

УДК 621.793

DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-4-37-42

В.А. Ильин¹, А.В. Панарин¹**АЛЮМИНИЕВЫЕ ПОКРЫТИЯ И СПОСОБЫ ИХ ПОЛУЧЕНИЯ**

Представлены различные способы получения алюминиевого покрытия. Описаны основные особенности каждого из них. Рассмотрены некоторые свойства полученных алюминиевых покрытий, а также варианты их применения в промышленности.

Ключевые слова: алюминиевое покрытие, металлизация, алитирование.

Different methods of aluminum coating manufacture are presented. Basic features of each of them are described. Some properties of the obtained aluminum coatings, but also variants of their application in industry are considered.

Keywords: aluminum coating, metallization, aluminizing.

¹Ульяновский научно-технологический центр [Ulyanovsk scientific and technological center] E-mail: untcviam@viam.ru.

Введение

Исходя из задач, определенных в стратегических направлениях развития материалов и технологий, и анализа тенденций развития материалов в мире актуальными являются наноструктурированные покрытия и материалы, обладающие более высоким уровнем свойств [1]. Этим обусловлен интерес к применению алюминия в качестве материала для нанесения защитных покрытий.

Известно, что на поверхности алюминия при контакте с кислородом воздуха образуется оксидная пленка с хорошими защитными свойствами, которая состоит в основном из оксида (в аморфном или кристаллическом состоянии) и гидроксида алюминия. Оксидная пленка характеризует коррозионное поведение алюминия: он стоек в таких окислителях, как азотная кислота, растворы бихроматов [2].

Коррозионная устойчивость алюминия растет с повышением его чистоты. При контактировании алюминия с цинком и кадмием коррозионная стойкость не снижается, но при взаимодействии с железом скорость коррозии резко возрастает, а наличие в алюминии примесей железа также снижает его коррозионную стойкость. Пленка оксида алюминия растворяется в щелочах и сильных неокисляющих кислотах с выделением водорода. Хлориды также разрушают пленку оксида алюминия.

Наряду со стойкостью алюминия в атмосферных условиях и в некоторых коррозионных средах, востребованы и другие его свойства для функциональных покрытий, такие как электропроводность, декоративность, светоотражательная способность, термостойкость. После анодного оксидирования повышается износостойкость, покрытия становятся электроизоляционными и возможно их применение в качестве подслоя под металлические и лакокрасочные покрытия. Применение алюминиевых покрытий не оказывает вредного воздействия на живые организмы и окружающую среду.

Возможности конструкционных материалов с алюминиевыми покрытиями позволяют надеяться на расширение применения деталей с такими покрытиями. Для этого необходимо изучить коррозионное поведение алюминиевых покрытий на различных подложках и выбрать наиболее оптимальные схемы покрытий на алюминиевой основе.

