

Возможной областью применения покрытия может быть напыление штоков нефтяных насосов. Керамическое покрытие, которое в настоящее время наносится на цилиндрическую поверхность штока, обладает низкой адгезией и скалывается в процессе эксплуатации. Напыление легированного оксида алюминия позволит получить износостойкое покрытие с высокой адгезией.

Технологический процесс нанесения покрытия может включать в себя следующие стадии:

- подготовка поверхности для нанесения покрытия дробеструйной обработкой: давление воздуха 0,5 МПа, диаметр сопла 8 мм, дистанция 30 мм, использовалась чугунная колотая дробь ДЧК-1,5 ГОСТ 11964-81 со средним размером 1,5 мм;
- напыление покрытия: ток дуги плазматрона 420 А, напряжении 80 В, дистанция напыления 90 мм, плазмообразующий газ – азот, расход газа – 3 м³/ч. Толщина покрытия 0,5-0,7 мм.
- контроль качества покрытий.

Выводы

Введение молибдена оказало положительное влияние на физико-механические и эксплуатационные характеристики керамического покрытия. Значительно снизилась хрупкость и увеличилась адгезия покрытия с основой в 2-2,5 раза. Коэффициент трения легированного покрытия, в сравнении с покрытием из чистого оксида алюминия, снизился в 2-2,2 раза и составил 0,11-0,12.

Рентгеноструктурный анализ образцов из чистого оксида алюминия и легированного молибденом выявил в образцах обоих составов фазы α - Al₂O₃, γ -Al₂O₃. Легированный образец содержит дополнительно оксид молибдена MoO₃, и чистый молибден в количестве около 10%. Распределение молибдена

УДК 621.793

Константинов В.М., Авсиевич А.М.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ИЗ ДИФФУЗИОННО-ЛЕГИРОВАННЫХ САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ (ДЛС) ПОРОШКОВ

Введение. Одним из путей повышения эффективности технологии газотермического напыления защитных покрытий является использование порошковых материалов, прошедших химико-термическую обработку. Нарращивание серийного выпуска таких порошков столь известными фирмами как "Hoganas" (Швеция), "Kobe Seiko" (Япония), "Mannesmann Demang" (Германия) свидетельствует о том, что это является мировой тенденцией [1, 2]. Указанный путь открывает широкие дополнительные возможности для управления свойствами формируемых покрытий и позволяет существенно улучшить технологические свойства дисперсных материалов, применяемых для напыления.

На территории СНГ данное направление представлено технологией производства диффузионно-легированных самофлюсующихся (ДЛС) порошков [1, 3]. Сутью данной разработки является придание исходным порошкам преимущественно на основе железа флюсующих свойств. Частицы порошка в этом случае имеют композиционное строение и состоят из ядра и диффузионной оболочки, содержащей в высокой концентрации флюсующий элемент (бор, кремний). Применение бора предпочтительно ввиду его большего химического сродства к кис-

ло покрытие – гетерогенное, что вызвано структурными особенностями исходного порошка и предполагает, что частицы молибдена прилипают к частице оксида.

Представленные результаты показывают перспективность применения метода диффузионного легирования керамических порошков для получения покрытий с высокими эксплуатационными свойствами. Исследования в данном направлении будут продолжаться. В дальнейшем планируется установить влияние содержания молибдена в исходном порошке на физико-механические свойства покрытия, влияние пористости покрытия на его износостойкость, а также влияние режимов напыления на эксплуатационные характеристики. Кроме того, с использованием описанной технологии предполагается получить оксид алюминия, легированный не только молибденом, но и бором.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Газотермические покрытия из порошковых материалов. Справочник / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.А. Сидоренко, Е.Н. Ардаговская. – Киев.: Наукова думка, 1987. – 544 с.
2. Аппен А.А. Температууроустойчивые неорганические покрытия – М.–Л.: Химия, 1976. – 296с.
3. Самсонов Г.В., Эпик А.П. Тугоплавкие покрытия. – М.: Металлургия, 1973. – 400с.
4. Газотермическое напыление композиционных порошков/ Кулик А.Я., Борисов Ю.С., Мухин А.С., Никитин М.Д. – Л.: Машиностроение, 1985. – 199с., ил.
5. Износостойкие газотермические покрытия из диффузионно-легированных порошков: монография/ В.М. Константинов, Н.В. Спиридонов, О.Г. Девойно, А.М. Авсиевич; под ред. чл.-корр. НАНБ Ф.И. Пантелеенко – Мн. Технопринт, 2005. – 146с.

