

УДК 621.357.76

DOI: 10.30987/2223-4608-2020-10-3-9

Л.Г. Петрова, д.т.н., В.Д. Александров, д.т.н.,

М.В. Морщилов, к.т.н.,

(Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),

125319, г. Москва, Ленинградский проспект, 64)

E-mail: petrova_madi@mail.ru

Факторы повышения качества защитных хромовых покрытий на алюминиевых сплавах, получаемых пиролитическим осаждением*

Рассмотрены вопросы выявления управляющих параметров процесса осаждения пиролитических хромовых покрытий на алюминиевом сплаве и исследование их влияния на строение покрытий, показатели упрочнения, адгезионную прочность, а также на кинетику роста покрытий. Исследования показали, что данный способ перспективен для поверхностного упрочнения алюминиевых сплавов, так как он позволяет получить хромовые покрытия с высокой и постоянной по толщине твердостью, обладающие повышенной износостойкостью.

Ключевые слова: хромовые покрытия; алюминиевые сплавы; пиролитическое осаждение; износостойкость; адгезионная прочность.

L.G. Petrova, Dr. Sc. Tech., V.D. Alexandrov, Dr. Sc. Tech.,

M.V. Morshchilov, Can. Sc. Tech.

(Moscow State Technical Auto-Road University (MADI), 64, Leningradsky Avenue, Moscow, 125319)

Factors of quality increase in protective chromium coatings on aluminum alloys obtained through pyrolytic precipitation

There are considered the problems of control parameter detection in the process of pyrolytic chromium coatings on aluminum alloy and the investigation of their impact upon coating structure, strengthening indices, adhesion strength, and also upon kinetics of coating growth. The investigations have shown that the method mentioned is promising for aluminum alloy surface strengthening, and also it allows obtaining chromium coatings with high hardness and thick constant possessing increased wear-resistance.

Keywords: chromium coatings; aluminum alloys; pyrolytic precipitation; wear-resistance; adhesion strength.

Введение

Алюминиевые сплавы широко применяются для ответственных изделий в авиационной, автомобильной, текстильной промышленности. Для повышения износостойкости и обеспечения других защитных свойств поверхности детали из алюминиевых сплавов подвер-

* Материал подготовлен в рамках научных исследований по проекту №FSFM-2020-0011 (2019-1342), экспериментальные исследования проведены с использованием оборудования центра коллективного пользования МАДИ.

гаются поверхностной обработке различными методами нанесения покрытий.

Одним из самых распространенных является гальванический способ нанесения хромовых покрытий [1 – 3]. Для электролитического способа характерны сравнительная простота нанесения покрытий, низкая себестоимость, возможность автоматизации и варьирования свойств осаждаемых покрытий. Существенным недостатком способа является низкая адгезия таких покрытий с металлической подложкой.

Опасность отслаивания покрытий обостря-

ется в условиях работы изделий на износ в тяжелых климатических условиях, при высоких и при экстремально низких рабочих температурах, при перепадах температур, что вызвано различными свойствами теплового расширения материала покрытия и подложки.

Проблема адгезии решается путем применения диффузионных способов осаждения покрытий, обеспечивающих взаимопроникновение элементов и формирование переходной зоны между покрытием и подложкой с градиентным изменением химического состава [4].

Эффективным способом поверхностного упрочнения металлов, который обеспечивает формирование покрытий с возможностью получения диффузионной зоны, является метод осаждения хромовых конденсатов из газовой фазы путем пиролиза металлоорганических соединений (МОС) [5 – 8]. Исследования показали, что данный способ перспективен для поверхностного упрочнения алюминиевых сплавов, так как он позволяет получить хромовые покрытия с высокой и постоянной по толщине твердостью [9], обладающие повышенной износостойкостью [10].

Основным фактором качества покрытия является достижение необходимого уровня упрочнения, что обуславливает обеспечение служебных свойств изделия с покрытием (твердости и сопротивления изнашиванию). Кроме того, покрытие должно обладать высокой прочностью сцепления (адгезией) с подложкой для обеспечения его надежности в эксплуатации. Толщина покрытия и скорость его роста составляют кинетический фактор качества покрытия. Целью настоящей работы является выявление управляющих параметров процесса осаждения пиролитических хромовых покрытий на алюминиевом сплаве и исследование их влияния на строение покрытий, показатели упрочнения, адгезионную прочность, а также на кинетику роста покрытий.