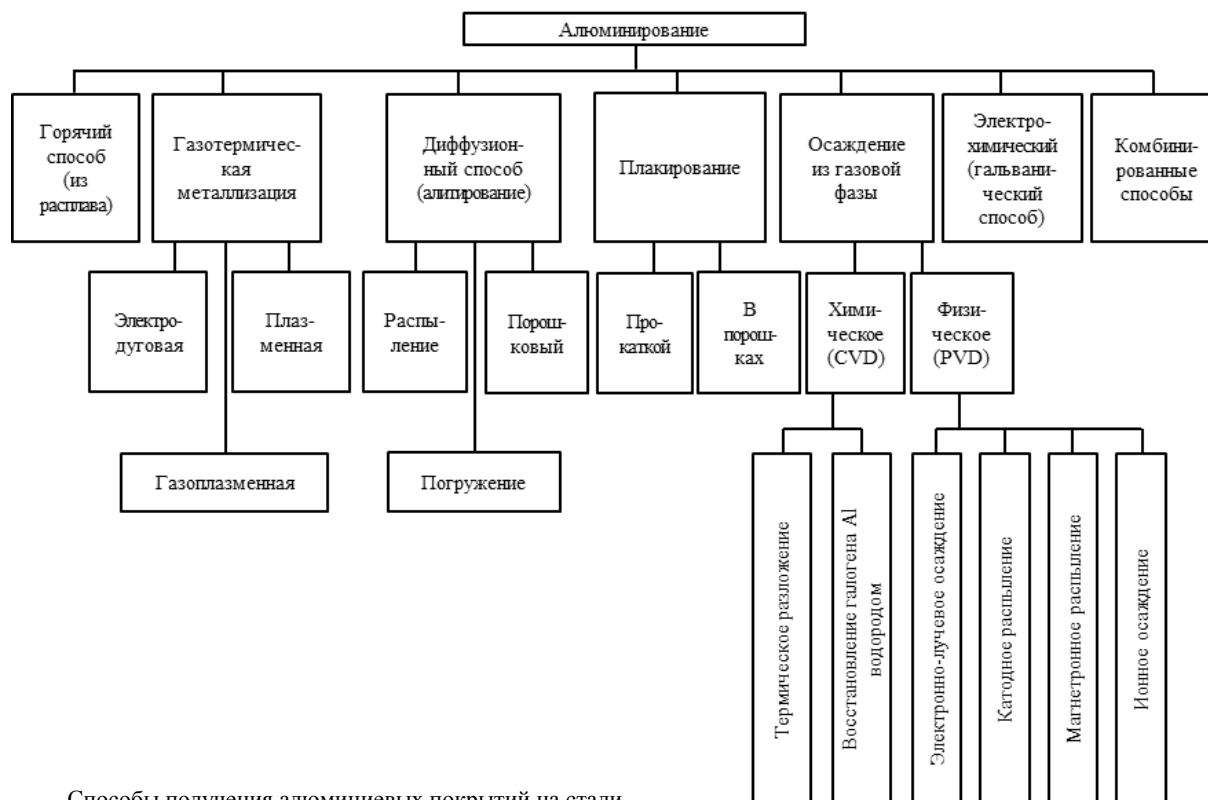
Способы получения алюминиевых покрытий

Алюминий в качестве покрытия наносят на сталь для повышения ее коррозионной стойкости и стойкости против окалинаобразования [3]. На рисунке показаны основные способы нанесения покрытий из алюминия на сталь.

Горячий способ

Алюминиевые покрытия на стали получают горячим способом. Для этого в ванну с расплавом алюминия погружают подготовленные стальные изделия. В расплав алюминия добавляют кремний, чтобы затруднить образование слоя хрупкого металла. Полученные из расплава покрытия используют для повышения устойчивости стальных изделий к окислению при умеренных температурах (до 480°C). При еще более высоких температурах покрытия становятся огнеупорными, но сохраняют защитные свойства до 680°C [4, 5]. Отмечено, что алюминиевые покрытия имеют непостоянные эксплуатационные характеристики в разных средах.

Горячее алюминирование применяют для получения покрытий на стальных листах и лентах, которые используются для изготовления труб и глушителей двигателей внутреннего сгорания, газовых и воздушных теплообменников, противопожарных устройств, облицовки печей и т. д. [6]. В работе [7] показано, что горячее алюминирование эффективно защищает стальные изделия в строительстве и судовых конструкциях, трубы, используемые в промышленной атмосфере сероводорода, для транспортировки водяного пара и



Способы получения алюминиевых покрытий на стали

горячей воды. При толщине покрытия 50–120 мкм срок службы покрытия может составлять 35–50 лет в зависимости от условий эксплуатации. Предложена замена высоколегированной стали на низколегированную, имеющую горячее алюминиевое покрытие. Горячие алюминиевые покрытия имеют бóльшую стоимость, чем горячие цинковые. Само получение горячих покрытий энергоемко и требует дорогостоящего технологического оборудования.

Газотермический способ нанесения алюминиевых покрытий

Газотермическое нанесение покрытий заключается в нагреве распыляемого материала до температуры плавления, образовании потока, переносе этим потоком напыляемого материала и формировании покрытия на поверхности изделия [8]. К группе этого метода относятся: электродуговая металлизация, газоплазменное напыление, плазменное напыление. Отличительными чертами газотермических методов являются:

- высокая производительность;
- технологическая простота и гибкость;
- возможность нанесения покрытий различной толщины с широким спектром свойств.

