

ПОЛУЧЕНИЕ КАРБИДОХРОМОВЫХ ПОКРЫТИЙ НА ИЗДЕЛИЯХ СЛОЖНОГО ПРОФИЛЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ПОКРЫТИЯ

С. А. Крохмаль, Т. Н. Зуева

*Институт физики твердого тела, материалов и технологий ННЦ «ХФТИ»,
Украина*

Поступила в редакцию 26. 06. 2014

Проведены измерения профиля нанотвердости покрытий, полученных осаждением из газовой фазы ХОЖ «Бархос», и оценка износостойкости и сопротивления пластической деформации этих покрытий. Выполненные сравнительные кавитационные и потенциостатические испытания карбидохромовых покрытий и некоторых конструкционных материалов показали, что данные покрытия значительно превосходят по стойкости к коррозионному и эрозионному износу рассмотренные конструкционные материалы, широко используемые в промышленном производстве.

Ключевые слова: нанотвердость, пиролитические карбидохромовые покрытия, коррозионная и эрозионная стойкость.

ОТРИМАННЯ КАРБИДОХРОМОВИХ ПОКРИТТІВ НА ВИРОБАХ СКЛАДНОГО ПРОФІЛЮ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАХИСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛУ ПОКРИТТЯ

С. О. Крохмаль, Т. М. Зуєва

Проведено виміри профілю нанотвердості покриттів, отриманих осадженням з газової фази ХОР «Бархос», і оцінка зносостійкості й опору пластичної деформації цих покриттів. Виконані порівняльні кавітаційні й потенціостатичні випробування карбидохромових покриттів і деяких конструкційних матеріалів показали, що дані покриття значно перевершують по стійкості до корозійного й ерозійного зношування розглянуті конструкційні матеріали, широко використувані в промисловому виробництві.

Ключові слова: нанотвердість, піролітичні карбидохромові покриття, корозійна й ерозійна стійкість.

GETTING COATINGS OF CHROMIUM CARBIDE ON ARTICLES OF COMPLEX PROFILE AND RESEARCH OF PROTECTIVE PROPERTIES OF THE COATING MATERIAL

S. A. Krokhmal, T. N. Zueva

Measurements of coatings nanohardness profile which obtained by deposition from the gas phase HOZh «Barhos», and evaluation of wear resistance and resistance of plastic deformation of these coatings. Performed comparative tests of cavitation and controlled potential tests of coatings of chromium carbide and some of constructive materials showed that these coatings have more superior resistance to corrosive and erosive wear than structural materials, which widely used in industrial production.

Keywords: nanohardness, pyrolytic coatings of carbide-chromium, corrosion resistance, erosion resistance.

Защитные покрытия различного состава широко применяются для повышения надежности и срока службы изделий эксплуатируемых в условиях воздействия агрессивной

среды. Для изделий сложной геометрии (внутренние поверхности, наличие глухих полостей, резьбы и т. п.) существуют определенные ограничения по выбору методов

осаждения покрытий. Наиболее адаптированным для решения таких задач, с нашей точки зрения, является метод химического осаждения из газовой фазы. Данный метод характеризуется наибольшим рассеянием наносимого материала, что позволяет получать качественные покрытия на изделиях со сложным профилем обрабатываемой поверхности [1]. Химическое осаждение из газовой фазы является атомарным процессом, т. е. конденсат образуется из отдельных атомов, что обуславливает его максимальную плотность и воспроизводимость поверхности подложки. Условия проведения процесса химического осаждения из газовой фазы определяют структуру и физико-химические свойства получаемых покрытий, а, следовательно, и их защитные свойства. Использование в качестве реагентов металлоорганических соединений позволяет существенно снизить температуру получения карбидов металлов, обладающих высокими защитными свойствами. Для защиты от коррозионного и эрозионного износа целесообразно применять хромоорганическую жидкость (ХОЖ) «Бархос» выпускаемую промышленностью (ТУ-1149-78). Покрытия, получаемые при ее использовании, имеют коррозионную и эрозионную стойкость выше, чем структурные элементы (хром и его карбиды), входящие в их состав [2].

Целью данной работы является получение пиролитических карбидохромовых покрытий из газовой фазы технического продукта ХОЖ «Бархос» на поверхностях сложного профиля и исследование физико-химических свойств, полученных покрытий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Технический продукт ХОЖ «Бархос», представляет собой смесь гомологов бис-ареновых соединений хрома с содержанием хрома на уровне 17 %. Осаждение покрытий на подложки из стали ХВГ, 08X18H10T и 12X18H10T производили на лабораторной установке, принципиальная схема которой приведена в работе [3]. Для обеспечения равномерности покрытия изменением конструкции распределительного сопла проводили перераспределение потока паров

реагента вдоль поверхности изделия. Подготовку поверхности образцов из стали 08X18H10T и 12X18H10T перед осаждением проводили путем травления в смеси кислот H_2SO_4 , HCl , HNO_3 (1:3:1), а образцы из стали ХВГ — в HNO_3 (конц.) с последующей промывкой водой и сушкой на воздухе непосредственно перед процессом осаждения. Такая специфика подготовки поверхности перед осаждением покрытия обусловлена тем, что адгезионная прочность пиролитических карбидохромовых покрытий из ХОЖ «Бархос» [4] определяется не только чистотой поверхности подложки, но и составом остаточных молекул на поверхности, которые влияют на состав первого слоя покрытия.