Методика проведения исследований

Исследования проводили на образцах алюминиевого сплава силумин АЛ9. Осаждение хромовых покрытий на образцы проводили в лабораторной установке, описанной в работе [6]. Образцы с предварительно обработанной поверхностью помещали на стальную подложку в реакционной камере, где создавали вакуум с остаточным давлением 13...65 Па. Нагрев образцов до заданной температуры осуществляли за счет контактного теплообмена при обработке подложки токами высокой

частоты.

Для получения пиролитических хромовых покрытий использовали жидкость «Бархос», представляющую собой бис-ареновое металлоорганическое соединение (МОС) и содержащее не менее 16 % хрома. Жидкость «Бархос» помещали в испаритель, расположенный вне реакционной камеры, где располагаются образцы, включали нагрев реактора и испарителя. Подачу МОС осуществляли по 0,5 мл через каждые 30 с. Образующиеся в испарителе пары МОС в потоке аргона поступали в реактор, где они разлагались с образованием паров хрома, который, осаждаясь на поверхности образца, образовывал покрытие.

Регулирование концентрации паров «Бархос» в парогазовой смеси проводили путем разбавления аргоном при постоянной температуре испарения ($T_{исп} = 180...200$ °С). Основными управляющими параметрами процесса были температура осаждения (определяемая по температуре подложки $T_{подл}$), давление P паров МОС в реакционной камере, а также продолжительность осаждения τ . Температуру подложки варьировали от 300 до 500 °С, давление в камере – от 520 до 1040 Па, продолжительность процесса – от 10 до 70 мин.

Структуру покрытий исследовали в металлографическом микроскопе Axiovert 25CA. Для выявления структуры коррозионностойкого покрытия травление шлифов проводили в кипящей 50 %-ной серной кислоте. Качественный фазовый рентгеноструктурный анализ проводили на дифрактометре «ДРОН-2» в молибденовом излучении, рентгеноспектральный анализ – в растровом электронном микроскопе «Стереоскан-180» и «Самеса MS-46».

Микротвердость измеряли на микротвердометре ПМТ-3 при нагрузке 0,5 Н. Испытания на износ проводили на машине «Шкода-Савин» при истирании поверхности образцов вращающимся твердосплавным диском под нагрузкой 98 Н. В качестве характеристики износостойкости использовали показатель объема вытертой лунки на единицу пути трения (W , мм³/м). Замеры проводили при значениях пути трения 50, 100, 150 и 200 м, что соответствовало определенному числу оборотов твердосплавного диска.

Адгезионную прочность хромового покрытия на алюминиевом сплаве определяли испытаниями на обжатие на разрывной машине ИМ-4А. Обжатие образцов сечением 5×10 мм и высотой 15 мм проводили на 25 % по высоте. Характеристикой адгезионной прочности является

ся относительная величина $G_{адг}$, определяемая по отношению массы осыпавшегося в испытаниях хрома к массе всего покрытия:

$$G_{адг} = \left(1 - \frac{P_1 - P_2}{\Delta P}\right) \cdot 100\%,$$

где P_1 – масса образца с покрытием до испытания, г; P_2 – масса образца после обжата на 25 %, г; ΔP – масса хромового покрытия, г.

Результаты исследований и их обсуждение

Исследование микроструктуры хромовых покрытий на сплаве АЛ9 показало, что покрытия имеют слоистую структуру (рис. 1). Это объясняется циклической подачей жидкого МОС в испаритель. Общая толщина покрытия и толщина отдельных слоев увеличивается с повышением температуры осаждения.

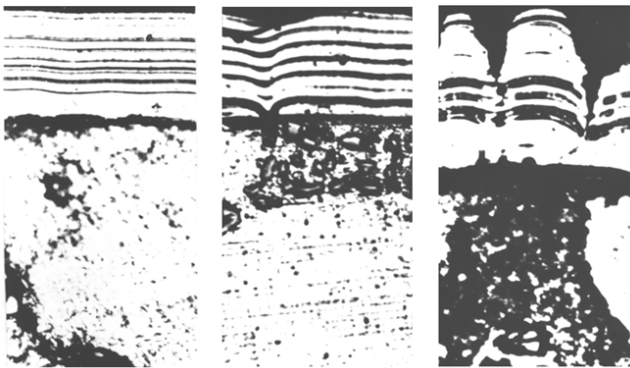


Рис. 1. Микроструктуры (x500) хромовых покрытий на сплаве АЛ9, полученные при температурах осаждения:

a – $T_{подл} = 350$ °С; *б* – $T_{подл} = 450$ °С; *в* – $T_{подл} = 500$ °С ($T_{исп} = 200$ °С; $P = 650$ Па; $\tau = 30$ мин)

Дифракционный анализ свежесоздаваемых пленок хрома не выявил кристаллической структуры, это означает, что полученные покрытия рентгеноаморфны. Характер распределения хрома и углерода по толщине покрытия, выявленный методом рентгеноспектрального анализа, позволил установить, что при всех режимах осаждения наблюдается диффузия хрома в алюминий с образованием диффузионной зоны толщиной до 10 мкм. По химическому составу покрытие не является чисто хромовым, поскольку в используемой жидкости для испарения присутствует углерод: концентрация хрома в покрытии составляет примерно 82 %.

