

ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

УДК 620.179.4:621.793

В.Е. Архипов, А.Ф. Лондарский, Г.В. Москвитин, М.С. Пугачев, Н.С. Фалалеев
(Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва)
E-mail: pugachevmax@mail.ru

Свойства двухкомпонентного покрытия, нанесенного газодинамическим напылением*

Приводятся результаты исследования структуры и свойств двухкомпонентного покрытия, нанесенного с использованием смеси частиц алюминия и цинка методом "холодного" газодинамического напыления. Предложена математическая модель, позволяющая оценить распределение температуры покрытия по толщине. Установлен механизм формирования в покрытии областей алюминия с высоким содержанием цинка.

Ключевые слова: газодинамическое напыление, частицы корунда, твердость покрытия, покрытие меди, покрытие алюминия, покрытие цинка, структура покрытия.

Results of research structure and properties two-component covering of the aluminum applied with use of mix particles and zinc by method a "cold" gasdynamic dusting are given in article. The mathematical model allowing to estimate distribution of temperature covering on thickness is offered. The formation mechanism in a covering of areas aluminum with the high content of zinc is installed.

Keywords: gasdynamic dusting, corundum particles, covering hardness, copper covering, aluminum covering, zinc covering, structure of covering.

Покрытия цинка и алюминия широко применяют как средство защиты материалов деталей, изделий и конструкций от воздействия коррозионной среды. Для нанесения покрытия используют газотермические методы напыления, погружение в расплав металла, химические и физические процессы. Детали, изделия и конструкции с покрытиями алюминия и цинка широко используются в судостроении, химическом аппарато-строении, строительстве и, в частности, при сооружении платформ для добычи углеводородов на морском шельфе.

Газодинамическое напыление (ГДН) может составить конкуренцию традиционным методам нанесения покрытий и расширить области своего применения, так как имеет ряд существенных технологических и экологических преимуществ. Его можно использовать в производственных и полевых условиях, так как качество покрытия не зависит от воздействия внешней среды (температура, влажность). Наносятся покрытия на основе никеля, меди, алюминия,

цинка или их сочетания шириной от 6 мм и толщиной до 1 мм и более. Мелкодисперсные порошки металлов не нагреваются выше 70 °С, и поэтому их физико-механические характеристики не изменяются. В процессе напыления разогрев деталей, изделий и конструкций не превышает 120...140 °С, благодаря чему геометрия и механические характеристики сохраняются. Данное преимущество позволяет наносить покрытия на тонкостенные изделия, изготовленные из металлов, имеющих низкую температуру плавления, например алюминия и его сплавов. Этот метод на предприятиях используют для восстановления геометрических размеров изделий, включая узлы трения скольжения, для придания поверхности защитных свойств при воздействии коррозионной и коррозивно-абразивной среды, герметизации соединений, работающих при низкой и высокой температурах и т. д. [1, 2]. Сравнительные испытания на сопротивление коррозии в среде слабого электролита (3 % NaCl) низкоуглеродистой стали с покрытием цинка, нанесенным ГДН и погружением в расплав, показали, что скорость коррозии при использовании метода ГДН в 1,5 раза меньше [3].

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-08-00634 А.

Цель работы. При ГДН основными параметрами, которые оказывают влияние на формирование структуры и свойств покрытий, являются температура потока воздуха, время процесса и механические характеристики металлов [4]. Использование при напылении двух металлов может сопровождаться процессом диффузии или переносом некоторого объема металла частицами корунда, что может оказать влияние на свойства покрытия, например когезионную прочность. Поэтому была сделана попытка оценить температуру покрытия и возможность диффузии одного из компонентов исходя из технологических параметров процесса (температуры потока воздуха и скорости перемещения сопла относительно поверхности).

Методики, оборудование, материалы

Напыление покрытия на образцы из стали 20 осуществляли на газодинамической установке модели ДИМЕТ-404 с использованием механической смеси частичек алюминия (ГОСТ 6058—73), цинка (ГОСТ 12601—76) и оксида алюминия (ГОСТ 28818—90) в процентном соотношении (35±5): (40±5): (25±5) [2].

На образцы из стали наносили слой металла при постоянной скорости перемещения образца 0,01 м/с по отношению к потоку частиц с расстояния от среза сопла до поверхности 1 см. Для получения необходимой толщины слоя металла для проведения исследований напыление проводили при неоднократном (циклическом) перемещении сопла относительно поверхности образца.

Твердость металла покрытия измеряли методом Виккерса при нагрузке 245,2 мН на твердомере SHIMADZU HMV-2 [5]. Для получения обоснованной зависимости изменения твердости покрытия от параметров напыления измерение твердости проводили на участках поверхности, визуально свободных от частиц корунда. Для каждого режима напыления проводили не менее 11 замеров твердости покрытия.