Для нагрева изделия использовали высокочастотный генератор ВЧИ4-10-У4 с рабочей частотой 440 кГц. Осаждение покрытий проводили при температурах 480—500 °С в проточном реакторе с кварцевой боковой стенкой. Реакционный объем предварительно откачивали до давления $5 \cdot 10^{-2}$ Торр.

Исследование механических характеристик полученных покрытий проводили на поперечных шлифах образцов микротвердомером ПМТ-3 по стандартной методике при нагрузках 0,2 Н и 0,5 Н и наноиндентором Nano Indentor G-200 (MTS Nano Instruments) по методу Оливера-Фара. Наноиндентирование проводили по следующей схеме: поиск поверхности образца (скорость сближения 10 нм/с), рост нагрузки на индентор до тех пор, пока не будет достигнута глубина 200 нм, выдержка при этой нагрузке 10 секунд, снижение нагрузки на 90 %, выдержка при постоянной нагрузке в течение 100 секунд для измерения теплового дрейфа, полная разгрузка индентора. Точность измерения глубины отпечатка — 0,01 нм, нагрузка на индентор — 50 нН.

Изучение структуры полученных конденсатов проводили с помощью металлографического микроскопа ММР-4, а для ее выявления использовали реактив Мураками.

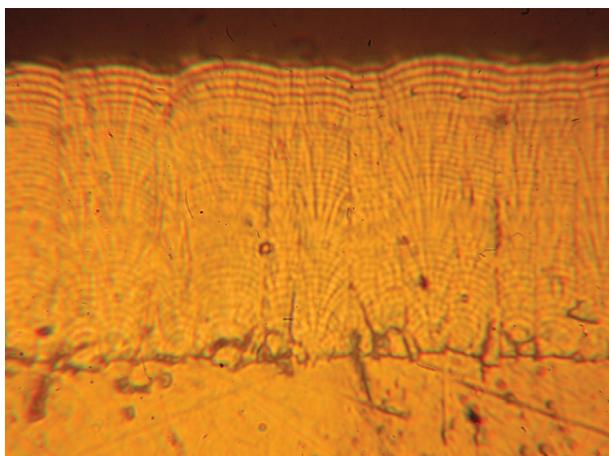
Сравнительные исследования стойкости пиролитических карбидохромовых покрытий и конструкционных материалов, на которые наносили защитные покрытия, к электрохимическому растворению в 3 % растворе

NaCl проводили с помощью потенциостата ПИ-50-1 в диапазоне потенциалов от «-1» до «+1,4» В.

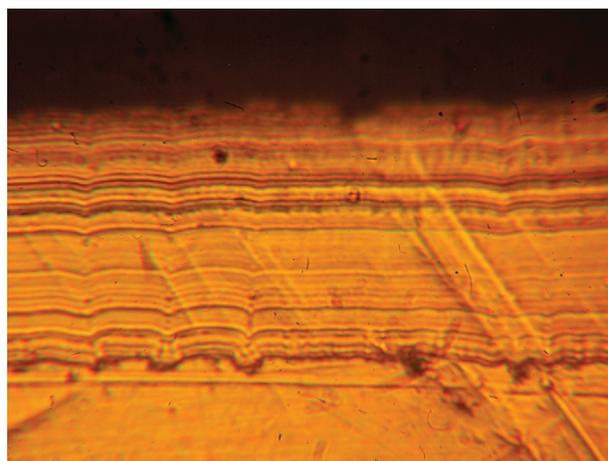
Исследования элементного состава покрытий проводили с помощью рентгеновского флуоресцентного анализа на приборе «Спрут» с компьютерным управлением и записью спектра.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе экспериментов были получены пиролитические карбидохромовые покрытия толщиной до 70 мкм со слоисто-столбчатой и с горизонтально-слоистой структурой. Покрытия с такими структурами обладают наилучшими защитными свойствами. Толщина слоев внутри такого покрытия может изменяться от 0,05 до 1 мкм [5]. Микротвердость «светлых» слоев составляет 10—12 ГПа, а «темных» — 20—24 ГПа [6]. Такие покрытия фактически представляют собой композиционный 2D материал. Слои возникают в результате колебаний давления продуктов распада над поверхностью пиролиза, а также температуры поверхности вследствие высокой эндотермичности реакции термораспада. Механизмы возникновения таких структур детально описаны в работе [7]. Покрытия наносили как на плоские образцы удобные для приготовления шлифов, так и на макеты изделий сложного профиля. Характерные структуры покрытий полученных в ходе экспериментов при температуре осаждения 480—500 °С приведены на рис. 1.