Белые слои в покрытии идентифицированы как пресыщенный аморфный твердый раствор углерода (8...12 % С) в хrome. Темные полосы (см. рис.1) содержат смесь мелкодисперсных

карбидов хрома Cr₂₃C₆ и Cr₇C₃, выделившихся в результате распада твердого раствора при обеднении хромом газовой фазы. Карбидная фаза фиксируется рентгеноструктурным анализом только при укрупнении частиц в результате проведенного отжига образцов с покрытиями (при 450 °С в течение 5 ч).

Выявленное строение покрытий объясняет наблюдаемое упрочнение, которое выражается в повышении микротвердости покрытий по сравнению с твердостью сплава-основы (рис. 2). На уровень упрочнения влияет температура осаждения, которая определяет интенсивность протекания пиролиза МОС: чем выше температура подложки, тем больше микротвердость (табл. 1). При температуре подложки 450...500 °С (при $P = 650$ МПа; $T_{исп} = 200$ °С) за 30 мин осаждения образуется покрытие толщиной 30...35 мкм с микротвердостью не менее 16 000 МПа.

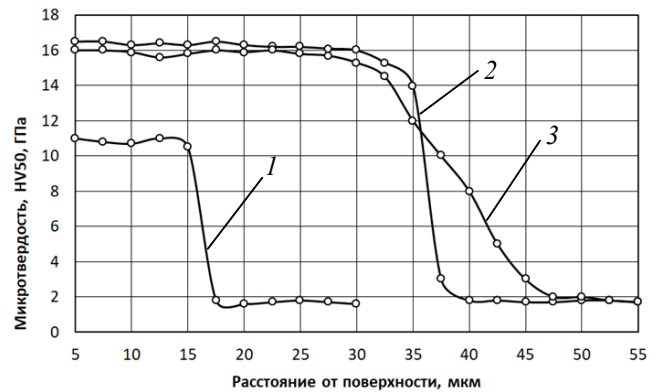


Рис. 2. Распределение микротвердости по толщине образцов с хромовыми покрытиями:

1 – $T_{подл} = 350$ °С; 2 – $T_{подл} = 450$ °С; 3 – $T_{подл} = 500$ °С; отжиг при $T = 535$ °С, 4 ч ($P = 650$ Па; $T_{исп} = 200$ °С; $\tau = 30$ мин)

1. Показатели упрочнения хромовых покрытий на сплаве АЛ9, полученные при различных температурах осаждения ($P = 650$ Па; $T_{исп} = 200$ °С; $\tau = 30$ мин)

$T_{подл}$, °С	Микротвердость 50 HV, МПа	Объемный показатель износа W , мм ³ /м
Сплав без покрытия	–	> 2,8
350	11000	0,045...0,06
450	16500	< 0,01
500	16000	0,025...0,03

Природа высокой твердости газофазных хромовых покрытий обусловлена высокими

внутренними напряжениями, возникающими в процессе их формирования, образованием аморфной структуры типа металлического стекла, пересыщением твердого раствора углеродом, а также наличием дисперсных карбидов хрома. В работе [11] показана возможность выделения в твердом растворе наноразмерных вторичных карбидов хрома по механизму старения, что является дополнительным фактором дисперсионного упрочнения.

Испытания на износ показали, что пиролитические хромовые покрытия на алюминиевом сплаве способны выдерживать высокие удельные нагрузки. Объемный показатель износа сплава с покрытиями более чем на 2 порядка ниже, чем показатель износа сплава без покрытия (см. табл. 1). Закономерность влияния температуры осаждения на показатель износа коррелирует с изменениями микротвердости при варьировании температуры, поскольку именно твердость хромового осадка определяет его сопротивление износу. Максимальная стойкость к истиранию достигается при температуре подложки 450 °С, соответствующей получению максимальной микротвердости (см. табл. 1).