лороду [3]. При диффузионном насыщении бором порошков черных металлов в центре частицы сохраняется структура исходной стали или чугуна, а поверхностный слой представляет собой преимущественно боридную фазу [1, 3]. В процессе насыщения растущий боридный слой интенсивно оттесняет вглубь частицы присутствующие легирующие элементы [1]. Концентрация бора в приповерхностном слое частиц максимальна, что повышает флюсующую способность порошка. Толщина боридного слоя и, соответственно, содержание бора в частице зависит от технологических режимов процесса насыщения. Фактически такая частица имеет двухфазное строение: свойства поверхностного легированного слоя соответствуют свойствам бориды, а свойства ядра частицы - свойствам исходного материала на основе железа.

Постановка задачи. В отличие от известных плакированных порошков, в которых тонкая оболочка легкоплавкого металла покрывает основной материал, частицы ДЛС-порошков являются более сложной и разнородной системой. Теплофизические и химические свойства бориды их внешнего слоя значительно отличаются от свойств исходного металла сердцевинны. Это предопределяет особенности взаимодей-

Константинов Валерий Михайлович, к.т.н., доцент, зав. каф. «Материаловедение в машиностроении» Белорусского национального технического университета.

Авсиевич Андрей Михайлович, к.т.н., ст. преподаватель каф. «Теория механизмов и машин» Белорусского национального технического университета.

Беларусь, БНТУ, 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65.

ствия таких частиц с высокотемпературной газовой струей в процессе напыления и с поверхностью основы при формировании покрытия. Изучению закономерностей формирования газотермических покрытий, обусловленных строением частиц диффузионно-легированных самофлюсующихся порошков, посвящено настоящее исследование.

ДЛС-порошки преимущественно производятся на основе конструкционных сталей, а также легированных сталей и чугунов. Для материалов на железной основе имеет место заметное различие теплофизических свойств, определяемое присутствием разных легирующих элементов с разным их содержанием. Это предопределяет различия в динамике тепловых процессов, что должно учитываться при назначении режимов напыления покрытий из определенного материала. Однако указанные различия наиболее существенны при грануляции частиц менее 80 мкм. Они заключаются в разности абсолютных значений температур частиц в высокотемпературной струе, а не в характере зависимости теплофизических величин от технологических параметров напыления [4]. Поэтому для выявления основных закономерностей влияния строения частиц ДЛС-порошка на процесс формирования покрытий при моделировании процессов их взаимодействия с высокотемпературной газовой струей и металлом поверхности основы допустимо принять, что свойства легированного слоя соответствуют свойствам боридов FeB [5], а свойства ядра частицы – свойствам железа.

Динамика тепловых процессов в высокотемпературной струе плазмы. Для исследования динамики нагрева и остывания частиц ДЛС-порошка в плазменной струе применялось математическое моделирование, включающее в себя расчет их температурного поля и скорости в процессе напыления. В основу расчета положены разработки, выполненные в БГУИР под руководством проф. СП. Кундаса [6] с соответствующим программным обеспечением [7,8]. Для учета особенностей строения частиц математическая модель была дополнена условием двухслойности [9].

Исследовался процесс нагрева и разгона частиц ДЛС-порошка с различной толщиной диффузионно-легированного слоя и однородных железных частиц различной грануляции в плазменной струе азота при напряжении дуги 85 В, силе тока 200 А, расходе плазмообразующего газа 50 л/мин и диаметре сопла плазмотрона 4 мм. Из практики известно, что данные режимы обеспечивают получение качественных покрытий при высокой экономичности процесса нанесения и минимальных затратах энергии. Диапазон расчетной грануляции частиц - от 50 до 120 мкм. По результатам расчетов построены зависимости температуры и скорости частиц от дистанции напыления и грануляции (рис. 1 и 2).