а



б

Рис. 1. Слоисто-столбчатая (а) и горизонтально-слоистая (б) структуры покрытия полученные при разных режимах подачи реагента: а) непрерывная подача со скоростью 7,3 г/час, толщина покрытия — 28 мкм, $V_{\text{ос-я}} = 1,5$ мкм/мин (усредненная); б) порционная подача со скоростью 7,3 г/час, толщина покрытия — 18 мкм, $V_{\text{ос-я}} = 1,0$ мкм/мин (усредненная)

Появление более четкого рисунка слоев обусловлено большей амплитудой изменения давления в зоне осаждения связанной с импульсностью подачи реагента, а также из-за появления участков с заметно более низкой скоростью роста в интервалах между подачей порций реагента. Результаты исследований физико-механических свойств покрытий на подложках из стали 08X18H10T для двух видов структуры с помощью наноиндентирования приведены на рис. 2 и рис. 3. Как видно из рисунков, твердость покрытия H с горизонтально-слоистой структурой несколько выше, чем у покрытия со слоисто-столбчатой структурой, а модуль Юнга E при этом, заметно ниже. В классической теории износа принимается, что износостойкость прямо пропорциональна его твердости [8], однако для многих современных материалов, в том числе, нанокomпозитных тонких пленок, как отмечается в работах [9, 10], износостойкость материала пропорциональна отношению H/E . Таким образом, для повышения износостойкости важно не только создавать материалы с очень высокой твердостью, но и снижать при этом его модуль упругости. Поэтому можно предположить, что износостойкость горизонтально-слоистого покрытия выше, чем слоисто-столбчатого покрытия (рис. 2 в и рис. 3 в).

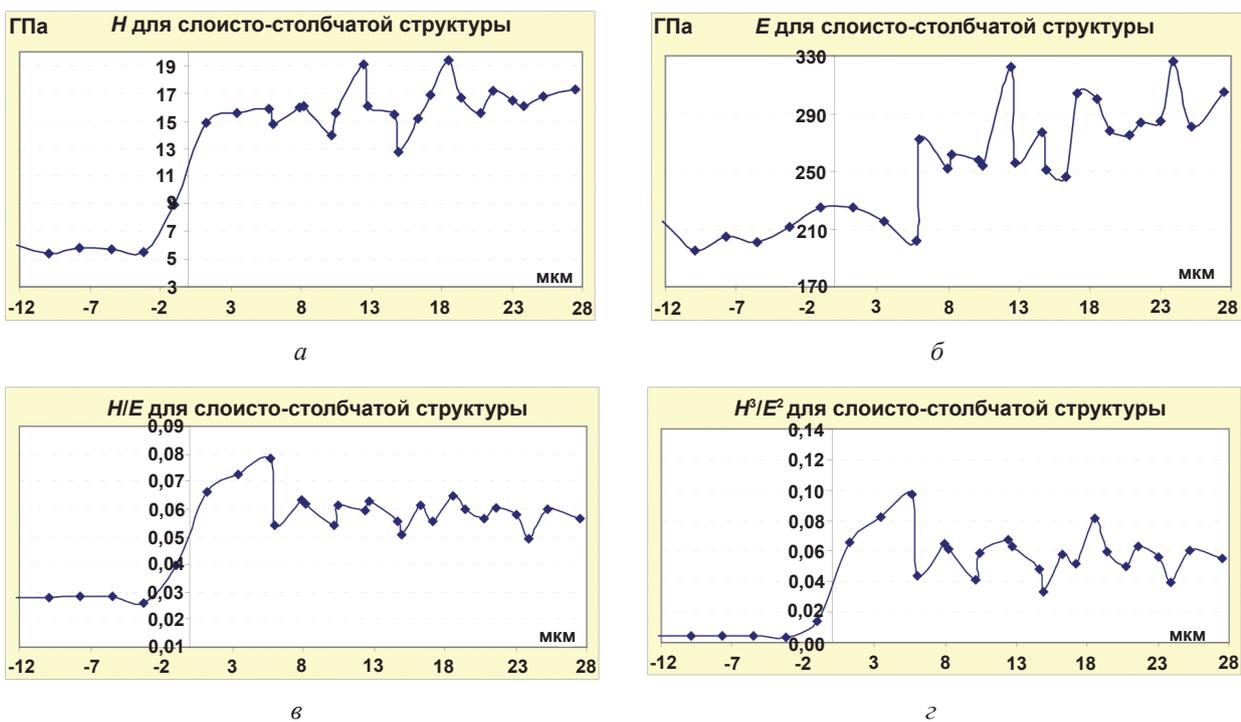


Рис. 2. Физико-механические свойства подложки и покрытия со слоисто-столбчатой структурой