Наличие диффузионной зоны на границе покрытия с матрицей сплава является предпосылкой хорошей адгезии хромового покрытия на алюминиевом сплаве. Формирование диффузионной зоны обусловлено тем, что при температуре осаждения хрома из газовой фазы при разложении МОС достаточно интенсивно развиваются диффузионные процессы между покрытием и сплавом-подложкой.

Испытания показали, что адгезионная прочность увеличивается с повышением температуры осаждения и давления в реакционной камере до определенных критических значений: максимальная величина показателя адгезии соответствует температуре подложки 450 °С и давлению 650 Па (рис. 3 *а, б*). Увеличение продолжительности осаждения покрытий понижает адгезионную прочность (рис. 3, *в*), что может быть связано с повышением внутренних напряжений в слое, вследствие большой толщины получаемого покрытия.

Дополнительное увеличение прочности сцепления покрытия с подложкой достигается при проведении отжига покрытий. На профиле микротвердости образца с покрытием после отжига при 535 °С в течение 4 ч образуется плавный переход от покрытия к сердцевине (см. кривая 3 на рис. 2), что указывает на развитие диффузионных процессов и продвижение хрома вглубь сплава-подложки. Оцени-

ваемая толщина переходной диффузионной зоны после отжига возрастает до 18 мкм. Отжиг не приводит к сколь-нибудь значительному разупрочнению покрытия, практически не меняет толщину покрытия и твердость сердцевины.

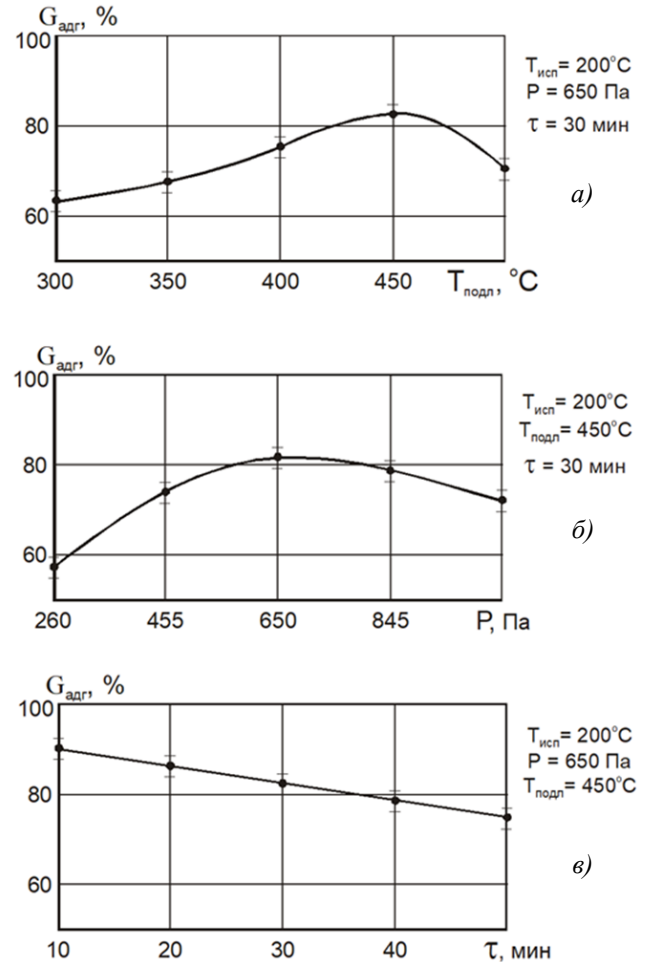


Рис. 3. Зависимости показателя адгезионной прочности хромового покрытия на алюминиевом сплаве АЛ9 от:

а – температуры подложки; *б* – давления в реакционной камере; *в* – продолжительности процесса

Получение качественных покрытий в значительной степени зависит от возможности управления их толщиной, что потребовало исследования параметров обработки, влияющих на кинетику осаждения. В качестве кинетических параметров роста покрытия принимали толщину образца h , а также скорость осаждения покрытия v и удельный привес образцов G . Установлено, что увеличение скорости подачи «Бархос» Q более, чем до 1,0 мл/мин (при обработке циклами по 0,5 мл каждые 30 с) приостанавливает рост покрытия: скорость осаждения и удельный привес образцов практически не меняются (рис. 4).

