

УДК 621.793

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВЫХ ПОКРЫТИЙ, НАНЕСЕННЫХ МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ*

Л.И. ТУШИНСКИЙ¹, А.П. АЛХИМОВ², В.Ф. КОСАРЕВ², А.В. ПЛОХОВ¹,
Н.С. МОЧАЛИНА¹

¹Новосибирский государственный технический университет

²Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

Исследована структура и свойства алюминиевых покрытий, нанесенных методом холодного газодинамического напыления (ХГН). Принципиальное отличие алюминиевых ХГН покрытий от газотермических заключается в возможности образования прочного слоя металлических частиц на подложке в условиях пониженного теплового воздействия, то есть при температуре ≤ 500 К. Установлено, что формируется достаточно плотное, малопористое покрытие, прочно сцепленное с основным металлом. Показано, что адгезионная прочность слабо зависит от толщины покрытия, так как в поверхностных слоях образуются сжимающие напряжения. Предложена качественная модель формирования покрытий.

ВВЕДЕНИЕ

Знание закономерностей формирования покрытий и зависимости их свойств от параметров газопорошкового потока, набегающего на обрабатываемую поверхность, позволяет создавать прогнозируемые композиции — покрытие–основа. Ранее [1–3] были исследованы закономерности формирования покрытий, наносимых холодным газодинамическим напылением, в зависимости от основных физических параметров сверхзвукового двухфазного потока: скорость, размер, плотность материала и концентрация частиц, скорость и температура газа, угол натекания газопорошковой струи и т. д. В данной работе приведены результаты, отражающие зависимость основных свойств алюминиевых покрытий, сформированных на образцах из стали, от определяющих технологических параметров, таких как дистанция напыления, давление и температура рабочего газа в форкамере соплового узла.

УСТАНОВКА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Алюминиевое покрытие из порошка АСД-1 напыляли при различных режимах (при угле напыления 90°) на лабораторной установке [1, 2]. Подложки — пластины из стали марки Ст 3 толщиной 2 мм перед напылением обезжировали и подвергали иглофрезерной обработке. Частицы порошка имели форму, близкую к сферической. Прочность сцепления покрытия с основным металлом (адгезию) и когезионную прочность оценивали на приборе Эриксона по глубине вдавливания h_{in}

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 03-02-16329, № 05-07-90172).

сферического индентора диаметром 10 мм (метод стандартизирован в Японии). О когезии судили по появлению первой трещины на наружной поверхности покрытия, об адгезии — по моменту отслоения покрытия от подложки [3, 4].

Прочность сцепления покрытия с основным металлом определяли также на образцах с кольцевой формой штифта [5]. На таких образцах, по сравнению с круглой формой штифта, значительно увеличивается вероятность отделения штифта по схеме чистый отрыв, кроме того, за счет усреднения по большей площади контакта уменьшается разброс данных.

Пористость покрытия оценивали точечным методом Глаголева [3] на поперечных нетравленных шлифах по соотношению количества точек, попавших на поры и на материал покрытия.

Остаточные напряжения покрытия измеряли механическим методом после нанесения покрытия толщиной $\delta_c = 100\text{--}400$ мкм на пластину толщиной 1,5 мм, изготовленную из рессорно-пружинной стали марки 60С2А. Замеряли радиус кривизны пластины с нанесенным покрытием и подсчитывали средние значения остаточных напряжений [4].

Структуру покрытия исследовали на поперечных шлифах, обработанных травителем состава: 0,5 мл 40 %-й HF + 100 мл H₂O.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследовали влияние на прочность соединения покрытия с основным металлом, структуру покрытия и строение границы основной металл–покрытие трех наиболее важных технологических параметров напыления: дистанции напыления, давления и температуры рабочего газа в форкамере соплового узла установки.

Дистанция напыления — легко регулируемый технологический параметр. В то же время в процессе напыления этот параметр изменяется из-за неровностей основного металла, технологических нарушений, отклонений стационарности режима. Поэтому важно определить оптимальную дистанцию напыления и пределы ее изменения, при которых свойства получаемых покрытий удовлетворяют необходимым требованиям. При постоянном давлении в форкамере 1,5 МПа и одинаковой температуре подогрева газа — 100 °С оценивали изменения в структуре и свойствах покрытий в зависимости от дистанции напыления — 5, 15, 40 мм.

На рис. 1 представлены графики зависимостей адгезионной (область 1) и когезионной (область 2) прочностей для разных толщин покрытия δ_c от дистанции напыления l_s .

Несмотря на значительные различия в толщине покрытия, образование первой трещины (когезия) и отслоение покрытия от основного металла (адгезия) однозначно зависят от дистанции напыления. Уменьшение дистанции напыления от 40 до 5 мм сопровождается ростом как адгезионной, так и когезионной прочности.

На рис. 2 в качестве примера показана структура покрытия, нанесенного при дистанции напыления 5 мм.