Электродуговая и газоплазменная металлизации отличаются друг от друга методом расплавления металла. Для плазменной металлизации необходим плазмотрон. Существует разновидность плазменной металлизации – вакуумная. Способ позволяет получать значительные по толщине

покрытия (80–200 мкм) на больших по габаритам стальных изделиях.

Установлена способность алюминиевого покрытия на стальных трубах нефтепроводов протекторно защищать основной металл, при этом срок эксплуатации таких труб увеличивается в 3 раза по сравнению с трубами без покрытия. Покрытие алюминием шибера задвижек и штока насосов с анодной оксидацией увеличило ресурс этих деталей в 6 раз по сравнению с деталями без покрытий. Однако в большинстве случаев на алюминиевые покрытия, полученные металлизацией, необходимо наносить лакокрасочные покрытия [4].

Недостатки электродугового метода – высокая яркость излучения, большой уровень шума, значительная пористость покрытия, недостаточная адгезия. Покрытия, полученные плазменной металлизацией, имеют пористую (5–9%), слоистую структуру [8].

Алюминиевые покрытия, полученные электродуговой и газоплазменной металлизацией, применяются для стальных конструкций различного назначения на химических предприятиях, в портах, мостах и т. д., используются при изготовлении оболочковых форм.

Плазменные алюминиевые покрытия применяются как термостойкие покрытия на лопатках газовых турбин, деталях шасси, камерах сгорания двигателей, в атомной энергетике – для улучшения теплообмена, защите от коррозии в водной среде [9, 10].

Диффузионный способ (алитирование)

Диффузионный способ получения алюминиевого покрытия (алитирование) – это процесс, который обеспечивает на стальных поверхностях получение твердых растворов алюминия в железе, предотвращающих окалинообразование при температурах до 950°C. Классифицированы три метода алитирования [6]:

- алитирование распылением;
- порошковое алитирование;
- алитирование погружением.

Процесс *алитирования распылением* заключается в том, что детали с алюминиевыми покрытиями, полученные методами газотермической металлизации, подвергают диффузионному отжигу при 850–1000°C в течение максимум 5 ч [11]. Отжиг проводится под защитой покрытия из жидкого стекла или в атмосфере инертного газа. Толщина образующегося интерметаллидного слоя составляет минимум 0,3 мм.

Такой способ применяется для защиты деталей, контактирующих с открытым пламенем (колосниковые решетки, пароперегреватели, дымоотводные системы и элементы промышленных печей). Защита стальной поверхности от окалины эффективна при температуре 600–800°C.

При *порошковом алитировании* (или нанесении покрытий с использованием алюминиевого порошка) стальные изделия укладывают вместе с порошкообразной смесью (40% алюминия + 60% оксида алюминия) в герметичные короба и отжигают в этих коробах при 950–1050°C в течение 4–20 ч. Окалиностойкость изделий с таким покрытием сохраняется до 950°C.

Известен способ алитирования стальных изделий при отжиге в смеси алюминиевого порошка и хлорида алюминия.

При *алитировании погружением* стальные детали предварительно обезжиривают и подвергают травлению, затем выдерживают 3–6 мин в расплаве алюминия при температуре 675–900°C. После этого проводится диффузионный отжиг при температуре 950–1050°C в течение 4–20 ч. Изделия, алитированные таким способом, сохраняют окалиностойкость до 950°C, при этом изделия приобретают высокую коррозионную стойкость в среде серосодержащих газов.

Процессы алитирования энергоемки, при этом возможно коробление деталей, поэтому применяются в сравнительно небольшом масштабе.

Плакирование

Плакировать сталь алюминием можно двумя методами – прокаткой или с помощью алюминиевого порошка.

При *плакировании прокаткой* стальную ленту (толщина 2–5 мм) и тонкую алюминиевую ленту (толщина ~0,2 мм) накладывают одну на другую и подвергают совместной обработке прокаткой с обжатием 25–60%. Обжатие при холодной про-

катке обеспечивает повышение температуры пакета до 100–250°C, что вполне достаточно для получения биметалла (холодная сварка давлением). Полученную биметаллическую заготовку без промежуточного отжига прокатывают до требуемой толщины. В качестве плакирующего материала используют чистый алюминий. Алюминиевое покрытие может быть нанесено на одну или на обе поверхности ленты. Толщина покрытия на одной стороне обычно составляет 5–10% от общей толщины биметаллической ленты.