Как видно из полученных зависимостей, при одинаковых размерах частицы ДЛС-порошка по сравнению с однородными железными, медленнее нагреваются и переходят стадию плавления. Максимальная температура нагрева частиц, достигаемая на выходе из факела плазменной струи, значительно превышает температуру плавления, причем для ДЛС-частиц она составляет 0,9...0,95 относительно однородных железных. В дальнейшем при остывании для ДЛС-частиц процессы обратного перехода в твердое состояние и дальнейшего охлаждения также более замедлены. Графики температурных зависимостей сближаются, и на дистанции 100... 130 мм существуют точки, в которых температура однородных и ДЛС-частиц совпадает.

Большая инерционность тепловых процессов в ДЛС-частицах обусловлена пониженной теплопроводностью боридного слоя (12 Вт/м² при 74 Вт/м² для чистого железа) [5]. В то же время невысокая толщина диффузионного слоя (~ 0,1 диаметра частицы) и близость температур плавления железа и его боридов предопределяет значительное сходство процес-

сов нагрева и остывания однородных железных и двухслойных ДЛС-частиц.

Зависимость нагрева ДЛС-частиц от их грануляции имеет монотонный характер. До наиболее высоких температур разогреваются частицы размером 100... 120 мкм за счет достаточно долгого нахождения в факеле струи. Это объясняется тем, что по сравнению с более мелкими они имеют значительно меньшую скорость. При грануляции более 80 мкм с увеличением размера частиц скорость их уменьшается незначительно, тогда как масса резко возрастает. С ростом грануляции частиц увеличивается время, необходимое для полного проплавления их на всю глубину. Различие в степени нагрева между частицами грануляцией 100 и 120 мкм минимально. Это позволяет предположить, что с дальнейшим ростом грануляции она снижается.

Максимальная температура нагрева частиц зависит от их грануляции. Частицы фракции 50... 63 мкм перегреваются выше температуры плавления на 250... 300 °С, фракцией 100... 120 мкм - на 350... 400 °С.

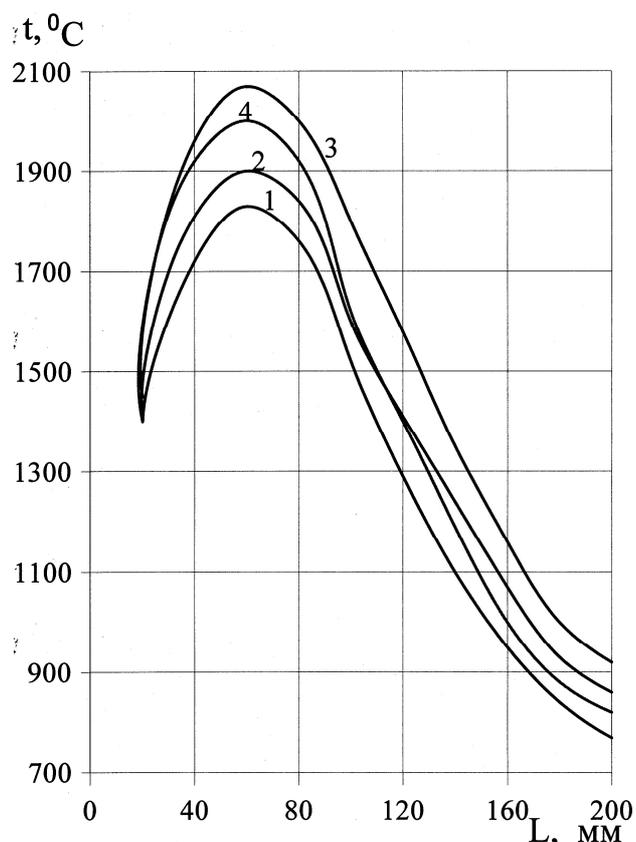


Рис. 1. Зависимость температуры частиц от дистанции напыления при плазменном напылении:

