

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ ЗА СЧЁТ НАНЕСЕНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ КЛАСТЕРНОЙ СТРУКТУРЫ

© 2012 И. А. Докукина

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Создание структурноупорядоченных плазменных покрытий приводит к повышению их эксплуатационных свойств. Такая структура способствует локализации усталостных трещин и предотвращению их дальнейшего распространения. Проведено моделирование формирования такой структуры, которое позволяет определить оптимальные режимы для её получения.

Плазменные газотермические покрытия, кластерная структура, оптимальные режимы.

При эксплуатации деталей, работающих в условиях вибраций и высокотемпературной газовой коррозии, их разрушение в первую очередь обусловлено термоусталостными повреждениями [1, 2]. Во впадинах коррозионного или термоусталостного повреждения рождаются усталостные трещины, разрушающие деталь, если в материале детали не созданы специальные условия для её торможения.

Торможение роста усталостных трещин можно обеспечить нанесением на поверхность деталей специальных покрытий, обладающих такой структурой, которая локализует усталостную трещину в микрообъёме, не давая прорости ей до границы «покрытие – основа», а свойства межзёренных границ таковы, что трещина должна приводить к отделению только некоторого гарантированного по размерам микрообъёма покрытия с накопленными микроповреждениями. Происходит торможение развития микроповреждений в нижележащих зернах до удаления вышележащих, и процесс накопления в этих нижележащих зернах начинается, в отличие от однородных конструкционных материалов, каждый раз с более низкого уровня, что существенно снижает скорость эрозии специального структурированного покрытия.

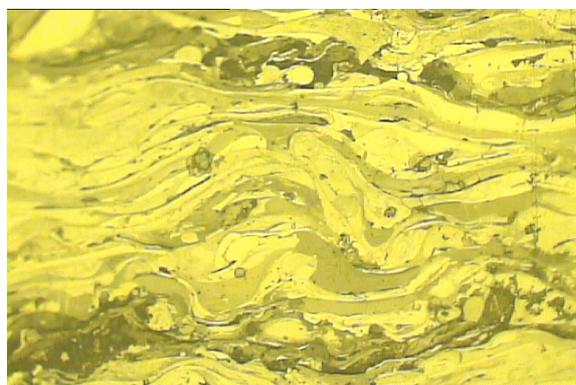
Получить упорядоченную структуру покрытий позволяет метод плазменного напыления из порошковых материалов. Этот метод позволяет получать покрытия, структура которых состоит из отдельных кластеров определённого размера.

Например, в покрытии, имеющем слоистую упорядоченную структуру, после испытаний на термостойкость трещина останавливается в слое покрытия на границе кластера (рис. 1).

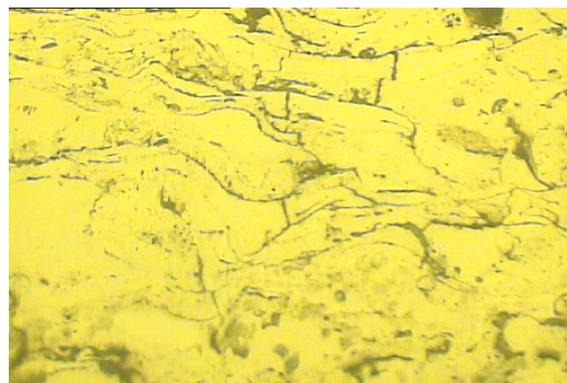
Характерная структура плазменного газотермического покрытия толщиной 0,3-0,6 мм имеет слоистый характер и состоит из дискообразных кристаллитов, расположенных вдоль поверхности конструкционного материала, горизонтальных и вертикальных границ между кристаллитами и микропустот (закрытых пор), расположенных в области вертикальных границ кристаллитов. Толщина каждого дискообразного кристаллита составляет 2-10 мкм и в 10-20 раз меньше его характерного горизонтального размера. Вертикальные границы кристаллитов ограничены с двух сторон монолитным материалом других дискообразных кристаллитов. В связи с этим покрытие не имеет сквозных пор, а процентное содержание закрытой пористости варьируется режимами напыления в пределах 2-12%. Практика показывает, что такие покрытия из соответствующих материалов гарантируют эффективную защиту конструкционных материалов от коррозии, в том числе, от высокотемпературной газовой коррозии. Адгезионная и когезионная прочность покрытия на сжатие и сдвиг значительно превышает аналогичные показатели прочности покрытия на растяжение. Однако, как показывает практика, адгезионная прочность покрытия на отрыв, диагностируемая величиной 25-45 МПа, и

когезионная прочность на растяжение, составляющая только 0,4-0,8 прочности монолитного материала, обеспечивают их работоспособность во всех известных случаях сложного высоконагруженного применения из-за их эксплуатации в условиях действия сжимающих или сдвигающих внешних механических усилий. Одной из главных особенностей такой структуры плазменных покрытий является её высокая демпфирующая способность к знакопеременным механическим и температурным напряжениям, а также способность локализовать усталостные повреждения и микротрещины внутри зерна кристаллита, не давая им возможности прорасти до конструкционного материала основы (рис. 1,б).

Структуру, подобную слоистой дискообразной структуре плазменных покрытий, часто создают в приповерхностном слое изделий для повышения их предела выносливости, обрабатывая поверхность методами поверхностного пластического деформирования. Возможности этих методов в создании дискообразных кристаллитов в монолитных материалах существенно меньше возможностей метода осаждения плазменных покрытий из порошковых материалов. Хотя наводимые методами поверхностного пластического деформирования сжимающие остаточные напряжения сами являются эффективным приёмом повышения выносливости изделий, эти методы можно использовать для отдельных видов плазменных покрытий.