Плакировать сталь можно с помощью *алюминиевого порошка*. Этот метод используют для защиты от коррозии стальной проволоки. Толщина плакированного слоя составляет 10–20% от общего диаметра проволоки. Плакированная проволока используется как проводник для открытых линий электропередач.

Для сплава Д16-Т наиболее эффективным плакировочным материалом оказался сплав АД35 с небольшой добавкой цинка; а для сплава 1420 – алюминиевый сплав с добавкой 1,2% Zn+0,11% Zr [12].

Осаждение из газовой фазы

Химическое осаждение из газовой фазы

Метод химического осаждения из газовой (паровой) фазы (CVD) различных металлсодержащих соединений основан на химической реакции, протекающей на поверхности или вблизи нее с дальнейшим формированием покрытия из атомарных или кластерных образований [13]. При получении алюминиевых покрытий этим способом используют реакции разложения (например, термического) и реакции восстановления галогенида алюминия водородом (иногда в присутствии инертного газа).

Известна технология нанесения алюминиевого покрытия из газовой фазы [14] на лопатки газовых турбин, изготовленных из никелевых сплавов. По этой технологии алюминиевое покрытие наносили диффузионным способом по подслою гальванической платины с последующим отжигом. Новая технология позволила сократить время нанесения покрытия наполовину, при этом на наружных и внутренних поверхностях лопаток получены относительно равномерные по толщине слои алюминиевого покрытия.

Известен метод нанесения алюминиевого покрытия из смеси испаряемого хлорида алюминия и аргона. При пропуске такой газовой смеси над холодной поверхностью подложки на ней осаждается металлический алюминий. Осаждение алюминиевых слоев из газовой фазы жидких алюмоорганических соединений изучено в работе [15]. Для этого в основном использовали следующие алкилы алюминия: триизобутилалюминий (ТИБА), диизобутилалюминийгидрид (ДИБАГ), триэтилалюминий (ТЭА) [16].

Как правило, процессы получения алюминиевых покрытий из этих алюмоорганических соеди-

нений проводят при пониженном давлении (1 мм рт. ст. (133,3 Па)). При этом осажденные слои алюминия по составу соответствуют технически чистому алюминию (примесь: 0,5% углерода). Недостаток способа – необходимость нагрева покрываемого изделия до температуры разложения алюмосодержащего соединения.

Кроме того, алюмоорганические соединения пиррофорны, активно взаимодействуют с кислородом воздуха и водой. Поэтому работы с этими соединениями необходимо проводить под вакуумом или в среде инертных газов.

Достоинство способа – возможность нанесения равномерных по толщине покрытий на изделия сложной конфигурации. Способ металлоосаждения CVD отличается высокой производительностью (до 25 мкм в час) и экономичностью в отличие от способов физического осаждения из газовой фазы.

Физическое осаждение из газовой фазы

Способ физического осаждения из газовой фазы (PVD-процесс) называют также способом нанесения покрытия с помощью вакуумного испарения или вакуумным напылением. Этот способ основан на испарении чистого металла в вакууме и последующей его конденсации на поверхности изделия. Для испарения алюминия применяют различные методы: испарение за счет электросопротивления, электронным лучом, путем катодного и магнетронного осаждения. Этим способом обеспечивают непрерывное нанесение алюминиевого покрытия на ленты из металлов и неметаллов, при этом толщина покрытия составляет 0,1–3,5 мкм (иногда – до 10 мкм) и зависит от длительности процесса. Таким образом алюминировать пленку для изготовления электрических конденсаторов, получают блестящую отражающую поверхность на пластмассовых рефлекторах осветительных устройств различного назначения. Вакуумное напыление алюминиевых покрытий широко используется в точной механике и оптике, электронике, для декоративной отделки изделий.