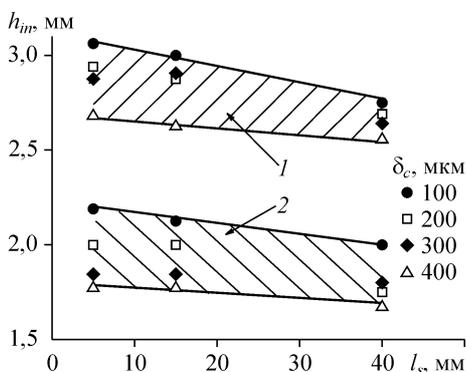


Рис. 1. Влияние дистанции напыления на адгезионную и когезионную прочности для разных толщин покрытия.

h_m — глубина вдавливания сферического индентора диаметром 10 мм, при которой появляется первая трещина (когезия) или отслаивается покрытие (адгезия). Области адгезии (1), когезии (2).

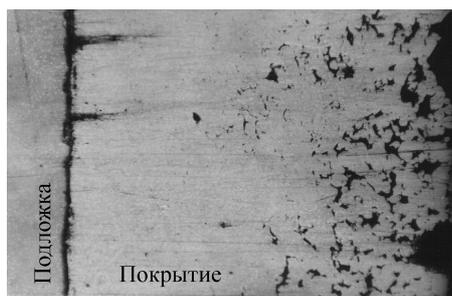


Рис. 2. Структура нетравленного алюминиевого покрытия, нанесенного методом ХГН при дистанции напыления 5 мм, $\times 150$.

Пористость у образцов при малой дистанции напыления меньше, а структура границы основной металл–покрытие более благоприятна с точки зрения прилегания и монолитности композиции. На некоторых участках у образцов с

дистанцией напыления 40 мм граница менее качественная — покрытие неплотно прилегает к основному металлу. Вместе с тем даже у образцов, напыленных на максимальной дистанции, в основном граница удовлетворительная, прочность соединения достаточно высока, а пористость не превышает 10–12 %.

Для оценки оптимального давления торможения его варьировали в пределах — 0,5–1,5 МПа. Исследовалась зависимость адгезионно-когезионной прочности и структуры при температуре подогрева газа — 100 °С и дистанции напыления 15 мм.

Из рис. 3 следует, что в исследованном диапазоне изменения давления торможения его повышение приводит к росту адгезионной прочности. При максимальном давлении (1,5 МПа) адгезия и когезия максимальны, а структура покрытия наиболее качественна. На границе практически отсутствуют несплошности, общая пористость составляет 4–6 %, поры мелкие, вытянутые. По высоте покрытия в этом случае наблюдается различие в значениях пористости — у границы контакта покрытие более плотное. Это, вероятно, связано с эффектом холодного динамического прессования [6, 7].

Однозначного влияния подогрева газа (в исследованном диапазоне температур) на прочность сцепления обнаружить не удалось (рис. 4).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Совместный анализ рис. 1 и 3 показывает, что толщина покрытия практически не влияет на прочность ее соединения с основным металлом. Такой вывод не типичен для большинства применяемых в настоящее время покрытий, нанесенных

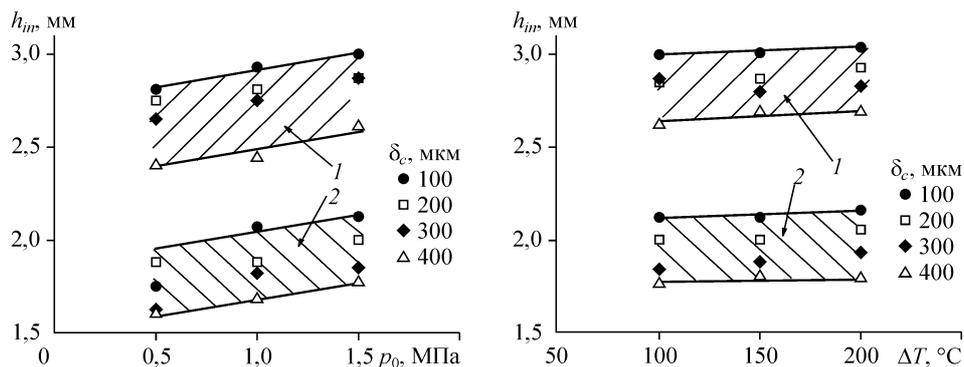


Рис. 3. Влияние давления воздуха в магистрали на адгезионную и когезионную прочность для различных толщин покрытия. (Обозначения те же, что на рис. 1).

Рис. 4. Влияние температуры подогрева частиц перед напылением на адгезионную и когезионную прочность для различных толщин покрытия. Дистанция напыления 15 мм, давление 1,5 МПа. (Обозначения те же, что на рис. 1).

различными методами [3, 6]. У детонационных, плазменных и газопламенных покрытий рост толщины сопровождается падением прочности соединения с основой.

В конечном счете, адгезия при прочих равных условиях определяется уровнем, знаком и распределением остаточных напряжений [8]. Установлено, что при увеличении толщины покрытий наблюдается рост внутренних напряжений сжатия от 48 МПа (толщина 200 мкм) до 63 МПа (толщина 400 мкм).

