия, мДж / м ²	41,05	47,86	42,76	139,47	126,04	33,88

Примечание. *— время выдержки в криогенной жидкости субстрата (сталь 40X) с вакуумными покрытиями на базе соединений хрома.

Изменение значений поверхностной энергии вакуумных покрытий при обработке в криогенных жидкостях, структурные трансформации должны приводить к изменению физико-механических характеристик исследуемых хромовых пленок, сформированных на стали 40X. Представленные ниже результаты исследований по определению адгезионных характеристик исследуемых покрытий подтверждают данное предположение. Наблюдается увеличение адгезионной прочности модифицированных вакуумных покрытий ~ 2 раза по сравнению с исходными образцами (рисунок 1).



а — Cr; б — Cr, обработанный в жидком азоте в течение 60 мин; в — CrN; г — CrN, обработанный в жидком азоте в течение 120 мин

Рисунок 1 — Адгезионные характеристики вакуумных покрытий, сформированных на стали 40X

Заключение. Проведение криогенной обработки соединений на основе хрома в большинстве случаев приводит к активации исследуемых образцов, что выражается в немономном изменении значений удельной поверхностной энергии. Значения удельной поверхностной энергии зависят как от длительности выдержки образцов в криогенной жидкости, так и от химического состава и строения исследуемых образцов. Обработка в криогенных жидкостях увеличивает адгезионные и прочностные характеристики вакуумных плазмо-химических покрытий.

Список цитируемых источников

1. Злоцкий, С. В. Структура и механические свойства титан-хромнитридных градиентных покрытий, полученных вакуумно-дуговым осаждением : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.07 / С. В. Злоцкий. — Минск, 2016. — 136 л.
2. Влияние криогенных температур на физико-механические характеристики плазмохимических покрытий : INTERMATIC-2014 : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 1—5 дек. 2014 г. / под ред. акад. РАН А. С. Сигова. — М. : Энергоатомиздат, 2014. — Ч. 2. — С. 70—72.

УДК 621.9

Ю. А. Расторгуева, В. В. Малеронок

Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи

ОСОБЕННОСТИ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОГО УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ СО СЛОЖНЫМ ПРОФИЛЕМ УПРОЧНЯЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Введение. Повышение износостойкости металлорежущего инструмента является крайне важным вопросом в современном машиностроении. Основными направлениями повышения износостойкости инструмента являются применение новых материалов и физические методы, изменяющие физико-механические свойства уже используемых материалов инструмента. Одним из таких методов поверхностного упрочнения металлорежущего инструмента является магнитно-импульсная обработка (далее — МИО), основанная на применении магнитного импульсного поля на поверхность металлорежущего инструмента, что способствует улучшению её механических и физических свойств. Помимо повышения твердости поверхности и износостойкости металлорежущего инструмента МИО приводит к уменьшению остаточных и усталостных напряжений. Внедрение МИО позволяет повысить износостойкость металлорежущего инструмента, оснащенного пластинами из металлокерамических твердых сплавов типа вольфрамовых, титановольфрамовых и титанотанталовольфрамовых [1].

Основная часть. Магнитное упрочнение на основе метода МИО обладает рядом преимуществ по сравнению с методами на основе воздействия других видов энергий: низкая себестоимости обработки, сохранение геометрии обработанных деталей, отсутствие расходных материалов и дополнительных агрессивных сред, простота технологической оснастки и экологическая чистота.

При обработке изделий сложного профиля упрочнению подвергаются в основном участки, расположенные на минимальном расстоянии от спирали индуктора. Для обеспечения упрочнения удаленных от индуктора участков необходимо либо увеличивать силу максимального импульса тока, либо использовать разъемный индуктор переменного внутреннего диаметра, повторяющий профиль изделия. Боковые поверхности выступов, расположенные перпендикулярно к оси системы, не подвергаются упрочнению вследствие малого градиента плотности энергии магнитного поля вблизи их поверхности. При близком расположении выступов (менее 1 см) на поверхности изделия материал поверхности в пространстве между ними не испытывает достаточного упрочняющего воздействия [2].

Для эффективного упрочнения поверхностей со сложным профилем предлагается производить нанесение графита для получения однородной поверхности, равноудаленной от рабочей поверхности индуктора. Целью нанесения графита является создание условий для равномерного распространения магнитного поля, создаваемого индуктором.

Предлагаемый способ магнитной обработки реализуется следующим образом. Предварительно производят нанесение графита на наиболее удаленные от индуктора поверхности изделия. Нанесение графита осуществляют графитовыми пластинами или графитовой смазкой (например, лезвия гильотинных ножей, режущих инструментов, осей подшипниковых узлов, зубьев шестеренчатых передач и т. п.). После этого деталь помещают в полость соленоида и проводят объемную обработку импульсным магнитным полем с заданными параметрами напряженности, частоты и длительности импульсов [2].

Кроме того, применение графита приводит к интенсификации магнитострикционных процессов. Составляющей повышения эксплуатационной стойкости изделий является повышенное после МИО содержание мартенсита, образующегося из нестабильного аустенита вследствие инициирования мартенситного превращения в результате увеличения амплитуды колебаний кристаллической решетки аустенита, которые стремятся превратить ее в решетку мартенсита. Под действием магнитного поля аустенит делается полностью неустойчивым к самым незначительным воздействиям слабого магнитного поля с крутым передним фронтом.

Заключение. Проведенные исследования показали, что эффективность МИО существенно повышается при нанесении графита на рабочие поверхности изделий. При этом повышается охлаждаемость в рабочей контактной зоне и снижается абразивный износ. Кроме того, изменяется и химический состав поверхностного слоя материала, повышается содержание химических элементов вольфрама, ванадия, молибдена, железа, углерода, а сама структура становится более мелкозернистой.