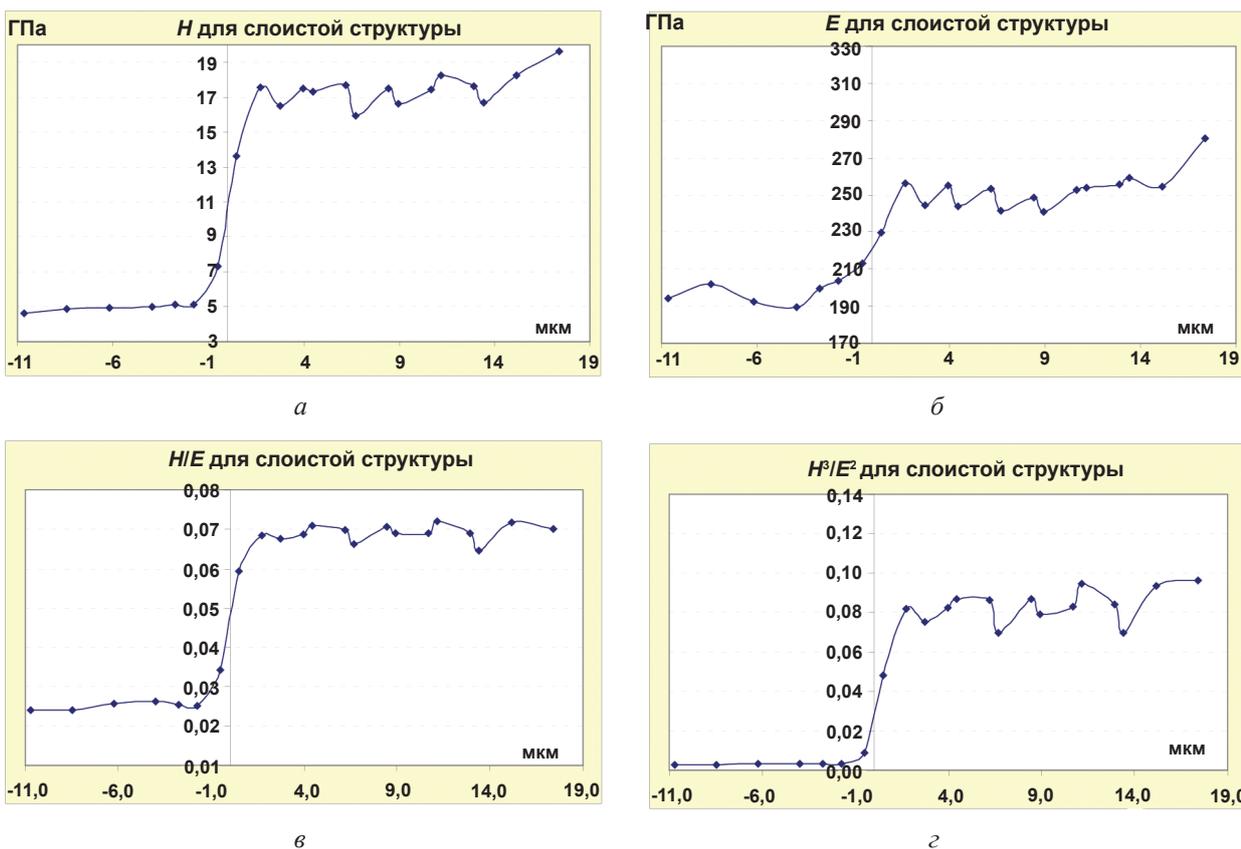


Рис. 3. Физико-механические свойства подложки и покрытия с горизонтально-слоистой структурой

Исследования кавитационной стойкости, проведенные ранее [11], показали, что стойкость таких покрытий в 5 раз выше, чем у стали 12Х18Н10Т, используемой для изготовления узлов запорной арматуры. Проведенный анализ предыдущих результатов испытаний

и новые испытания, выполненные по методике [11], показали, что кавитационная стойкость таких покрытий заметно выше. Результаты этих испытаний, выполненные на установке МСВ-1, приведены в таблице.

**Кавитационные испытания карбидохромовых покрытий
и конструкционных материалов**

Материал	ХВГ	12X18Н10Т	20X13	ВТ-8	слоисто- столбчатая 10 мкм	гориз.-слоистая 9 мкм
Время испытаний, час	ΔM , мг	ΔM , мг				
0	0	0	0	0	0	0
0,5		0,01	0,03	0,02	0,02	0,03
1,0	0,31					0,03
1,5		0,11	0,1	0,08	0,08	
2,0	0,94	0,47				
2,5						
3,0		1,35	0,74	0,27		0,06
3,5		1,75			0,16	
4,0		2,15	1,52	0,45		
4,5						
5,0			2,16		0,28	0,11
5,5				0,69		
6,0			2,91	0,76	0,37	0,19

Данные предыдущей работы [11] о размерах структурных элементов таких карбидохромовых покрытий, а также данные работы [5] позволяют предположить, что высокая коррозионная и эрозионная стойкость таких покрытий обусловлена наноструктурными размерами элементов покрытия и их слоистой структурой.

Способность материала сопротивляться пластической деформации обычно оценивают соотношением H^3/E^2 . Благодаря этому параметру можно спрогнозировать уровень сопротивления материала пластической деформации, который тем выше, чем больше значение отношения H^3/E^2 [12, 13]. Следовательно, согласно кривым на графиках рис. 2г и рис. 3г более высоким сопротивлением к пластической деформации будут обладать покрытия со слоистой структурой.

Следует отметить, что, несмотря на значительно более высокую локальность измерений твердости наноиндентором Nano Indentor G-200 по сравнению с измерениями с помощью ПМТ-3 определить твердость отдельных слоев покрытия не удалось. Размер

отпечатка наноиндентора, при котором получают корректные результаты измерений, сравним с толщиной даже наиболее толстых слоев покрытия: 1 мкм для восстановленного отпечатка и 1,5 мкм для отпечатка под нагрузкой при индентировании на глубину 200 нм. На рис. 4 показано соотношение размеров отпечатков пирамидки Виккерса и пирамидки Берковича для отработанных методик измерения твердости с помощью ПМТ-3 и Nano Indentor G-200.