Структуру покрытия исследовали с помощью металлографического микроскопа В-600 МЕТ при увеличении до 1500 и растрового электронного микроскопа фирмы JEOL модели JSM-6610LV в отраженных и вторичных электронах при увеличении до 5000. Количественный анализ содержания алюминия, цинка и кислорода в массовых процентах проводили по точкам, которые выбирали на участках, отличающихся цветом и оттенками цвета. Размер области инициирования характеристического излучения элементов не превышал 5 мкм.

Термическую обработку образцов после нанесения покрытия проводили в печи при температуре 480...500 °С с временем выдержки 600 с.

Оценку нагрева материала покрытия проводили

исходя из следующих характеристик процесса. Непрерывный поток нагретого до ≈ 540 °С воздуха вместе с частицами металлов и химического соединения перемещается по поверхности образца, и при этом формируется покрытие толщиной ≈ 500 мкм в форме сегмента окружности. Нагрев покрытия осуществляется узконаправленным потоком воздуха, который эффективно нагревает площадку диаметром ≤ 6 мм (ширина покрытия). При скорости перемещения потока относительно поверхности 0,01 м/с источник тепла выходит за пределы площадки ≤ 6 мм за 0,6 с. Экспериментально установлено, что минимальная толщина слоя при ГДН составляет ≈ 25 мкм, что соответствует размерам частиц металлов с учетом их деформации при соударении с подложкой и твердыми частицами корунда. Таким образом, можно модель процесса нанесения покрытия толщиной ≈ 500 мкм за 0,6 с представить как последовательное присоединение слоев металла толщиной ≈ 25 мкм, формируемых за 0,03 с, к подложке или предыдущему слою при постоянном воздействии потока воздуха с температурой 540 °С.

Расчет температуры нагрева покрытия по толщине слоя может быть представлен в виде последовательности тепломеханических процессов: прогрев частицы металла во время полета в потоке воздуха до контакта с поверхностью; дополнительный нагрев частицы при соударении с поверхностью; нагрев слоя металла под воздействием нагретого воздуха в течение 0,03 с. При этом численно решается уравнение теплопроводности для уже нанесенного слоя, который представляется как единое целое с усредненными свойствами алюминия и цинка, взятыми в пропорциях исходной смеси порошков. Такое усреднение оправдано тем, что размер частиц во много раз меньше характерного размера наносимого покрытия. Так как расчеты носят лишь оценочный характер, температурной зависимостью физических свойств наносимого материала пренебрегали.

Основные результаты исследований

При ГДН покрытие формируется за счет присоединения пластичных частиц металла, имеющих высокую кинетическую энергию, к подложке при соударении с ней. Твердые частицы корунда, входящие в механическую смесь, деформируют и уплотняют нанесенный металл, повышая характеристики адгезии и когезии покрытия.

Прежде чем приступить к обсуждению полученных результатов исследований двухкомпонентного покрытия алюминий — цинк, необходимо представить некоторые закономерности, полученные на однокомпонентных покрытиях с использованием порошков меди, алюминия и цинка.

Свойства однокомпонентных покрытий зависят от

технологических параметров процесса и физико-механических характеристик используемых металлов. При относительном удлинении более 50 % исходная структура металла (зерно) деформируется и наклепывается со значительным повышением твердости. Если температура напыления выше температуры рекристаллизации, то в нанесенном металле проходят процессы возврата (отдыха) и твердость покрытия снижается с увеличением времени процесса.

При напылении покрытия меди (температура рекристаллизации 180...320 °С) микродеформации снижаются с $(56,8 \pm 0,8) \cdot 10^{-4}$ до $(36,4 \pm 0,6) \cdot 10^{-4}$ при увеличении температуры нанесения покрытия с 180 до 360 °С. Дальнейшее повышение температуры напыления до 540 °С не столь значительно влияет на величину микродеформаций ($(30,2 \pm 0,6) \cdot 10^{-4}$) [5]. Результаты, показывающие наличие изменений в тонкой структуре металла при повышении температуры напыления, также были получены при измерении удельного электрического сопротивления. Термическая обработка металла покрытия в печи при температуре 750...780 °С снижает твердость на 700...800 МПа. Однако после термической обработки твердость при минимальной температуре напыления (180 °С) на 140 МПа выше, чем при максимальной температуре нанесения покрытия (540 °С), что связано с большим содержанием корунда (массовая доля алюминия 1,1 и 1,03 соответственно).

Твердость алюминия повышается до ≈ 1000 МПа при увеличении числа циклов (времени) напыления с использованием потока воздуха с температурой 180 °С (рис. 1). Повышение температуры потока воздуха до 360 °С сопровождается незначительным ростом твердости при увеличении времени процесса. Энергетические характеристики частиц (скорость) возрастают, что должно сопровождаться повышением твердости, и отсутствие ее более значительного роста обусловлено влиянием теплового потока на состояние тонкой структуры. Использование максимальной температу-