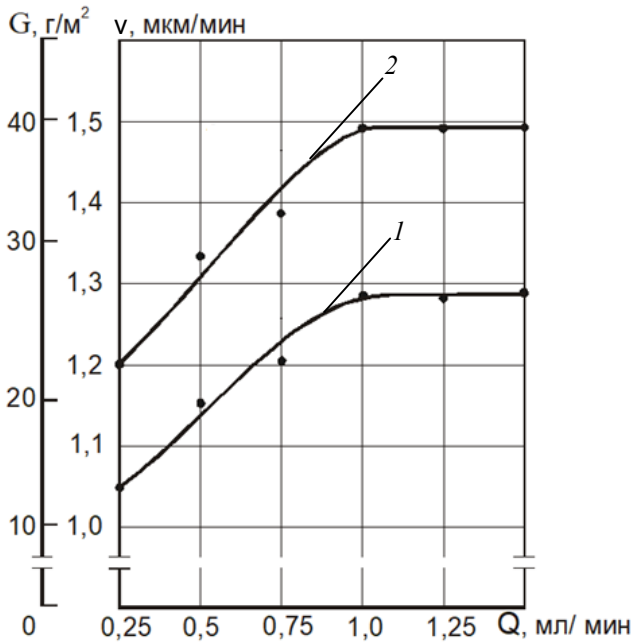


Рис. 4. Влияние скорости подачи «Бархос» на скорость осаждения покрытий v (1) и удельный привес G (2) при параметрах процесса:

$T_{\text{подл}} = 450 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\text{исп}} = 180 \text{ }^\circ\text{C}$; $P = 520 \text{ Па}$; $\tau = 10 \text{ мин}$

Наблюдаемый эффект можно объяснить развитием процесса конденсации паровой фазы, что приводит к уменьшению концентрации паров МОС в реакторе. Кинетика осаждения покрытия оптимальна в том случае, когда скорость химических реакций при разложении МОС будет соизмерима со скоростью массопереноса образующихся продуктов распада к детали. Обе скорости сильно зависят от температуры детали: рациональная скорость осаждения покрытия с повышением температуры уменьшается.

Детальные исследования в широком интервале температур осаждения (350...550 °C) и давлений парогазовой смеси (520...1040 Па) показали наличие экстремальных зависимостей скорости осаждения покрытия от температуры подложки (рис. 5). При общем давлении паров МОС и газоносителя (аргона) равным $P_{\text{общ}} = 520 \text{ Па}$ с ростом температуры подложки до 500 °C, скорость осаждения покрытия увеличивается за счет повышения скорости химических реакций на поверхности образца. Наибольшая скорость осаждения (1,8 мкм/мин) достигается при сбалансированности процессов химических реакций на поверхности подложки и массопереноса продуктов этих реакций. Дальнейшее снижение скорости осаждения при повышении температуры объясняется лимитированием кинетики

процесса транспортной стадией.

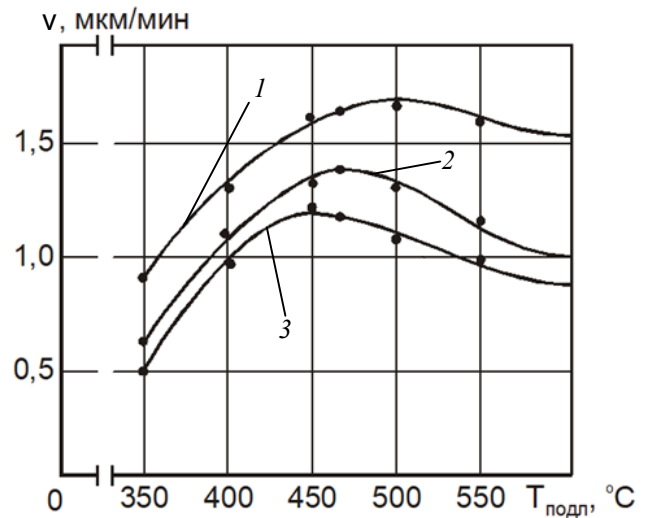


Рис. 5. Зависимость скорости осаждения покрытий от температуры подложки при различных давлениях в камере:

1 – $P_{\text{общ}} = 520 \text{ Па}$; 2 – $P_{\text{общ}} = 780 \text{ Па}$; 3 – $P_{\text{общ}} = 1040 \text{ Па}$ ($T_{\text{исп}} = 180 \text{ }^\circ\text{C}$)

С увеличением общего давления парогазовой смеси скорость осаждения падает вследствие уменьшения доли насыщающего газа в общей парогазовой смеси при разбавлении «Бархос» аргоном. При этом значения максимальной скорости осаждения покрытия смещаются в область более низких температур: для 780 Па – до 470 °C, а для 1040 Па – до 450 °C (см. рис. 5). Таким образом, при более низких температурах процесс осаждения определяется, в основном, переносом «Бархос» к поверхности детали. Следовательно, путем увеличения общего давления парогазовой смеси можно вести процесс осаждения покрытий при более низких температурах, но при этом скорость осаждения будет гораздо ниже.