Вероятнее всего у покрытий, при исследуемых технологических параметрах напыления, превалируют благоприятные напряжения сжатия. Действительно, кристаллизация жидких частиц на холодной подложке, характерная для газотермических покрытий, сопровождается усадкой покрытия, возникновением и ростом растягивающих напряжений и, в конечном счете, уменьшением прочности соединения покрытия с основой. Иная картина наблюдается при нанесении газодинамического покрытия по предлагаемой технологии.

Во-первых, частицы в процессе ускорения не переходят в расплавленное состояние, а остаются твердыми до момента контактирования с подложкой. Усадка, характерная для большинства покрытий, не наблюдается. Во-вторых, подготовка поверхности иглофрезированием сопровождается повышением температуры основы до уровня, сопоставимого с температурой подогрева частиц. А поскольку напыление следует непосредственно после иглофрезирования, то значительного градиента температур в системе основной металл–покрытие не наблюдается. В-третьих, как показывают металлографические исследования, частицы алюминия сильно деформируются, что сопровождается наклепом и возникновением дополнительных напряжений сжатия. Иными словами, газодинамический метод приводит к эффектам, аналогичным поверхностному пластическому деформированию.

Сформированные внутренние напряжения сжатия определяют достаточно высокую адгезию, практически не зависящую от толщины покрытия. Так, при толщине покрытия 200 мкм прочность сцепления, измеренная штифтовым методом с кольцевой формой штифта, составляет 48 МПа, а при 400 мкм соответственно 52 МПа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, к несомненному достоинству газодинамического метода можно отнести достаточно высокие значения прочности сцепления сравнительно толстых (до 400 мкм) покрытий.

Анализ структуры границы основной металл–покрытие позволяет предположить, что соединение обеспечивается за счет физико-химического и механического взаимодействия. Кроме того, в зоне контакта вполне вероятно образование диффузионных слоев, интерметаллидов, железоалюминиевой шпинели. Однако независимо от этого, важно создать развитую шероховатую поверхность основы, обеспечивающую, за счет увеличения площади контакта подложка–покрытие, эффективное механическое зацепление частиц покрытия и рост адгезии.

Структура газодинамического алюминиевого покрытия при всех вариантах нанесения отличается от аналогичного металлизационного, рассмотренного, например, в работе [4]. Во-первых, отсутствует слоистость, столь характерная для металлизационных покрытий. В газодинамическом методе частицы плотно вбиты в промежутки между “соседями” и полностью заполняют имеющиеся полости. Отсутствуют также признаки завихренности частиц (см. рис. 2), типичные для металлизации. Во-вторых, в структуре практически отсутствуют хрупкие оксидные пленки, образующиеся при взаимодействии расплавленного алюминия с кислородом

воздуха в плазменной струе или электродуговом разряде. Частицы в рассматриваемом методе не расплавляются и, следовательно, дополнительных оксидов не образуют. В-третьих, пористость газодинамического покрытия, нанесенного при оптимальных параметрах, меньше, чем пористость металлизационных аналогов. И, что весьма важно для повышения защитных (антикоррозионных) свойств, отсутствует сквозная (открытая) пористость, характерная для газотермических методов и связанная с газовыделениями при кристаллизации в газотермических методах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алхимов А.П., Косарев В.Ф., Папырин А.Н. Методы “холодного” газодинамического напыления // Докл. АН СССР. — 1990. — Т. 315, № 5. — С. 1062–1065.
2. Папырин А.Н., Алхимов А.П., Косарев В.Ф., Плохов А.В. и др. Разработка технологии и создание установки для нанесения антикоррозионных покрытий на трубы методом газодинамического напыления // Новые системы покрытий из цинка и его сплавов с алюминием для защиты металлопроката и труб. — Днепропетровск, НПО ВНИТИ, 1990. — С. 14–21.
3. Тушинский Л.И., Плохов А.В., Токарев А.О., Синдеев В.И. Методы исследования материалов // Структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий. — М.: Мир, 2004. — 384 с.
4. Хасуй А. Техника напыления. — М.: Машиностроение, 1975. — 236 с.
5. Рогожин В.М., Смирнов Д.В., Ветров В.Я. Определение адгезионной прочности газотермических покрытий // Порошковая металлургия. — 1982. — № 7. — С. 87–91.
6. Тушинский Л.И., Синдеев В.И., Плохов А.В. Структура и механические свойства модифицированных поверхностей машиностроительных материалов. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1996. — 193 с.
7. Алхимов А.П., Косарев В.Ф., Плохов А.В., Тушинский Л.И. и др. Новые материалы и технологии. Теория и практика упрочнения в экстремальных процессах / Отв. ред. М.Ф. Жуков, В.Е. Панин. — Новосибирск: ВО Наука, 1992. — 200 с.
8. Tushinsky L., Kovensky I., Plokhov A., Sindeyev V., Reshedko P. Coated metal. Structure and properties of metal — coating compositions. — Berlin, New York: Springer, 2002. — 460 p.

Статья поступила в редакцию 18 октября 2005 г.