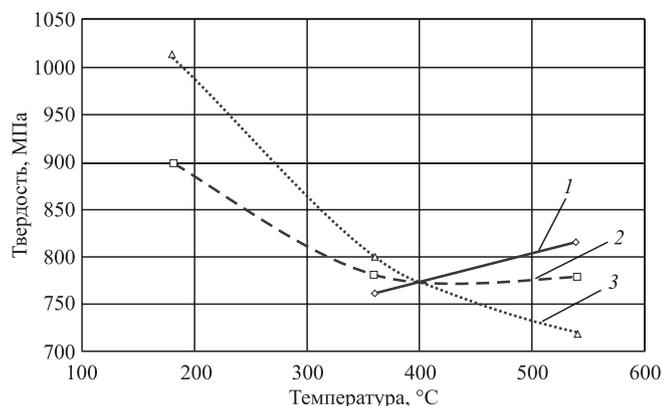


Рис. 1. Зависимость твердости алюминия от температуры и времени напыления:

1 — 1 цикл; 2 — 3 цикла; 3 — 5 циклов

ры процесса (540 °С) приводит к повышению твердости при минимальном времени процесса и ее снижению при увеличении времени нанесения покрытия (см. рис. 1). Понижение твердости алюминия при увеличении времени напыления обусловлено процессами возврата (отдыха) в нанесенном металле.

Рентгеноструктурный анализ покрытия алюминия не показал изменения микродеформаций при повышении температуры напыления, что обусловлено низкой температурой рекристаллизации и протеканием процесса возврата (отдыха) во всем диапазоне температур напыления.

Твердость покрытия цинка может достигать ≈ 750 МПа при низкой температуре напыления и снижаться до 550 МПа при повышении температуры потока воздуха до 540 °С. Структура покрытия состоит из частиц металла и включений структурно свободного корунда, доля которого в покрытии цинка составляет 4...5 % мас.

Структура и свойства двухкомпонентного покрытия. Зависимость твердости двухкомпонентного покрытия алюминий — цинк от температуры и времени (числа циклов) напыления (рис. 2) несколько отличается от зависимости, полученной для алюминия.

При минимальной температуре напыления 180 °С твердость достигает максимального значения 1030 МПа и соответствует твердости, которая наблюдается при напылении алюминия (см. рис. 1 и 2). Увеличение твердости алюминия достаточно хорошо коррелирует с продолжительностью обработки, и большему времени обработки соответствует большая твердость, что в данном случае не наблюдается.

Увеличение температуры газового потока до 360 °С сопровождается понижением твердости нанесенного металла во всем интервале времени напыления. Дальнейшее повышение температуры до 540 °С сопровождается снижением твердости до 620 МПа при минимальном времени напыления. Увеличение времени процесса приводит к возрастанию твердости до 930 МПа при семи

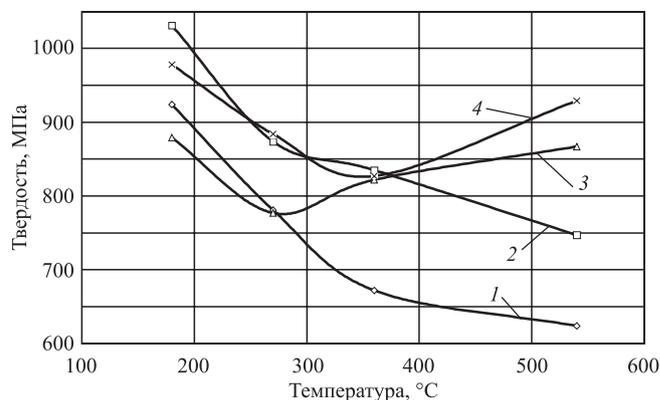


Рис. 2. Зависимость твердости двухкомпонентного покрытия Al—Zn от температуры и времени напыления:

1 — 1 цикл; 2 — 3 цикла; 3 — 5 циклов; 4 — 7 циклов

циклах напыления (см. рис. 2). Полученный результат значительно отличается от зависимости твердости от температуры и времени нанесения покрытия, которая получена для алюминия (см. рис. 1).

Можно предположить наличие следующих механизмов, которые могут оказать влияние на повышение твердости при использовании потока воздуха с максимальной температурой и увеличении времени процесса. Расчеты показывают, что частицы металла не нагреваются выше $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, находясь в потоке нагретого воздуха, из-за незначительного времени нахождения в нем [6]. Однако, попадая на поверхность и закрепляясь на ней, металл может нагреваться до высокой температуры за счет продолжительного воздействия потока нагретого воздуха. И если при этом механические характеристики алюминия и цинка значительно изменяются, то частицы корунда могут фиксироваться в металле в большем количестве и твердость может возрасти. Например, при нагреве алюминия до температуры $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ его прочность падает, а пластичность увеличивается в три раза. Воздействие твердыми частицами корунда на пластичные частицы металлов может сопровождаться измельчением исходной структуры (зерна), и тогда увеличение времени процесса может приводить к повышению твердости. Кроме того, при деформации структура насыщается точечными и линейными дефектами (вакансии, дислокации) и в этом случае нельзя исключить наличие процесса деформационной диффузии по вакансионному механизму с формированием ограниченного твердого раствора, что может оказать влияние на повышение твердости.