При постоянных параметрах температуры осаждения и давления в реакционной камере скорость осаждения покрытий увеличивается при повышении температуры испарителя за счет увеличения концентрации паров «Бархос» (рис. 6).

В интервале температур испарителя от 180 до 220 °C при постоянных значениях остальных параметров осаждения покрытие наибольшей толщины ($h_{\text{max}} = 40 \text{ мкм}$) формируется при температуре подложки 450 °C и давлении в камере 650 Па (рис. 7). При дальнейшем увеличении общего давления в реакционной камере толщина покрытия уменьшается, и скорость роста толщины покрытия замедляет-

ся (см. рис. 5). Повышение температуры испарителя увеличивает максимальную толщину покрытия и вызывает смещение максимума толщины в область более высоких температур осаждения. Например, при температуре испарителя $T_{исп} = 160\text{ }^\circ\text{C}$ h_{max} составляет 25 мкм, а при $T_{исп} = 240\text{ }^\circ\text{C}$ h_{max} увеличивается до 47 мкм.

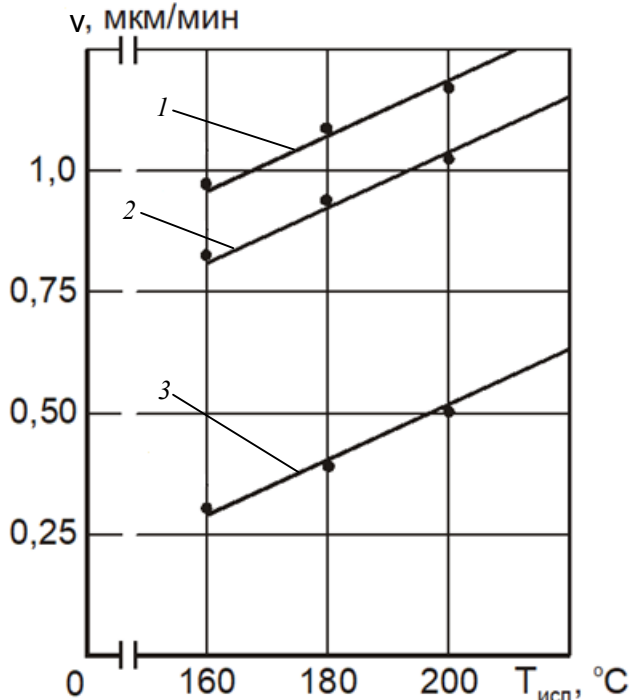


Рис. 6. Влияние температуры испарителя на скорость осаждения покрытий при различном давлении в камере:

1 – $P_{общ} = 520\text{ Па}$; 2 – $P_{общ} = 780\text{ Па}$; 3 – $P_{общ} = 1040\text{ Па}$ ($T_{подл} = 470\text{ }^\circ\text{C}$; $\tau = 30\text{ мин}$)

На кинетику осаждения оказывают влияние продолжительность процесса и температура испарителя. При выбранной технологической схеме регулирования концентрации паров «Бархос» и продуктов распада в парогазовой смеси с увеличением продолжительности осаждения толщина получаемого покрытия растет по линейному закону (рис. 8).

Увеличение продолжительности осаждения закономерно приводит к росту максимальной толщины покрытия: при $\tau = 10\text{ мин}$ $h_{max} = 21\text{ мкм}$, а при $\tau = 50\text{ мин}$ $h_{max} = 70\text{ мкм}$ (данные для $T_{подл} = 450\text{ }^\circ\text{C}$, $T_{исп} = 200\text{ }^\circ\text{C}$). При оптимальных параметрах осаждения за 70 мин процесса удается получить покрытие толщиной 95...100 мкм. Таким образом, изменение времени выдержки позволяет получать покрытия требуемой толщины, строение которо-

го регулируется температурой подложки и концентрацией паров в реакционной камере.