Из рисунка следует, что измеренные значения твердости представляют собой некоторые усредненные величины для двух и более слоев. Кроме того, изменение состава покрытия по его толщине, вызванное колебаниями давления и состава реагента у поверхности роста происходит не мгновенно, а, следовательно, и изменение твердости по толщине отдельного слоя происходит не скачкообразно. Такой сглаженный по составу переход от слоя к слою должен положительно сказываться на когезионной прочности самого покрытия и соответственно на его механической прочности.

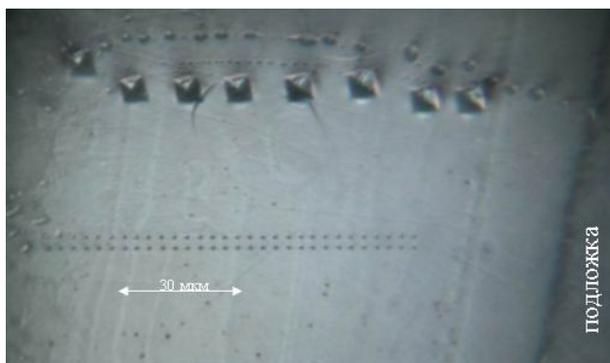


Рис. 4. Косой поперечный шлиф пиролитического карбидохромового покрытия под углом 55° к нормали роста покрытия со следами индентирования пирамидками Виккерса и Берковича (2 ряда по 30 уколов)

Как показали исследования, твердость пиролитического карбидохромового покрытия заметно зависит как от механических свойств материала подложки, так и ее геометрии:

- на вогнутой поверхности подложки ($R = 6$ мм) из стали 45 до расстояния 8 мкм от границы раздела твердость покрытия достигала 25—26 ГПа, а затем снижалась по мере удаления от подложки до значений 18—21,5 ГПа (рис. 5);
- для выпуклой поверхности ($R = 15$ мм) на том же образце — изменялась в пределах от 18 до 20,5 ГПа (рис. 6);
- на плоском образце свидетеле из меди твердость покрытия толщиной 30 мкм, полученном в ходе того же эксперимента, изменялась в пределах от 15,3 до 16,5 ГПа (рис. 7).

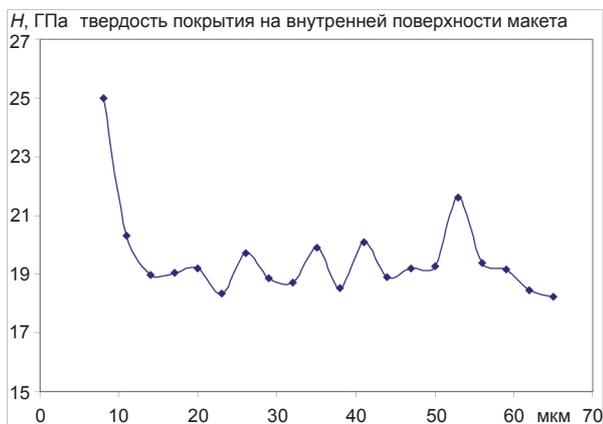


Рис. 5. Нанотвердость на вогнутой поверхности

Эти данные могут свидетельствовать о достаточно высоких внутренних сжимающих напряжениях в покрытии, особенно на

вогнутых поверхностях, и релаксации их при осаждении на мягкие подложки за счет их деформации [14]. Величина внутренних напряжений в покрытии может достигать 2 ГПа [17].



Рис. 6. Нанотвердость на выпуклой поверхности косого шлифа под углом 55° к нормали роста покрытия

Данные рентгеновского флуоресцентного анализа показали, что в покрытии кроме хрома содержатся Al — 0,14 % и Si — 0,16 %, которые входят в состав технического продукта ХОЖ «Бархос» как побочные продукты синтеза и являются катализаторами процесса пиролиза.

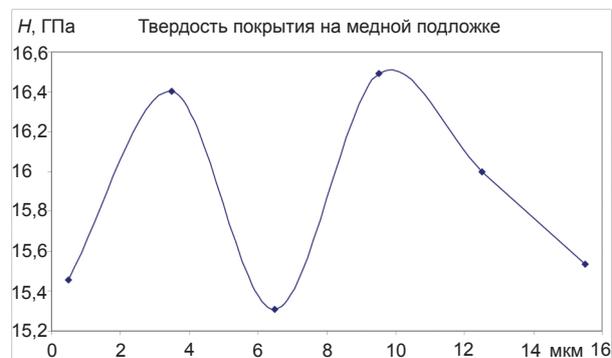


Рис. 7. Нанотвердость покрытия на медной подложке

Образование сферических наростов на поверхности покрытия вызвано присутствием их соединений (формула соединений не идентифицирована) в составе технического продукта. Очистка технического продукта от примесей или использование добавок подавляющих действие этих примесей позволяет получать карбидохромовые покрытия с существенно более низкой шероховатостью [15]. Определение наличия углерода,

кислорода и азота данным оборудованием не производится. Однако известно, что содержание углерода среднее содержание по зоне анализа колеблется в пределах от 4 до 14 % (вес.) [16].