1 – ДЛС-частица грануляцией 50 мкм; 2 – ДЛС-частица грануляцией 80 мкм; 3 – ДЛС-частица грануляцией 120 мкм; 4 – однородная железная частица грануляцией 80 мкм

Перегрев частиц выше температуры плавления делает необходимой оценку диффузионных процессов в них. Диффузионный путь атомов бора в расплавленной частице оценивался по формуле [10]

$$L_{dif} = \sqrt{D_{liq} \cdot \tau},$$

где D_{liq} – коэффициент диффузии в жидкой фазе, принятый для атомов бора в расплаве металла согласно [202/

$D_{liq} = 10^{-4}$ см²/с; τ – время нахождения частицы в расплавленном состоянии.

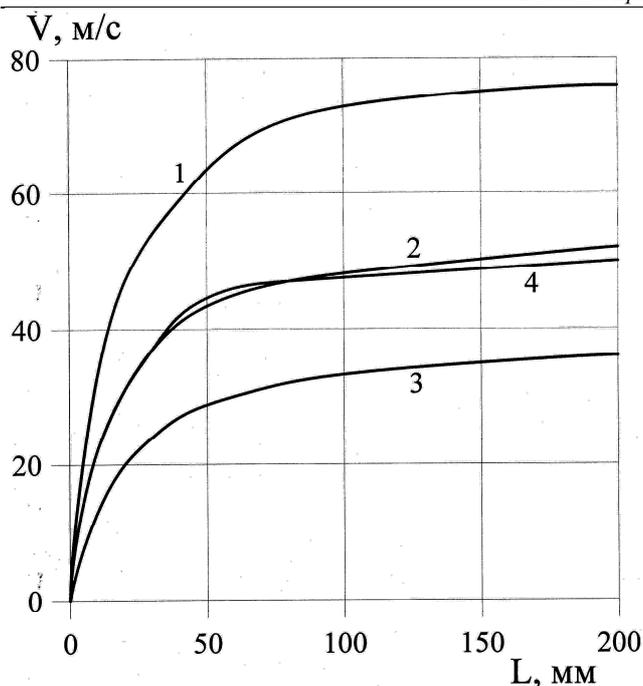


Рис. 2. Зависимость скорости частиц от дистанции напыления при плазменном напылении:

- 1 – ДЛС-частица грануляцией 50 мкм;
- 2 – ДЛС-частица грануляцией 80 мкм;
- 3 – ДЛС-частица грануляцией 120 мкм;
- 4 – однородная железная частица грануляцией 80 мкм.

Согласно расчетам, проведенным на основании полученных расчетных зависимостей скорости частиц разных размеров от дистанции, время нахождения частиц в расплавленном состоянии составляет 1...2 миллисекунды. За это время диффузионный путь атомов бора при свободном перемещении его в расплаве не превышает 5 мкм. При этом приращение поверхностного объема частицы, содержащего атомы бора, может составлять от 15 до 40 %. Следует учитывать, что в данном случае свободно будут диффундировать только атомы, находящиеся на границе раздела фаз FeB - Fe. Следовательно, будет происходить постепенное выравнивание градиента концентрации бора на границе раздела фаз, но для него необходимо достаточно длительное время, то есть процесс гомогенизации находится в начальной стадии. Тогда концентрация бора в приповерхностном слое практически не изменится по сравнению с состоянием перед напылением, и теплофизические свойства поверхностного слоя соответствуют свойствам боридов. Данные выводы подтверждаются результатами исследования структуры покрытий после напыления. Таким образом, модельные тепловые расчеты температуры частиц без учета диффузионных процессов остаются справедливыми и для стадии остывания.

Скорость остывания частиц также определяется их размерами. Чем меньше частица, тем быстрее она охлаждается. Важным, с практической точки зрения, является вопрос о расстоянии от сопла плазматрона, на котором происходит обратный переход ядра частицы из жидкого в твердое состояние. Соответствующие данные приведены в табл. 1.