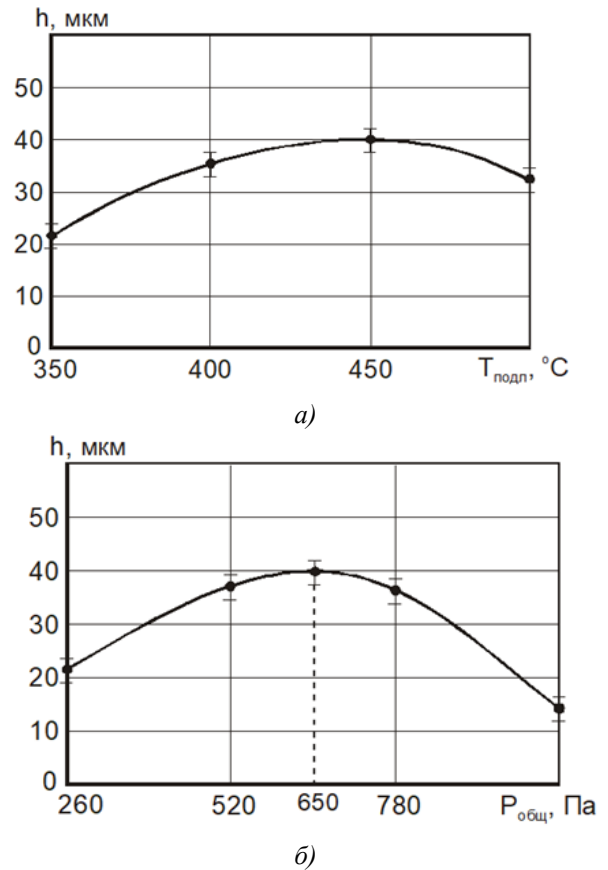


Рис. 7. Зависимости толщины покрытия от температуры подложки при $P_{общ} = 650\text{ Па}$ (а) и от общего давления в реакционной камере при $T_{подл} = 450\text{ }^\circ\text{C}$ (б) ($T_{исп} = 200\text{ }^\circ\text{C}$; $\tau = 30\text{ мин}$)

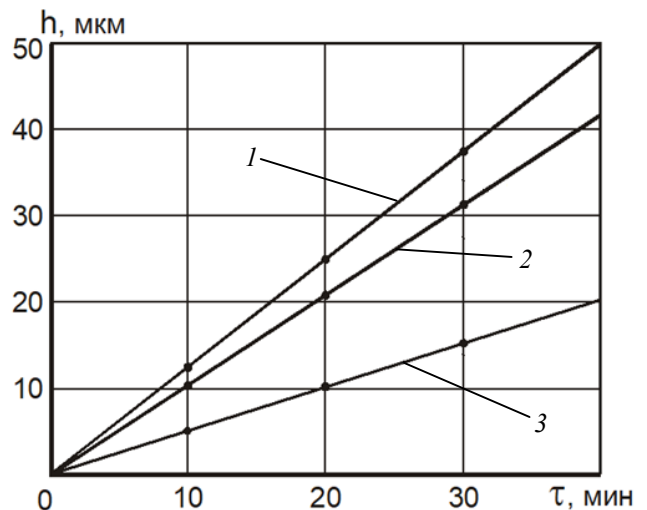


Рис. 8. Влияние продолжительности осаждения на толщину покрытий при различных давлениях в камере:

1 – $P_{общ} = 520\text{ Па}$; 2 – $P_{общ} = 780\text{ Па}$; 3 – $P_{общ} = 1040\text{ Па}$ ($T_{подл} = 470\text{ }^\circ\text{C}$; $T_{исп} = 200\text{ }^\circ\text{C}$)

Выводы

1. Пиролитические хромовые покрытия, полученные на алюминиевом сплаве осаждением МОС, имеют строение пересыщенного углеродом аморфного твердого раствора с наличием дисперсных карбидов хрома, что обеспечивает упрочнение, выражающееся в повышении микротвердости и износостойкости поверхности, а также высокий уровень адгезии с подложкой сплава-основы. Структура газофазного хромового покрытия контролируется технологическими параметрами и расходом жидкого МОС. Повышению адгезионной прочности способствует предварительная подготовка поверхности образцов сплава с удалением оксидных пленок.