Исследование твердости покрытия, нанесенного при температуре $540\text{ }^{\circ}\text{C}$ с последующей термической обработкой, показало, что твердость находится в пределах $781\text{...}796\text{ МПа}$ при снижении числа циклов напыления от семи до одного. Таким образом, предположение о влиянии роста количества корунда на повышение твердости не находит подтверждения. При низкой температуре напыления твердость покрытия после термической обработки снижается незначительно.

Структура двухкомпонентного покрытия алюминий — цинк состоит из двух структурных составляющих белого и темно-серого цвета (рис. 3). Видно, что частицы корунда в основном находятся на участках, имеющих темно-серый цвет, что затрудняет оценку их количества.

Структурные составляющие белого цвета (поля) разделены между собой видимыми линиями (границами) на отдельные участки разного размера. Исследование темно-серой области покрытия при увеличении $1500\times$ показывает, что она состоит из отдельных фрагментов округлой формы со слабо выраженной границей размером $5\text{...}15\text{ мкм}$. Структурные составляющие белого и темно-серого цвета занимают примерно оди-

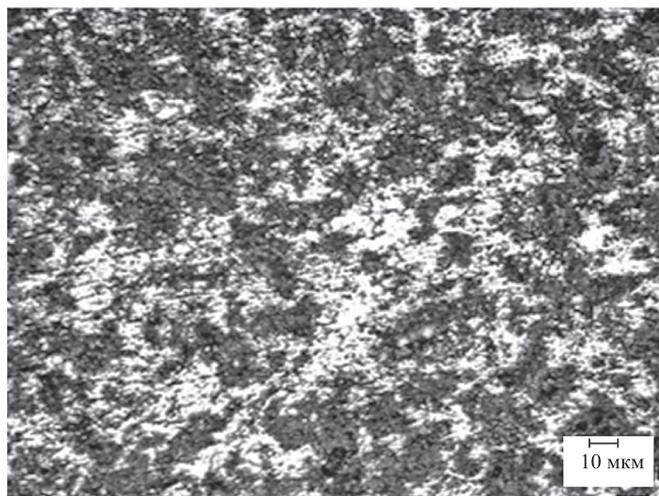


Рис. 3. Структура двухкомпонентного покрытия Al—Zn, нанесенного при температуре $540\text{ }^{\circ}\text{C}$ и семи циклах напыления

наковую площадь, что соответствует соотношению алюминия и цинка в механической смеси порошка.

Измерение длины и ширины участков белого и темно-серого цвета, нанесенных при температуре $360\text{ }^{\circ}\text{C}$ (5 циклов) и $540\text{ }^{\circ}\text{C}$ (7 и 3 цикла), позволило выявить некоторую тенденцию. Средний размер участков белого цвета значительно отличается и при семи циклах воздействия составляет $13,7 \times 7,5\text{ мкм}$, тогда как при трех циклах они имеют размер $19,4 \times 10,7\text{ мкм}$. В таком случае можно предположить, что на повышение твердости при увеличении времени напыления влияет измельчение структуры частиц (зерна) металла. Средний размер темно-серой структуры покрытия, нанесенного при трех и семи циклах с температурой потока воздуха $540\text{ }^{\circ}\text{C}$, различается незначительно и составляет $28,7 \times 23,7$ и $29,7 \times 22,9\text{ мкм}$ соответственно. Следует отметить, что в темно-серых зонах присутствует незначительное количество вкраплений округлой формы белого цвета, размер которых составляет $1\text{...}3\text{ мкм}$.

При использовании температуры $360\text{ }^{\circ}\text{C}$ и пяти циклах напыления структурные составляющие серого и белого цвета имеют несколько большие размеры, чем при использовании температуры $540\text{ }^{\circ}\text{C}$: $34,7 \times 26,9$ и $19,9 \times 14,0\text{ мкм}$ соответственно. Термическая обработка образцов с покрытием, нанесенным при $360\text{ }^{\circ}\text{C}$ и пяти циклах, значительно уменьшает средние размеры областей белого цвета ($11,4 \times 7,8\text{ мкм}$). При такой температуре металл (цинк) переходит в жидкое состояние и при кристаллизации возникают новые зерна. В этом случае можно предположить, что области белого цвета являются цинком.