Коррозионная стойкость стали с напыленным в вакууме алюминиевым покрытием в 10 раз больше коррозионной стойкости этой же стали с гальваническим цинковым и горячецинковым покрытием. Известно о разработке отечественной технологии нанесения алюминиевого покрытия на стали магнетронным распылением. Для противокоррозионной защиты металлических деталей авиационных и космических аппаратов возможно применение алюминиевых покрытий, полученных ионно-плазменным напылением. Установка для получения покрытия данным способом описана в работе [17]. Процесс PVD отличается от способа CVD тем, что не требуется разогрев подложки, нет необходимости применять химически активные вещества. Но оборудование для процесса PVD сложнее оборудования, используемого для

способа CVD, и сам процесс проводится в глубоком вакууме при 10^{-4} – 10^{-6} мм рт. ст. ($1,33 \cdot (10^{-6}$ – $10^{-8})$ Па).

Гальваническое алюминирование

Процесс электрохимического осаждения алюминия получил практическое применение для защиты изделий из стали, титана, других металлов и сплавов. Для этого используются только безводные электролиты: эфирно-гидридные, алкилбензолные и металлорганические [18]. Электролитическое восстановление алюмоорганических соединений для получения покрытий высокой чистоты описано в работе [13]. Полученные покрытия отличаются высокой чистотой (99,99%), по своим физико-механическим свойствам близки к электрометаллургическим маркам алюминия.

Физико-химические свойства электролитических алюминиевых покрытий зависят от режимов электролиза [19]. Микротвердость покрытия соответствует твердости чистого алюминия, количество углерода в покрытии незначительно (0,005%). Установлена зависимость пористости от толщины покрытия, минимальная пористость достигнута при толщине ~10 мкм. Алюминиевые покрытия, полученные электроосаждением, имеют незначительные внутренние напряжения, высокую электропроводность.

По износостойкости алюминиевые покрытия близки к кадмиевым, но значительно уступают никелевым. Учитывая высокую коррозионную стойкость и другие функциональные характеристики алюминиевых покрытий, меньшую экологическую опасность, рекомендовано использование гальванических алюминиевых покрытий в авиационной промышленности.

Компания Siemens разработала технологию Sigal[®] для гальванического алюминирования стальных изделий с целью улучшения антикоррозионных качеств и декоративных свойств.

Алюминиевое покрытие наносят из апротонного электролита по никелевому подслою. Алюминиевое покрытие может быть дополнительно подвергнуто хроматированию или анодному оксидированию. Крепежные изделия из стали с гальваническим алюминиевым покрытием пригодны для соединения алюминиевых, оцинкованных либо покрытых алюминием деталей. Гальваническое алюминирование по процессу Sigal[®] не наводороживает стальную подложку, т. е. пригодно для покрытия высокопрочных сталей. Компания Siemens на основе этой технологии изготавливает зеркала высокого оптического качества.

Вместе с тем в работе [20] отмечено, что алюминиевые покрытия теряют свои защитные свойства при их повреждении до подложки.

Кроме всего прочего, в силу пирофорности электролитов для получения гальванических алюминиевых покрытий, эти процессы требуют применения специальных ванн, защищенных от кис-

лорода атмосферы [21]. Тем не менее ряд фирм серийно изготавливает установки для получения алюминиевых покрытий гальваническим способом [22].

Комбинированные способы получения покрытий на основе алюминия

Комбинированные способы получения покрытий на основе алюминия можно разделить на три группы:

- покрытие сплавами на основе алюминия;
- многослойные покрытия с алюминиевым слоем [23];
- поверхностная обработка алюминиевого покрытия (химическое оксидирование, анодное оксидирование).

Наносят эти комбинированные покрытия способами, рассмотренными ранее. В работе [4] отмечена высокая стойкость в морской и промышленной атмосфере стальных деталей, покрытых сплавом системы алюминий–цинк горячим способом. Известно покрытие на стали из алюминиевого сплава с хромом и одним или несколькими элементами группы железа (никель, железо или кобальт), нанесенное с помощью методов физического осаждения из паровой фазы.

Методом вакуумно-плазменной металлизации на лопатки газовых турбин наносится покрытие из сплава алюминия, хрома, иттрия [24, 25]. Известно о применении в качестве покрытия на стали алюминиевого сплава, содержащего хром, титан, магний, олово; покрытия на основе сплава системы алюминий–титан осаждаются методом CVD или ионно-плазменной обработкой [26–28]. Магнетронным распылением наносится упрочняющее покрытие системы Ti–Al–N на металлорежущий инструмент из твердых сплавов [29].