Результаты сравнительных исследований электрохимических свойств конструкционных материалов и пиролитических карбидохромовых покрытий различной толщины на этих материалах приведены на рис. 8. Испытания проводили в 3 % растворе NaCl при комнатной температуре. Анализ поляризационных кривых для стали ХВГ без покрытия и с покрытием толщиной 9 мкм, для стали 08X18H10T без покрытия и с покрытием толщиной 9 мкм, а также для стали 12X18H10T без покрытия и стали 12X18H10T с покрытием толщиной 20 мкм показал, что данные покрытия обладают высокой стойкостью к электрохимическому растворению в исследованном диапазоне потенциалов.

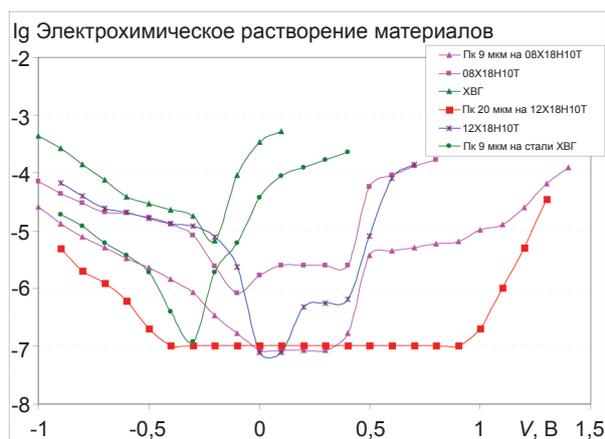


Рис. 8. Поляризационные кривые конструкционных материалов и пиролитических карбидохромовых покрытий различной толщины на этих материалах

Из графиков видно, что скорость растворения пиролитических карбидохромовых покрытий, получаемых пиролизом ХОЖ «Бархос» существенно ниже, чем у сталей 12X18H10T и 08X18H10T.

Величина коррозионного тока, при типичных размерах исследуемых образцов (S исследуемой поверхности 1 см²), в диапазоне потенциалов от $-0,4$ В до $+0,9$ В была ниже предела чувствительности потенциостата ПИ-50-1. Для покрытий толщиной 9 мкм характер хода кривых для сталей ХВГ

и 08X18H10T с покрытием и без него свидетельствуют о наличии отдельных сквозных пор в покрытии. В покрытиях толщиной 20 мкм гарантировано отсутствие сквозной пористости. Известно [16], что слоистые карбидохромовые покрытия полученные пиролизом ХОЖ «Бархос» стойки к воздействию минеральных кислот HCl, HNO₃ и H₂SO₄ и отсутствие сквозной пористости в таких покрытиях ($R_a = 1,25—2,5$ мкм) достигается, начиная с толщин 13—15 мкм. Снижение исходной шероховатости подложки позволяет снизить толщину покрытий, при которой в них отсутствует сквозная пористость [18].

ВЫВОДЫ

Электрохимическая стойкость пиролитических карбидохромовых покрытий значительно превышает стойкость стали 12X18H10T, которую используют для изготовления ответственных узлов запорной арматуры работающей в жестких эксплуатационных условиях.

Кавитационная стойкость пиролитических карбидохромовых покрытий получаемых осаждением из газовой фазы ХОЖ «Бархос» 2—4 раза выше, чем у сплава ВТ-8, в 8—15 раз выше, чем у стали 20Х13, и в 10—25 раз выше, чем у стали 12X18H10T.

Стойкость к кавитационному износу горизонтально-слоистых покрытий в два раза превышает стойкость покрытий со слоистой-столбчатой структурой, что качественно согласуется с данными о соотношениях H/E для таких структур.

Данные исследований свидетельствуют о перспективности использования пиролитических карбидохромовых покрытий в качестве защитных покрытий, а особенно эффективно их применение для защиты внутренних поверхностей, глухих полостей и сложнопрофильных поверхностей, защиту которых сложно обеспечить другими способами их получения.