Исследование покрытия при значительном увеличении показывает, что поверхность насыщена дефектами (поры, включения, разрывы между структурными составляющими). Поверхность пластичных металлов как будто подверглась бомбардировке твердыми частицами корунда. На участках поверхности, окрашенных в

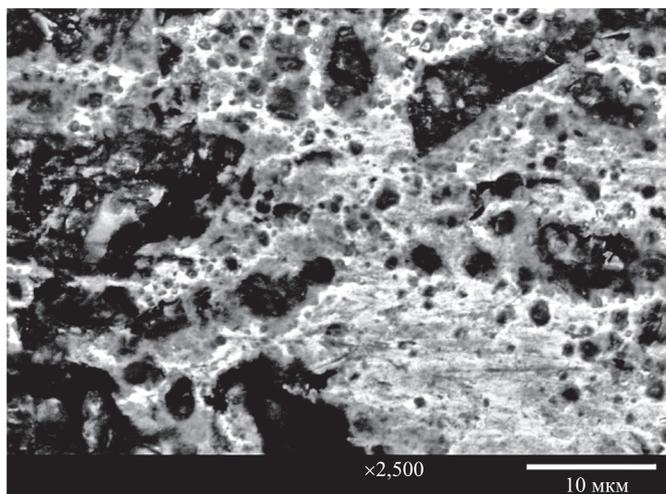


Рис. 4. Поверхность двухкомпонентного покрытия Al—Zn

белый и, особенно, темно-серый цвета, видны включения частиц корунда разного размера (рис. 4).

Исследование металла в характеристическом излучении Al, Zn, O₂ показало, что участки белого цвета — это цинк с незначительным точечным и достаточно равномерным распределением кислорода и алюминия (корунда) (рис. 5). Темно-серая область — алюминий — содержит значительно больше кислорода (корунда), который распределен достаточно неравномерно.

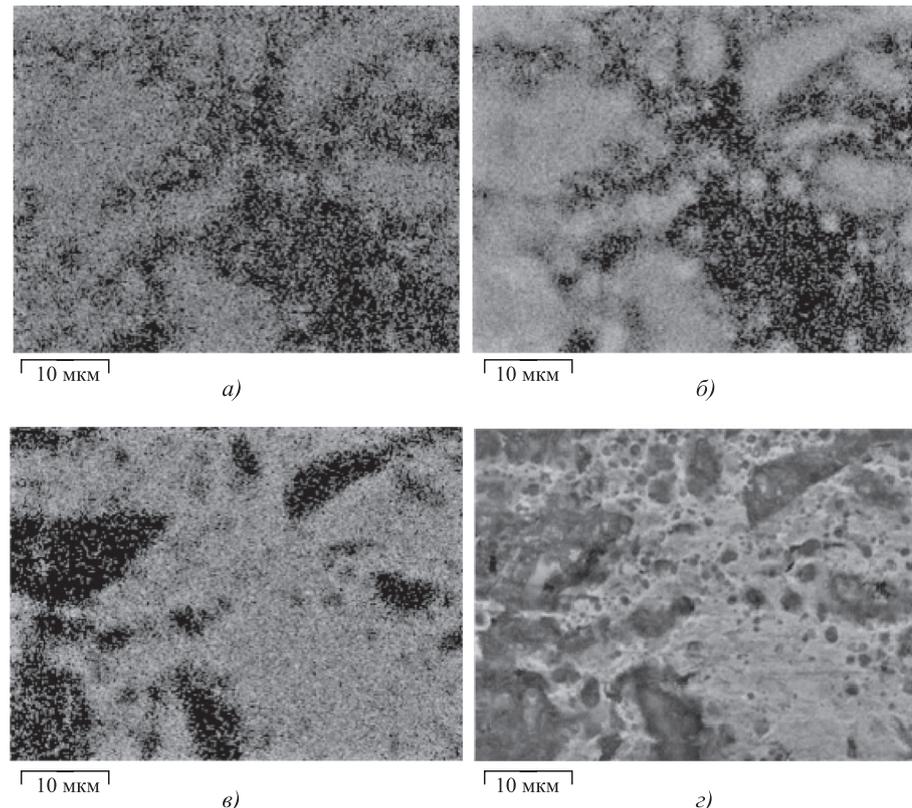


Рис. 5. Распределение в покрытии Al—Zn: кислорода (а), алюминия (б), цинка (в) и изображение его структуры в отраженных электронах (г)

Содержание элементов, % мас.

Режим напыления	Спектр	Al	Zn	O ₂
T = 360 °C; N = 5	1	65,6	—	34,4
	2	52,2	—	47,8
	3	31,6	68,4	—
	4	1,1	96,6	2,3
	5	17,3	73,9	17,3
	6	51,7	10,5	37,8
T = 360 °C; N = 5; т/о: 480 °C, 600 с	7	4,2	87,7	8,2
	8	83,5	5,9	10,6
	9	41,1	34,1	24,8
	10	42,4	31,2	26,4
T = 540 °C; N = 7	11	3,2	90,5	6,4
	12	75,2	12,5	12,4
	13	63,0	13,4	23,7
	14	77,8	8,6	13,6

Обозначения: T — температура, °C; N — число циклов; т/о — термическая обработка.

На участках алюминия и прилегающей области провели количественный анализ содержания алюминия, цинка и кислорода, результаты которого представлены в таблице. Спектры снимали на участках (в точках), прилежащих к алюминию и на алюминии.

Точки на алюминии отличались оттенком цвета (темно-серый, серый, светло-серый) и находились на расстоянии 10...20 мкм от цинка и на таком же расстоянии друг от друга (рис. 6).