Известен также способ нанесения алюминиевого покрытия на сталь через хромовый подслоя толщиной 0,005–0,05 мкм, полученный гальваническим способом или вакуумным напылением.

Алюминиевое покрытие наносится на хромовый подслоя напылением в вакууме. Предложено также формировать покрытия на основе алюминия на стальной поверхности через хромовый подслоя. Оба слоя осаждаются PVD способом.

В патентах предложено плакировать листовую сталь алюминием или сплавом алюминия, нанося предварительно подслоя гальванического или химического никеля. Горячеоцинкованные стальные полосы плакируют сплавом системы алюми-

ний–марганец, который затем хромируют или оксидируют. Стальные полосы с таким покрытием применяют для изготовления автомобильных деталей, строительных конструкций.

На стали также предлагается осаждение алюминиевого покрытия с подслоем кремния, полученным вакуумным напылением с применением медного подслоя.

В 1972 г. в НИИ Химии при Горьковском государственном университете разработали методику получения комбинированного покрытия, состоящего из чередующихся слоев пиролитического хрома и пиролитического алюминия.

Для повышения защитных свойств и функциональных характеристик алюминиевых покрытий и покрытий на основе алюминия используются традиционные методы обработки поверхности алюминия: анодное оксидирование, химическое оксидирование, различные виды наполнения оксидной пленки.

Известно об анодном и микродуговом оксидировании алюминиевого покрытия, полученного электролитическим способом.

Способ электролитического алюминирования Sigal® предусматривает операцию хромирования или анодного оксидирования. В последнем случае микротвердость покрытия достигает 500–600 HV вместо 21 HV у чистого алюминия.

Обсуждение и заключения

Многообразие способов получения алюминиевых покрытий свидетельствует о значительном интересе к их использованию для защиты от коррозии стальных изделий. Источник [19] сообщает, что алюминиевые покрытия и покрытия алюминиевыми сплавами могут быть использованы взамен электролитических кадмиевых покрытий. При применении алюминиевых покрытий вполне можно заменить нержавеющие стали на углеродистые в определенных коррозионных и атмосферных средах. В работах [20, 30] показано, что алюминиевые покрытия теряют свои защитные свойства при их повреждении и тогда, когда покрытие пористое. Это объясняется контактной коррозией между металлами подложки и покрытия (пара «сталь–алюминий»). Поэтому для разработки системы покрытия на основе алюминия необходимо исследование коррозионного поведения этой пары в разных климатических и коррозионных средах, а также подбор переходных слоев (подслоев) между покрытием и подложкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
2. Бахвалов Г.Т. Защита металлов от коррозии. М.: Металлургия. 1964. 290 с.
3. Кошелев В.Н., Губенкова О.А. Исследование защитной способности пиролитических алюминиевых покрытий на стали 30ХГСА //Авиационные материалы и технологии. 2009. №1. С. 6–10.
4. Улиг Г.Г., Ревин Р.У. Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику. Л.: Химия. 1989. 456 с.