2. Определены основные факторы процесса, влияющие как на показатели упрочнения, так и на кинетику формирования покрытия. Оптимальными параметрами процесса, обеспечивающими наибольшую твердость, износостойкость и адгезионную прочность в сочетании с высокой скоростью достижения покрытия максимальной толщины, являются температура осаждения (подложки) 450 °С, давление в реакционной камере 650 Па, температура испарителя в интервале 180...200 °С. Заданная толщина покрытия при указанных параметрах регулируется продолжительностью осаждения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Солодкова, Л.Н., Кудрявцев, В.Н. Электролитическое хромирование. – М.: Глобус, 2007. – 191 с.
2. Молчанов В.Ф. Восстановление и упрочнение деталей автомобилей хромированием. – М.: Транспорт, 1981. – 176 с.
3. Александров, В.Д., Морщилов, М.В., Сундуков, С.К., Любезнова, А.В. Формирование износостойких гальванических покрытий на алюминиевых сплавах // Научные технологии в машиностроении. – 2014. – № 12(42). – С. 40-45.
4. Петрова, Л.Г., Демин, П.Е., Тимофеева, Г.Ю., Косачев, А.В., Александров, В.Д. Влияние азотирования на износостойкость и адгезию цинковых покрытий на стали // СТН. – 2019. – № 3. – С. 16-19.
5. Сыркин, В.Г. CVD – метод. Химическое парофазное осаждение. – М.: Наука, 2000. – 496 с.
6. А.С. 1246636 СССР, МКИ С23С 11/02, 1984. Устройство для нанесения покрытий из паровой (газовой) фазы // Ю.М. Лахтин, Я.Д. Коган, А.П. Горовой и В.М. Струлев.
7. Юршев, В.И., Михайлов, В.Н., Репях, В.С., Юршев, И.В. Пиролитические хромовые покрытия и усовершенствование технологии осаждения // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2003. – № 5. – С. 141-143.

8. Белашова, И.С. Влияние дополнительной термической обработки на механические характеристики пиролитических хромовых покрытий // Технология металлов. – 2005. – № 2. – С. 39-41.

9. Александров, В.Д. Поверхностное упрочнение алюминиевых сплавов путем осаждения хрома из металлоорганических соединений // Технология металлов. – 2002. – № 3. – С. 26.

10. Александров, В.Д., Морщилов, М.В. Формирование износостойких покрытий на алюминиевых сплавах путем осаждения хрома из газофазных металлоорганических соединений // Научные технологии в машиностроении. – 2016. – № 2. – С. 34-38.

11. Белашова И.С., Петрова, Л.Г. Дисперсионное упрочнение пиролитических хромовых покрытий наночастицами карбидов при кристаллизации аморфной фазы // Научные технологии. – 2014. – № 7(37). – С. 56-61.

REFERENCES

1. Solodkova, L.N., Kudryavtsev V.N. *Electrolytic Chromium Coating*. – М.: Globe, 2007. – pp. 191.
2. Molchanov V.F. *Motor Car Parts Reconditioning and Strengthening with Chromium Coating*. – М.: Transport, 1981. – pp. 176.
3. Alexandrov, V.D., Morshchilov, M.V., Sundukov, S.K., Lyubeznova, A.V. Wear-resistant electrolytic plate formation on aluminum alloys // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2014. – No.12 (42). – pp. 40-45.
4. Petrova, L.G., Dyomin, P.E., Timofeeva, G.Yu., Kosachyov, A.V., Alexandrov, V.D. *Nitriding Impact upon Wear-Resistance and Adhesion of Zinc Coatings on Steel* // STN. – 2019. – No.3. – pp. 16-19.
5. Syrkin, V.G. *CVD – Method. Chemical Steam-Phase Precipitation*. – М.: Science, 2000. – pp. 496.
6. АС 1246636 the USSR, IIC C23C 11/02, 1984. *Device for Coating Application from Steam (Gas) Phase* // Yu.M. Lakhtin, Ya.D. Kogan, A.P. Gorovoy and V.M. Strulyov.
7. Yurshev, V.I., Mikhailov, V.N., Ropyakh, V.S., Yurshev, I.V. Pyrolytic chromium coatings and precipitation technology updating // *Bulletin of Ohrenburg State University*. – 2003. No.5. – pp. 141-143.
8. Belashova, I.S. Impact of additional thermal treatment upon mechanical characteristics of pyrolytic chromium coatings // *Metal Technology*. – 2005. – No.2. – pp. 39-41.
9. Alexandrov, V.D. Aluminum alloy surface strengthening through chromium precipitation from metal-organic compositions // *Metal Technology*. – 2002. – No.3. – pp. 26.
10. Alexandrov, V.D., Morshchilov, M.V. Wear-resistant coating formation on aluminum alloys by chromium precipitation from gas-phase metal-organic compositions // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2016. – No.2. – pp. 34-38.
11. Belashova, I.S., Petrova, L.G. Dispersion strengthening of pyrolytic chromium coatings with carbide nano-particles while amorphous phase crystallization // *Science Intensive Technologies*. – 2014. – No. 7(37). – pp. 56-61.

Рецензент д.т.н. Д.С. Фатюхин