Из результатов спектрального анализа видно, что в двухкомпонентном покрытии присутствуют области цинка с разным содержанием корунда (см. табл., спектры 4, 7, 11). В зонах, имеющих разные оттенки серого цвета, есть области чистого алюминия с разным содержанием корунда (см. табл., спектры 1, 2). Также на разных участках (точках) области, относящейся к алюминию, отмечено наличие цинка с содержанием от 5,9 до 73,9 % мас. Процессы, которые могут привести к получению такой структуры в относительно незначительный промежуток времени, зависят от температуры (диффузия) и механических характеристик материалов (прочность, относительное удлинение).

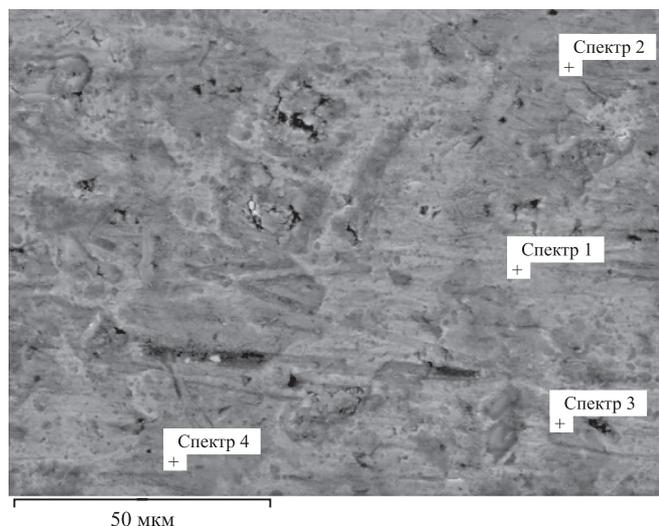


Рис. 6. Положение спектров на поверхности покрытия Al—Zn

Расчет температуры покрытия и диффузии. Используя физико-математическую модель, можно рассчитать температуру частиц при нахождении в потоке нагретого воздуха до попадания на поверхность [6]. В результате численного моделирования выявлено, что частицы алюминия и цинка прогреваются по всему объему достаточно равномерно и их температура не превышает 89 и 82 °С соответственно.

При соударении частиц с поверхностью выделяется энергия, которую можно рассчитать исходя из скорости и массы частицы. Расчеты, основанные на модели абсолютно неупругого взаимодействия, показывают, что температура частицы может возрасти на ~ 17 °С [6].

Поток воздуха у поверхности образца, на который происходит напыление покрытия, существенно турбулентный, так как число Рейнольдса (Re) велико:

$$Re = \frac{\rho v l}{\eta} \approx 10^5, \quad (1)$$

где ρ — плотность воздуха, по оценке, $\rho = 1,25 \text{ кг/м}^3$; v — скорость воздушного потока, $v = 600 \text{ м/с}$; l — характерный размер образца, $l = 5 \text{ мкм}$; η — динамическая вязкость воздуха, $\eta \approx 3,9 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$ в условиях эксперимента.

Коэффициент теплоотдачи α оценен на основе теории подобия:

$$Nu = f(Re, Pr, \dots) = \frac{\alpha l}{\lambda_b}, \quad (2)$$

где Nu — число Нуссельта; Pr — число Прандтля, $Pr \approx 0,7$ в условиях эксперимента [7]; λ_b — тепло-

проводность воздуха, $\lambda_b = 0,06 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ в условиях эксперимента,

$$Nu = 0,0296 Re^{0,8} Pr^{0,43} \approx 254. \quad (3)$$

Таким образом, на нагреваемой потоком горячего воздуха поверхности коэффициент теплоотдачи составляет ~ 3000 Вт/(м²·К). На остальных гранях образца поставлено граничное условие свободной теплоотдачи с $\alpha = 5,6 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$, что соответствует теплоотдаче от гладкой поверхности неподвижному воздуху. Из-за малого значения этого параметра и быстроты процесса отвод теплоты путем теплоотдачи от образца окружающему воздуху в рамках данной модели не существен. В расчетах не учитывали постепенный нагрев воздуха в камере, в которой происходило нанесение покрытия, из-за незначительности времени процесса (0,6 с).

Для численного моделирования описанного процесса была построена абсолютно устойчивая неявная разностная схема второго порядка точности по координатам и времени. Для проведения расчетов на ЭВМ использован численный алгоритм расчетов, основанный на методе локальных сеток Самарского [8]. В результате численного моделирования получили следующие результаты: теплопроводность наносимого материала достаточно велика, а толщина покрытия мала, поэтому за время нанесения одного слоя металл успевает прогреться до температуры горячего воздуха. Разница температуры по толщине слоя не превышает 10 %.

В конце процесса напыления поверхность прогревается практически до температуры потока воздуха при градиенте температуры, не превышающем 10 % (рис. 7). Полученный результат позволяет считать различие механических характеристик металлов по толщине покрытия несущественным.