5. Каблов Е.Н. Коррозия или жизнь //Наука и жизнь. 2012. №11. С. 16–21.
6. Дриц М.Е., Райтбарг Л.Х. Алюминиевые сплавы: свойства, обработка, применение. М.: Металлургия. 1979. 678 с.
7. Пересыпкин В.И. Прочность корпуса морских судов и защита от коррозии: Сб. науч. тр. М.: Транспорт. 1990. 121 с.
8. Кудинов В.В., Иванов В.М. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий. М.: Машиностроение. 1981. 192 с.
9. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 60–71.
10. Анипченко Л.А., Костышев В.А. Теплозащитные покрытия для повышения надежности работы дизельных двигателей /В сб. докл. Международной науч.-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». В 2 ч. Самара: СГАУ. 2009. Ч. 1. С. 97–98.
11. Мубояджян С.А., Галоян А.Г. Комплексные термодиффузионные жаростойкие покрытия для безуглеродистых жаропрочных сплавов на никелевой основе //Авиационные материалы и технологии. 2012. №3. С. 25–30.
12. Синявский В.С., Семенов А.М. Оптимизация химического состава материала плакировки листов из сплава 1420 с целью защиты от коррозионных поражений //Технология легких сплавов. 2008. №2. С. 115–119.
13. Разуваев Г.А., Грибов Б.Г. и др. Металлоорганические соединения в электронике. М.: Наука. 1972. 479 с.
14. Разуваев Г.А. Применение металлоорганических соединений для получения неорганических покрытий и материалов. М.: Наука. 1986. 256 с.
15. Земсков Г.В., Артющенко Н.И. Осаждение алюминия из газовой фазы //Защита металлов. 1970. №4. С. 473–474.
16. Кошелев В.Н. Особенности технологии нанесения пиролитических алюминиевых покрытий //Авиационные материалы и технологии. 2009. №2. С. 10–14.
17. Плихунов В.В., Петров Л.М. и др. Оборудование, технологии и методы контроля для осуществления комплексного подхода к формированию многофункциональных покрытий и модифицированных слоев методом вакуумной ионно-плазменной обработки /В сб. докл. VIII науч. конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон–2010». М.: ЦАГИ. 2010. С. 188–193.
18. Шлугер М.А. Гальванические покрытия в машиностроении: Справочник. М.: Машиностроение. 1985. 248 с.
19. Симанавичус Л.Э., Карнавичус А.П. Электроосаждение алюминия из о-, м-, п-силольных растворов $AlBr_3$ и некоторые свойства покрытий //Труды АН ЛитССР. Сер. Б. 1971. Т. 1(64). С. 83–93.
20. Ersatz für Cadmiumueberzuge in der Luftfahrt //Galvanotechnik. 1991. 82. №5. P. 1559.
21. Шавкунов С.П., Чернышев В.Е. Исследование электрохимических превращений в ортокислольном электролите алюминирования и влияние следов воды на эти процессы //Вестник Пермского университета. Сер. «Химия». 2011. №3. С. 39–46.
22. Fischer I. Fortschritte bei der Verfahrenstechnik der galvanischen Aluminierung //Galvanotechnik. 1997. V. 88. №6. P. 1852.
23. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С. и др. Защитные и упрочняющие ионно-плазменные покрытия для лопаток и других ответственных деталей компрессора ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 71–81.
24. Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Гаямов А.М. и др. Получение керамических теплозащитных покрытий для рабочих лопаток турбин авиационных ГТД магнетронным методом //Авиационные материалы и технологии. 2012. №4. С. 3–8.
25. Богданович В.И., Докукина И.А. и др. Теплозащитные плазменные покрытия деталей двигателей /В сб. докл. Международной науч.-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». В 2 ч. Самара: СГАУ. 2009. Ч. 1. С. 49–50.
26. Плихунов В.В., Петров Л.М. и др. Комбинированная вакуумная ионно-плазменная обработка поверхности конструкционных металлических материалов /В сб. докл. VIII науч. конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон–2010». М.: ЦАГИ. 2010. С. 194–198.
27. Мигранов М.Ш., Шустер Л.Ш. Применение инструментальных нанокристаллических покрытий для интенсификации металлообработки деталей ГТД /В сб. докл. Международной науч.-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». В 2 ч. Самара: СГАУ. 2009. Ч. 2. С. 122–123.
28. Белоус В.Я., Варламова В.Е. и др. Ионно-плазменные покрытия для защиты от коррозии компрессорных лопаток и других деталей ГТД, эксплуатирующихся во всеклиматических условиях //Коррозия: материалы, защита. 2012. №1. С. 20–24.
29. Замалетдинов И.И., Сметкин А.А. и др. Влияние состояния поверхности стали 20Х3МВФ-Ш на коррозионные свойства нанопокртия $TiAlN$, нанесенного методом магнетронного распыления //Коррозия: материалы, защита. 2013. №3. С. 34–41.
30. Красноярский В.В., Мазин В.А. и др. Пористость и защитное действие алюминиевых гальванических покрытий //Защита металлов. 1992. Т. 28. №1. С. 125–128.