Приведенная зависимость имеет монотонный характер. Наиболее быстро остывают частицы фракцией 50 мкм, что объясняется слабым ее перегревом при достаточно высокой скорости и минимальной массе. Более тяжелые частицы за счет малой скорости, более длительного нахождения в факеле плазменной струи и большой массы лучше прогреваются и медленнее остывают. На практике предпочтительно выбирать дистанцию напыления примерно на 10...20 мм меньшую указанной в

табл. 1. При этом частица будет обладать высокой температурой и активацией, но поверхностный слой ее перейдет в твердое состояние, что предотвратит разбрызгивание.

Таблица 1. Зависимость расстояния от сопла плазматрона, на котором происходит полное затвердевание частицы, от ее грануляции

Расчетная грануляция частицы, мкм	Расстояние от сопла плазматрона, мм
50	107
63	116
80	125
100	131
120	138

С изменением толщины наружного диффузионно-легированного слоя при одинаковой грануляции эффективность разогрева частиц изменяется незначительно. При увеличении расчетной толщины боридного слоя в два раза (до 0,2 диаметра частицы) максимальная температура в центре частицы уменьшается всего на 20 °С. Однако для таких частиц характерен более быстрый разогрев до температуры плавления и более высокие градиенты температуры.

Особенности термообработки покрытий из ДЛС-порошков. Градиент химического состава бора по объему частиц в момент их удара о поверхность основы предопределяет и неравномерное распределение его в сформированном покрытии, что может оказать влияние на эффективность последующей термообработки. Для изучения влияния способа термообработки покрытий из ДЛС-порошка на основе дисперсных отходов высокохромистого чугуна их подвергали оплавлению газовой горелкой, лучом лазера и выдержке в печи при температуре 900... 1000 °С. Оплавление горелкой осуществлялось с доведением до жидкого состояния поверхностного слоя.

При оплавлении газовой горелкой в покрытии появляются крупные поры преимущественно круглой формы площадью от 0,2 до 1 мм. Количество их достигает 6 на 1 см² при предварительном плазменном напылении и 25 на 1 см² при газопламенном напылении. При газопламенном методе пористость напыленного покрытия значительно выше, чем при плазменном. Зависимость порообразования от способа предварительного нанесения покрытия указывает на то, что крупные поры возникают на местах мелких пор, образовавшихся после операции напыления. Это происходит в результате роста и объединения отдельных выходящих на поверхность покрытия мелких пор, причем наиболее интенсивно в местах скопления таковых. Причиной роста пор является выгорание материала покрытия по их поверхности под воздействием кислорода окружающего воздуха. Интенсификации порообразования способствует то, что в покрытии ввиду неравномерного содержания бора в частицах ДЛС-порошка наблюдается хаотичное распределение участков с различным содержанием боридов и, соответственно, разной теплопроводностью. При этом возникновение препятствия распространению тепла от любого концентрированного источника энергии приводит к перегреву, многократному перемешиванию и закипанию металла в микроразделах покрытия, что приводит к интенсивному его выгоранию.

Проведенные опыты по оплавлению покрытий из ДЛС-порошка на железной основе лучом лазера позволяют сделать вывод, что описанные явления усиливаются при увеличении плотности мощности подводимого теплового потока. После лазерного оплавления покрытий пор незначительно увеличивается, при этом площадь их возрастает до 0,5...2 мм. Также зафиксировано появление многочисленных наплывов высотой 11,5 мм, что сравнимо с толщиной покрытия. Для сравне-

ния при аналогичных режимах напыления и оплавления объемно-легированного порошка на основе железа ПР-Х4Г2Р4С2 количество и площадь пор уменьшалось на порядок, а при предварительном плазменном напылении на половине образцов они полностью отсутствовали.

Также для выявления изменений в покрытиях в процессе термообработки была изучена структура их поперечного среза. Структура переходных зон «покрытие-основа» после газопламенного оплавления покрытия и выдержки в печи представлены на рис. 3.