Авторы выражают благодарность В. И. Коваленко, Г. Н. Толмачевой и Н. Дерюге за помощь при проведении исследований физико-химических свойств покрытий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Костенков В. А. Реакционное оборудование для получения покрытий на изделиях различной конфигурации и габаритов пиролизом металлоорганических соединений // В кн. Применение металлоорганических соединений для получения неорганических покрытий и материалов. — М.: Наука, 1986. — 256 с.
2. Грибов Б. Г., Домрачев Г. А., Жук Б. В. и др. Осаждение пленок и покрытий разложением металлоорганических соединений / Под ред. Г. А. Разуваева. — М.: Наука, 1981. — 322 с.
3. Крохмаль С. А., Зуева Т. Н., Широков Б. М., Водопьянова И. Г. Защита сварного шва ремонтных переходников для трубопроводов АЭС карбидохромовыми покрытиями, получаемыми путем пиролиза хромоорганических соединений. Механіка та машинобудування // Науково-технічний журнал. — Харків: НТУ «ХП». — 2007. — № 2. — С. 110—117.
4. Домрачев Г. А., Пашкин В. А., Ширяев А. М. и др. К механизму формирования контактного слоя и адгезии пиролитического карбидохромового покрытия на стали // Неорг. Материалы. — 1991. — Т. 27, № 10. — С. 2113—2118.
5. Щуров А. Ф. Структура и механика разрушения покрытий, получаемых термическим разложением хромоорганических соединений // В кн.: Применение металлоорганических покрытий и материалов. (Горький, 1987): Тез. докл. 5-го Всесоюз. совещ. — М.: Наука, 1987. — С. 59—61.
6. Лахтин Ю. М., Коган Я. Д., Горовой А. П., Струлев В. М. Исследование физико-механических свойств пиролитических хромовых покрытий // В кн.: Применение металлоорганических покрытий и материалов. (Горький, 1987): Тез. докл. 5-го Всесоюз. совещ. — М.: Наука, 1987. — С. 68—71.
7. Лахтин Ю. М., Коган Я. Д., Горовой А. П. и др. Парофазная технология получения защитных покрытий термораспадом металлоорганических соединений хрома. // Техника, экономика, информация. Сб. науч. трудов. — Сер. Технология. — М.: МИНИ, 1986.
8. Rabinowicz E. Friction and Wear of Materials. — New York: Wiley, 1995. — 523 p
9. Novikov N. V., Voronkin M. A., Dub S. N. et al. Transition from polymer-like to diamond-like a-C:H films: Structure and mechanical properties // Diamond Relat. Mater. — 1997. — Vol. 6, No. 5—7. — P. 574—578.
10. Leyland A., Matthews A. On the significance of the H/E ratio in wear control: a nanocomposite coating approach to optimised tribological behaviour // Wear. — 2000. — 246. — P. 1—11.
11. Крохмаль С. А. Увеличение стойкости сложнопрофильных деталей узлов запорной арматуры используемой в оборудовании АЭС и ТЭС // Сборник «Ресурс», — Институт электросварки им. Е. А. Патона НАНУ. — Киев, 2012. — С. 180—185.
12. Забугин А. В., Гавриленко А. С. Физико-механические свойства дискретно-модифицированных композиционных поверхностей, формируемых электродуговым распылением в вакууме // XVIII Международная научно-практическая конференция «Современные техника и технологии». — Секция 6. — С. 155—156.
13. Погребняк А. Д., Шпак А. П., Азаренков Н. А., Береснев В. М. Структура и свойства твердых и сверхтвердых нанокompозитных покрытий // УФН. — 2009. — Т. 179, № 1. — С. 3—64.
14. Костенков В. А., Крашенинников В. Н., Щенников В. И. и др. Влияние механических свойств металла на формирование пиролитических хромовых покрытий // Физика и химия обработки материалов. — М. — 1979. — № 2. — С. 109—113.
15. Поликарпов В. Б. Влияние органических соединений на процесс осаждения хрома, молибдена и вольфрама при термическом разложении их π -комплексов / Дис. канд. хим. наук. — Горький, 1986. — 221 с.
16. Крохмаль С. А., Широков Б. М. О возможности использования металлоорганических соединений хрома для защиты деталей и технологической оснастки, используемой для работы в агрессивных средах // Вістник Національного технічного університету «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск «Хімія, хімічна технологія та екологія». — Харків: НТУ «ХП». — 2007. — № 32. — С. 47—54.
17. Лахтин Ю. М., Коган Я. Д., Горовой А. П. и др. Адгезионная прочность и остаточные напряжения пиролитических хромовых покрытий на конструкционных сталях // Применение металлоорганических соединений для получения неорганических покрытий и материалов: Тез. докл. 4-го Всесоюз. совещ. Горький. — М.: Наука, 1983. — С. 151.
18. Костенков В. А., Крашенинников В. Н. — Эксплуатационные свойства пиролитиче-

ских карбидохромовых покрытий // В сб. «Применение металлоорганических соединений для получения неорганических покрытий и материалов / Под ред. акад. Разуваева Г. А. — М.: Наука, 1986. — С. 234—243.