Результат моделирования зависимости температуры поверхности от времени показывает, что примерно в середине процесса напыления температура покрытия

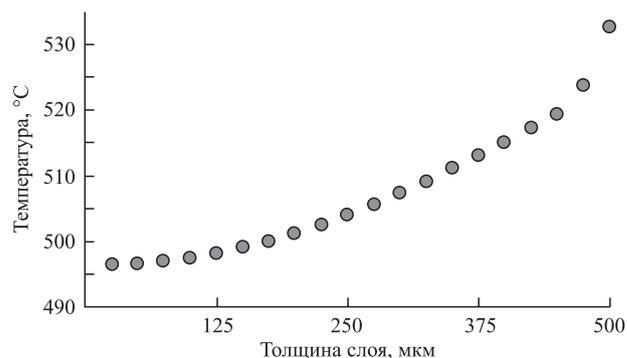


Рис. 7. Распределение температуры по толщине покрытия

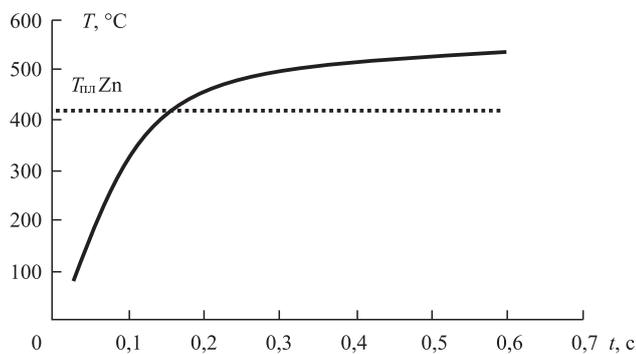


Рис. 8. Результат численного моделирования температуры поверхности

перестает существенно изменяться и достигает температуры нагретого воздуха (рис. 8).

Температура покрытия с определенного момента превышает температуру плавления цинка, что должно приводить к его расплавлению. Однако при незначительном времени процесса такого перегрева недостаточно, чтобы перевести цинк в расплавленное состояние. Тем не менее, механические свойства цинка и алюминия существенно изменяются, например прочность алюминия при 300 °С снижается до 10 МПа.

При значительном нагреве металлов количество вакансий значительно возрастает, что ускоряет процесс диффузии. Коэффициент диффузии D подчиняется уравнению Аррениуса (4):

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right), \quad (4)$$

где E_A — энергия активации диффузионного процесса; R — универсальная газовая постоянная; T — температура.

Для расчета глубины диффузии цинка и алюминия можно воспользоваться вторым законом Фика. Так как расчеты проводятся с рядом допущений и носят оценочный характер и коэффициенты диффузии цинка в алюминий и алюминия в цинк достаточно близки по величине, то можно рассмотреть одномерный случай диффузии только одного металла в объем другого и принять коэффициент диффузии постоянным, не зависящим от координат. Тогда задача с учетом начальных и граничных условий принимает вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial C(x,t)}{\partial t} &= D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2}; \\ C(x,0) &= C_0, \quad x < 0; \\ C(x,0) &= 0, \quad x > 0; \\ C(-\infty,t) &= C_0; \\ C(\infty,t) &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где C — концентрация рассматриваемого вещества; x — пространственная координата; t — время; C_0 — начальная концентрации диффундирующего вещества на границе раздела (для расчета использована безразмерная концентрация (массовая доля), $C_0 = 1$).

Тогда концентрация вещества зависит от координат и времени следующим образом:

$$C(x,t) = C_0 \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right), \quad (6)$$

где C_0 — половина начальной концентрации диффундирующего вещества на границе раздела ($C_0 = 0,5$ в рамках рассматриваемой модели); erfc — дополнительная функция ошибок,

$$\operatorname{erfc}(a) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_a^{\infty} e^{-y^2} dy. \quad (7)$$

Для рассмотренной температуры коэффициент диффузии $D_{Zn}^{Al} \sim 10^{-9}$ см²/с [9]. Тогда из уравнения (6) следует, что в процессе напыления слоя толщиной $5 \cdot 10^{-4}$ м (время 0,6 с) перемещение (диффузия) атомов одного из металлов в другой не превышает 1 мкм. Это позволяет оценить влияние механизма диффузии на перемешивание веществ частиц, из которых состоит напыляемое покрытие, как незначительное. Однако даже столь незначительная диффузия при нанесении покрытия в исследуемом диапазоне режимов напыления может оказать влияние на когезионную прочность.

Как было отмечено выше, оценка расстояния, на которое прошла диффузия компонента, достаточно приближительная, так как рассмотренная модель не учитывает многих важных факторов, например наличие оксидной пленки на поверхности алюминиевых частиц, которая существенно осложняет диффузию, но в то же время может разрушаться под воздействием корунда. При нанесении покрытия частицы металлов подвергаются воздействию твердых частиц корунда, которые их деформируют, что может значительно ускорить диффузию элементов из-за возрастания количества дефектов (вакансий). Также не учитывается время остывания покрытия после его нанесения, а оно значительно больше времени воздействия горячего воздуха.