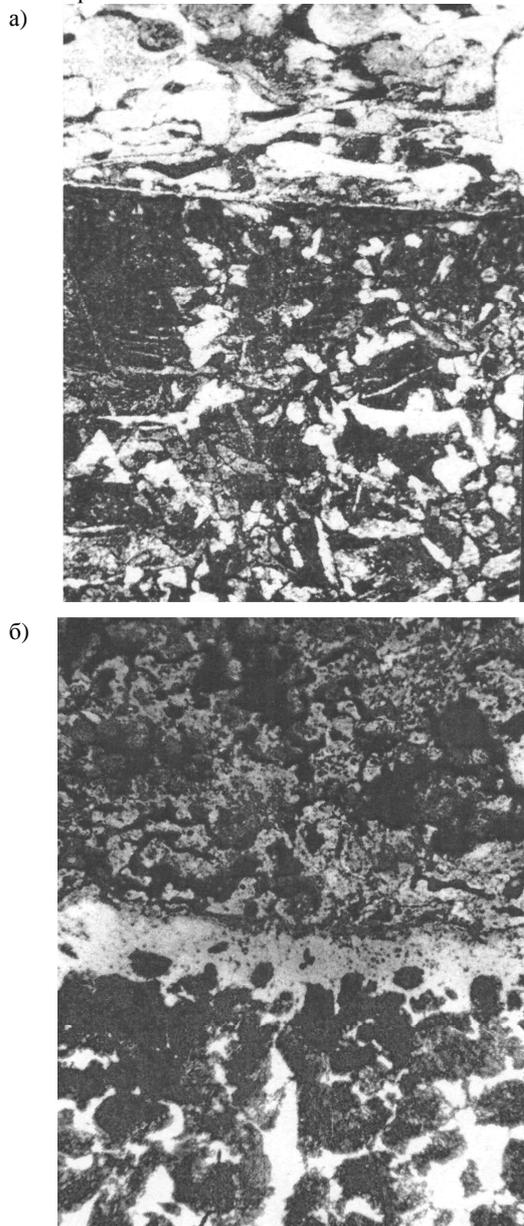


Рис. 3. Структура переходной зоны «покрытие-основа»: а) после газопламенного оплавления; б) после выдержки в печи

При оплавлении газовой горелкой покрытия толщиной 1,5 мм слой глубиной до 1 мм находился в жидкой фазе, а деформированные частицы слоев, наиболее близких к основе, не претерпели полного проплавления - у них оплавились только насыщенные боридами поверхность. Проплавление покрытия не на всю глубину объясняется низкой теплопроводностью боридных оболочек.

Как следует из рисунка, и при газопламенном оплавлении, и при выдержке в печи резко увеличилась как поверхность

контакта между частицами в оплавленных слоях, так и между покрытием и основой. Соответствующие границы стали менее различимы по сравнению с покрытием после напыления. Данное явление можно объяснить раскислением поверхностей контакта бором. Характер структуры слоев покрытия вблизи основы указывает на то, что процессы химического взаимодействия протекают и при температурах ниже температуры плавления покрытия. Сходство структуры переходных зон после газопламенного оплавления и при выдержке в печи свидетельствует об одинаковом характере формирования адгезионных связей для указанных технологий термообработки покрытий.

Таким образом, отличительной особенностью ДЛС-порошков от объемно-легированных является то, что для них одинаково эффективными средствами улучшения структуры покрытий являются газопламенное оплавление и выдержка в печи при температуре ниже 1000 °С. Выдержка в печи является предпочтительным вариантом технологии, так как при этом, в отличие от газопламенного и лазерного оплавления отсутствуют видимые дефекты на поверхности покрытий. Исследование прочности сцепления покрытий после различных вариантов термообработки показало, что различия находятся в пределах погрешности эксперимента и достигают 50...100 МПа. Более значимым фактором для адгезии покрытия является его плотность после операции напыления.