LITERATURA

1. Kostenkov V. A. Reakcionnoe oborudovanie dlya polucheniya pokrytij na izdeliyah razlichnoj konfiguracii i gabaritov pirolizom metalloorganicheskikh soedinenij // V kn. Primenenie metalloorganicheskikh soedinenij dlya polucheniya neorganicheskikh pokrytij i materialov. — М.: Nauka, 1986. — 256 p.
2. Gribov B. G., Domrachev G. A., Zhuk B. V. i dr. Osazhdenie plenok i pokrytij razlozheniem metalloorganicheskikh soedinenij / Pod red. G. A. Razuvaeva. — М.: Nauka, 1981. — 322 p.
3. Krohmal' S. A., Zueva T. N., Shirokov B. M., Vodop'yanova I. G. Zashchita svarnogo shva remontnykh perehodnikov dlya truboprovodov AES karbidohromovymi pokrytiyami, poluchaemyimi putem piroliza hromorganicheskikh soedinenij. Mehanika ta mashinobudovannyya // Naukovo-tehnichnij zhurnal. — Harkiv: NTU «HPI». — 2007. — No. 2 — P. 110—117.
4. Domrachev G. A., Pashkin V. A., Shiryaev A. M. i dr. K mehanizmu formirovaniya kontaktnogo sloya i adgezii piroliticheskogo karbidohromovogo pokrytiya na stali // Neorg. Materialy. — 1991. — Vol. 27, No. 10. — P. 2113—2118.
5. Schurov A. F. Struktura i mehanika razrusheniya pokrytij, poluchaemykh termicheskim razlozheniem hromorganicheskikh soedinenij // V kn.: Primenenie metalloorganicheskikh pokrytij i materialov. (Gor'kij, 1987): Tez. dokl. 5-go Vsesoyuz. sovesch. — М.: Nauka, 1987. — P. 59—61.
6. Lahtin Yu. M., Kogan Ya. D., Gorovoj A. P., Strulev V. M. Issledovanie fiziko-mehaniicheskikh svojstv piroliticheskikh hromovykh pokrytij // V kn.: Primenenie metalloorganicheskikh pokrytij i materialov. (Gor'kij, 1987): Tez. dokl. 5-go Vsesoyuz. sovesch. — М.: Nauka, 1987. — P. 68—71.
7. Lahtin Yu. M., Kogan Ya. D., Gorovoj A. P. i dr. Parofaznaya tehnologiya polucheniya zashchitnykh pokrytij termoraspadom metalloorganicheskikh soedinenij hroma. // Tehnika, ekonomika, informaciya. Sb. nauch. trudov. — Ser. Tehnologiya. — М.: MINI, 1986.
8. Rabinowicz E. Friction and Wear of Materials. — New York: Wiley, 1995. — 523 p.
9. Novikov N. V., Voronkin M. A., Dub S. N. et al. Transition from polymer-like to diamond-like a-C:H films: Structure and mechanical properties // Diamond Relat. Mater. — 1997. — Vol. 6, No. 5—7. — P. 574—578.
10. Leyland A., Matthews A. On the significance of the H/E ratio in wear control: a nanocomposite coating approach to optimised tribological behaviour // Wear. — 2000. — 246. — P. 1—11.
11. Krohmal' S. A. Uvelichenie stojkosti slozhnoprofil'nykh detalej uzlov zapornoj armatury ispol'zuej v oborudovanii AES i TES // Sbornik «Resurs», — Institut elektrosvarki im. E. A. Patona NANU. — Kiev, 2012. — P. 180—185.
12. Zabugin A. V., Gavrilenko A. S. Fiziko-mehaniicheskie svojstva diskretno-modificirovannykh kompozicionnykh poverhnostej, formiruemykh elektrodugovym raspyleniem v vakuume // XVIII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya «Sovremennyye tehnika i tehnologii». — Sekciya 6. — P. 155—156.
13. Pogrebnyak A. D., Shpak A. P., Azarenkov N. A., Beresnev V. M. Struktura i svojstva tverdykh i sverhtverdykh nanokompozitnykh pokrytij // UFN. — 2009. — Vol. 179, No. 1. — P. 3—64.
14. Kostenkov V. A., Krashennnikov V. N., Schennikov V. I. i dr. Vliyanie mehaniicheskikh svojstv metalla na formirovanie piroliticheskikh hromovykh pokrytij // Fizika i himiya obrabotki materialov. — М. — 1979. — No. 2. — P. 109—113.
15. Polikarpov V. B. Vliyanie organicheskikh soedinenij na process osazhdeniya hroma, molibdena i vol'frama pri termicheskom razlozhenii ih π -kompleksov / Dis. kand. him. nauk. — Gor'kij, 1986. — 221 p.
16. Krohmal' S. A., Shirokov B. M. O vozmozhnosti ispol'zovaniya metalloorganicheskikh soedinenij hroma dlya zashchity detalej i tehnologicheskoy osnastki, ispol'zuej dlya raboty v agressivnykh seredah // Vistnik Nacional'nogo tehnichnogo universitetu «HPI». Zbirnik naukovih prac'. Tematichnij vipusk «Himiya, himichna tehnologiya ta ekologiya». — Harkiv: NTU «HPI». — 2007. — No. 32. — P. 47—54.
17. Lahtin Yu. M., Kogan Ya. D., Gorovoj A. P. i dr. Adgezionnaya prochnost' i ostatochnyye napryazheniya piroliticheskikh hromovykh pokrytij na konstrukcionnykh stalyah // Primenenie metalloorganicheskikh soedinenij dlya polucheniya neorganicheskikh pokrytij i materialov: Tez. dokl. 4-go Vsesoyuz. sovesch. Gor'kij. — М.: Nauka, 1983. — 151 p.

18. Kostenkov V. A., Krasheninnikov V. N. — Ekspluatatsionnye svoystva piroliticheskikh karbidohromovykh pokrytij // V sb. «Primenenie metalloorganicheskikh soedinenij dlya polucheniya neorganicheskikh pokrytij i materialov/ Pod red. akad. Razuvaeva G. A. — M.: Nauka, 1986. — P. 234—243.