В сплавах алюминия и цинка возможно формирование двух твердых растворов, из которых один (β) состоит почти из цинка, а второй (α) содержит до 83 % цинка. В определенных интервалах температуры и концентраций твердый раствор α распадается на два твердых раствора — богатый (α_2) и бедный (α_1) цинком.

Твердый α_2 -раствор при понижении температуры претерпевает моноэвтектидный распад с формированием α_1 - и β -раствора.

Из диаграммы состояния алюминий — цинк можно предположить влияние диффузии на формирование областей твердого раствора с содержанием цинка до 6 % мас. Однако наличие цинка в алюминии с содержанием 20 % мас. и более нельзя объяснить процессами диффузии.

В таком случае можно предложить следующий механизм формирования в алюминии областей с высоким содержанием цинка.

При исследовании скорости частиц корунда использовали методику расчета, которая основана на пластической деформации модельного материала при комнатной температуре [10]. Результаты показали, что частицы корунда способны значительно деформировать две и оставить на поверхности третьей фольги из алюминия толщиной 10^{-4} м четкий отпечаток следа (лунки). Таким образом, частицы корунда могут оказывать влияние на форму и размер частиц цинка и алюминия на глубину до $25 \cdot 10^{-5}$ м.

Алюминий при высокой температуре (≥ 400 °С) имеет низкую прочность ($\beta_b \approx 10 \dots 15$ МПа) и высокое относительное удлинение ($\delta > 50$ %) [11, 12]. Цинк при аналогичной температуре находится в вязком расплавленном состоянии. Частицы корунда, проходя через цинк, могут выступами (гранями неодинаковых формы и размера) захватывать цинк разного объема и внедрять (переносить) в алюминий. При многократном воздействии частиц корунда, имеющих разное направление движения и удара, в алюминии могут формироваться микрообласти с разным содержанием цинка.

Выводы

1. Напыление механической смеси алюминия и цинка позволяет получить покрытие с твердостью до 1100 МПа. Повышение твердости покрытия с увеличением температуры и длительности процесса связано с измельчением исходной структуры (зерна). При низкой температуре напыления к основному механизму повышения твердости можно отнести более значительное содержание корунда.

2. Структура покрытия состоит из цинка с внедренными мелкодисперсными частицами корунда и алюминия с неравномерно распределенным цинком ($\approx 6 \dots 74$ % мас.) и частицами корунда большего размера (до 10^{-5} м).

3. Представлена математическая модель, позволяющая оценить распределение температуры покрытия

по толщине, которая показывает возможность нагрева слоя металла до ≈ 500 °С.

4. Технологические параметры процесса (температура, время) могут способствовать прохождению процесса диффузии элементов напыляемой смеси на расстояние 10 мкм с формированием твердого раствора.

5. Основным механизмом образования областей с высоким содержанием цинка в алюминии (≥ 10 % мас.) следует считать перенос цинка разного объема твердыми частицами корунда.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Холодное** газодинамическое напыление. Теория и практика / А.П. Алхимов, С.В. Клинков, В.Ф. Косарев, В.М. Фомин. М.: Физматлит, 2010. 536 с.
2. **Димет**. Применение технологии и оборудования. Режим доступа URL: <http://www.dimet-r.narod.ru/> (дата обращения 14.10.2014).
3. **Коррозионные** свойства покрытий, нанесенных газодинамическим напылением / В.Е. Архипов, А.А. Дубравина, А.Ф. Лондарский и др. // Коррозия: материалы, защита. 2014. № 4. С. 33—38.
4. **Структура** и свойства покрытий, нанесенных газодинамическим напылением / В.Е. Архипов, А.А. Дубравина, Л.И. Куксенова и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 4. С. 18—24.
5. **ГОСТ 2999—75**. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу. М.: Стандартинформ, 1987. 30 с.
6. **Технологические** особенности газодинамического нанесения покрытий / В.Е. Архипов, А.Ф. Лондарский, Г.В. Москвитин и др. // Вестник машиностроения. 2015. № 9. С. 64—70.
7. **Михеев М.А., Михеева И.М.** Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 344 с.
8. **Самарский А.А.** Введение в теорию разностных схем. М.: Наука, 1971. 552 с.
9. **Процессы** взаимной диффузии в сплавах / И.Б. Боровской, К.П. Гуров, И.Д. Марчукова, Ю.Э. Угасте. М.: Наука, 1973. 360 с.
10. **Study of Diffusion Mobility of Al—Zn Solid Solution** / Y.W. Cui, K. Oikawa, R. Kainuma, K. Ishida // J. of Phase Equilibria and Diffusion. Vol. 27. No. 4. 2006. P. 333—342.
11. **Использование** газодинамических установок для поверхностной пластической деформации / В.Е. Архипов, А.Ф. Лондарский, А.Ф. Мельшанов и др. // Заводская лаборатория. 2010. № 34. С. 45—51.
12. **База** данных свойств материалов MatWeb. Режим доступа URL: <http://www.matweb.com/> (дата обращения 14.06.2015).