Заключение. В результате исследования установлено, что наличие диффузионно-легированного боридного слоя на поверхности частицы замедляет протекание тепловых процессов при напылении: частица медленнее нагревается и остывает из-за пониженной теплопроводности боридной оболочки. Для грануляции частиц ДЛС-порошка от 50 до 120 мкм наименее энергонасыщенные режимы плазменного напыления обеспечивают их перегрев выше температуры плавления на 300...400 °С и полное обратное ее затвердевание на дистанции 105...140 мм. Оптимальная дистанция напыления в зависимости от грануляции частиц составляет 90...120 мм. В процессе напыления диффузионное проникновение бора из насыщенного слоя вглубь частицы составляет не более 5 мкм. В момент контакта с основной частица практически сохраняет двухслойное строение. Теплофизические свойства поверхностного слоя частицы в момент контакта с основой соответствуют свойствам борида. Как показали оценочные расчеты температуры контакта на границе раздела «частица - основа», проведенные по методике [11], пониженная теплопроводность боридной оболочки приводит для ДЛС-частиц к уменьшению термической активации основы. Для ее увеличения необходимо дополнительный подогрев основы, что улучшает химическое взаимодействие на границе раздела и адгезионную способность частиц.

Неравномерное содержания бора в частицах ДЛС-порошка определяющим образом влияет на процесс последующей термообработки покрытий из ДЛС-порошков на железной основе, так как обуславливает хаотичное распределение в покрытии участков разной теплопроводностью. При этом возникновение препятствия распространению тепла от любого концентрированного источника энергии приводит к перегреву, многократному перемешиванию и интенсивному выгоранию металла в микрообъемах покрытия. Данные явления усиливаются при увеличении плотности мощности подводящего теплового потока.

Увеличение адгезии покрытий из ДЛС-порошков происходит в равной мере при газопламенном оплавлении и выдержке в печи при температуре 950...1000 °С. При обеих технологиях последующей термообработки покрытий происходит резкое увеличение поверхности контакта между частицами в оплавленных слоях, а также между покрытием и основой. Данное явление можно объяснить в первую очередь интенсивным протеканием химических реакций на поверхно-

стях контакта, где имеет место максимальная концентрация бора. Выдержка в печи является предпочтительным вариантом технологии, так как при этом, в отличие от оплавления, отсутствуют порообразование на поверхности покрытий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ворошнин Л.Г., Пантелеенко Ф.И., Константинов В.М. Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО. - Мн.: ФТИ, Новополоцк: ГТГУ, 1999. – 133 с.
2. Kvist S.A. Hognas invest in the future // Metal Bull. Mon. - 1990, №7, - P. 44-45.
3. Пантелеенко Ф.И. Самофлюсующие диффузионно легированные порошки на железной основе и защитные покрытия из них. - Мн.: УП «Технопринт», 2001.-300 с.
4. Моделирование тепловых процессов в частицах порошка высокохромистого чугуна при плазменном напылении / Ю.О. Девойно, А.М. Авсиевич, С.П. Кундас, Д.В. Марковник. Вестник Брестского государственного технического университета. Машиностроение. - 2005, № 4. – С. 4-6.
5. Самсонов Г.В., Серебрякова Т.И., Неронов В.А. Бориды. - М.: Атомиздат, 1975.-376 с.
6. Компьютерное моделирование процессов плазменного напыления покрытий / С.П. Кундас, А.П. Достанко, А.Ф. Ильющенко и др. - Мн.: Бестпринт, 1998 - 212 с.
7. Кундас С.П., Гуревич В.А., Кашко Т.А. Моделирование нагрева частиц порошка в плазменной струе с учетом движения фронтов плавления и испарения // Известия Белорусской инженерной академии. 2000. - №1 (9) / 2. - С. 82-84.
8. Математическая модель процесса плазменного напыления покрытий / Гуревич В.А., Кашко Т.А., Левашкевич Я.С., Кундас С.П. // Физика конденсированных сред: Тезисы докл. VIII Респ. науч. конф. студентов и аспирантов / Под ред. В.А. Лиопо. - Гродно: ГГУ, 2000. – С. 85-86.
9. Изучение особенностей процесса газотермического напыления покрытий из диффузионно легированных самофлюсующихся порошков на железной основе с применением математического моделирования / А.М. Авсиевич, Н.В. Спиридонов, О.Г. Девойно, С.П. Кундас, В.М. Константинов // Теория и практика машиностроения. - 2003 - № 2. - С. 36-39.
10. Лариков Л.Н., Исайчев В.И. Диффузия в металлах и сплавах: Справочник. - Киев: Наукова думка, 1987. - 509 с.
11. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. - М.: Металлургия, 1992. - 432 с.

УДК 621.793.72

Кривцун И.В., Кардаполова М.А., Борисов Ю.С., Девойно Ю.О.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ЧУГУННЫХ ПОКРЫТИЙ

Введение

Среди технологических процессов восстановления рабочих поверхностей быстроизнашивающихся деталей большое место занимают методы создания износостойких покрытий газотермическим напылением порошковых материалов. В качестве таких материалов широко используются никелевые самофлюсующиеся сплавы, обладающие наряду с высоким комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств хорошей технологичностью. Однако в ряде случаев применимость таких материалов ограничивается их высокой стоимостью. В последнее время существует тенденция по замене их более дешевыми материалами на железной основе. Еще более выгодным с экономических позиций видится использование в качестве сырья для нанесения покрытий отходов различных машиностроительных и других производств.

Одним из таких материалов являются отходы электроэрозийной обработки порошка высокохромистого чугуна марки ИЧХ28Н2. Ежегодно образующееся количество данного материала приемлемой для газотермического напыления грануляции достаточно для промышленного внедрения на предприятиях процесса восстановления деталей с его использованием. До настоящего времени порошок ИЧХ28Н2 применялся для нанесения покрытий исключительно после дорогостоящего и малопродуктивного процесса диффузионного легирования [1,2].

Предварительные эксперименты показали принципиальную возможность получения покрытий на основе ИЧХ28Н2 в чистом виде (без какой-либо предварительной модифицирующей обработки) путем плазменного напыления. Однако требуется проведение дальнейших теоретических и экспериментальных исследований для оптимизации процесса формирования покрытий, что является целью настоящего исследования.

Кривцун Игорь Витальевич, д.т.н., ст. научн. сотр., заведующий отделом физики, газового разряда и техники плазмы Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины.

Борисов Юрий Сергеевич, д.т.н., профессор, Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины.

Девойно Юрий Олегович, аспирант каф. «Ремонт и эксплуатация автомобилей» Белорусского национального технического университета.

Беларусь, БНТУ, 220050, г. Минск, пр-т Независимости, 65.

Моделирование процесса плазменного напыления

Для компьютерного моделирования процесса плазменного напыления была использована математическая модель и программное обеспечение CASPSP [3], позволяющие рассчитывать тепловые и газодинамические характеристики турбулентной плазменной струи, генерируемой плазмотроном с гладким каналом, а также моделировать процессы движения и нагрева в такой струе напыляемых частиц с учетом зависимости их теплофизических свойств от температуры.

Расчет скорости и траектории движения напыляемой частицы проводился на основе уравнений движения, записанных в виде [3]:

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{F}; \quad \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{v}. \quad (1)$$

Здесь m – масса частицы,

$\mathbf{r}(t) = (x, y, z)$, $\mathbf{v}(t) = (v_x, v_y, v_z)$ – текущие значения радиус-вектора и скорости частицы,

$\mathbf{F}(\mathbf{r})$ – сила, действующая на частицу, находящуюся в струе плазмы.

Уравнения (1) интегрируются при следующих начальных условиях:

$$\begin{aligned} x|_{t=0} &= X_0; & y|_{t=0} &= 0; & z|_{t=0} &= Z_0; \\ v_x|_{t=0} &= -v_0; & v_y|_{t=0} &= 0; & v_z|_{t=0} &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где X_0, Z_0 – координаты точки выхода частицы из транспортного канала (рис. 1), v_0 – начальная скорость частицы, приобретаемая в потоке транспортирующего газа.