а)



б)

Рис. 1. Структура кластерного покрытия после напыления (а) и после длительных испытаний термоциклированием (б)

Часто встречается мнение о необходимости повышения качества плазменных покрытий за счёт их уплотнения и создания беспористых структур. Наш опыт показывает, что такая структура эффективна только в качестве небольшого по толщине слоя на типовой структуре плазменного покрытия специального назначения (например, теплозащитного), так как беспористая монолитная структура по всей толщине плазменного покрытия приводит к существенному повышению долговечности его эксплуатации при знакопеременных механических и термических напряжениях по сравнению с типовой структурой покрытия.

Физическая природа образования слоистой структуры из дискообразных кристаллитов при получении плазменных покрытий связана с последовательным осаждением ускоренных и нагретых в плазменной струе частиц порошкового материала, которые из-за удара о поверхность и последующей пластической деформации приобретают дискообразную форму.

Упорядоченность структуры покрытий в большей степени зависит от дисперсности материала, нагрева и ускорения порошкового материала плазменной струей, протекания процессов упругого и упруго-пластического деформирования частиц на основе и развития гетерогенного топомеханического взаимодействия на контактных поверхностях.

Принципиально важным для понимания возможностей плазменного газотермического метода в обеспечении

эксплуатационных свойств покрытий являются ответы на следующие вопросы. Какова природа и какие факторы обеспечивают прочность закрепления частиц на основе, какими факторами определяется геометрическая форма кластера после его закрепления на основе, каковы возможности процесса в обеспечении прочности закрепления частиц на уже сформировавшихся кластерах структуры, каково влияние остаточных напряжений и деформаций на гетерогенную прочность формируемого покрытия и т.д.

Несмотря на достаточно многочисленные исследования в области плазменного напыления, полученные результаты характеризуются в основном исследованиями по схеме «режим получения – свойства покрытий». Для постановки задач моделирования формирования покрытия из кластеров определённого размера необходимо конкретизировать диапазоны рассматриваемых параметров процесса, конкретизировать используемые экспериментальные факты и дать соответствующие оценки возможностям реализации тех или иных физических процессов [3,4].

С целью определения требований к дисперсности напыляемого материала и обоснованному назначению режимов формирования кластерной структуры покрытий проведено математическое моделирование процессов нагрева и ускорения порошкового материала плазменной струей и процессов упругого и упруго-пластического деформирования частиц при формировании слоя покрытия.

Для реализации эффекта структурной упорядоченности кластеров в покрытии в качестве основной схемы эволюции формы частиц при ударе и последующем деформировании примем схему, приведённую на рис.2.

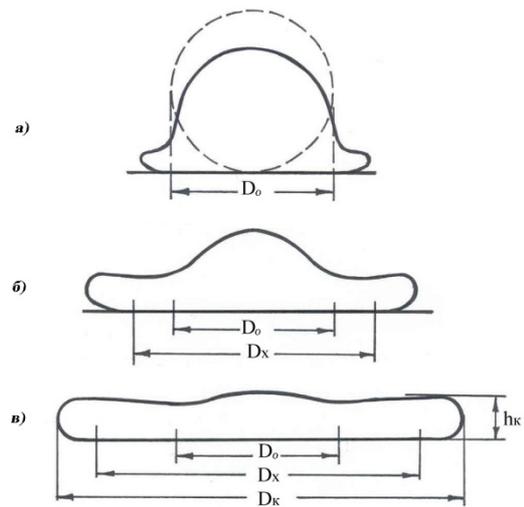


Рис. 2. Схема деформирования напыляемой частицы после её удара об основу. а) стадия действия импульсного давления; б) деформация под действием напорного давления; в) окончательный вид затвердевшей частицы

Такая схема эволюции формы частицы на поверхности может быть реализована на практике. Этапы такой эволюции были зафиксированы сверхскоростной киносъёмкой [2], параметры частиц после деформации были измерены для различных сочетаний материалов частиц и основы и различных значений v_0 и D_0 .

Было установлено, что степень деформации k_d первоначально сферических частиц диаметра D_0 для почти 40 сочетаний различных материалов изменяется в пределах [2]:

$$k_d = h_k / D_0 = (0,1...0,05), \quad (1)$$

где h_k – высота затвердевшего диска (рис.2).

Следовательно, несмотря на реализуемое на практике многообразие форм затвердевших частиц (несдеформированных, раздробленных на мелкие фракции и т.д.), структурная упорядоченность кластеров продемонстрирована на различных сочетаниях материалов.

Для количественной оценки структурной упорядоченности введём коэффициент структурной упорядоченности k , определяемый соотношением:

$$k = D_k / h_k > 1, \quad (2)$$

где D_k – диаметр образованного цилиндрического диска на поверхности (рис.2). Используя сохранение объёма материала при его растекании, получим, что коэффициент структурной упорядоченности

(2) связан со степенью деформации частицы (1) соотношением:

$$k = \sqrt{2/3k_0^3} \quad (3)$$

и для приведенных (1) степеней деформации изменяется в пределах $k = 26...74$, т.е. чем больше величина k , тем в большей степени реализуется эффект структурной упорядоченности.

Проведено математическое моделирование процессов упругого и упруго-пластического деформирования частиц при формировании слоя покрытия. Для расчёта деформации частиц при нанесении покрытий на напыляемые поверхности разработан программный комплекс, определяющий степень деформации частиц в зависимости от их характеристик. Рассматривается неупругая деформация малых частиц, ударяющихся о поверхность на больших скоростях под прямым углом.

При расчётах использовалась формула [4]:

$$\int_{h_0}^{h_k} \frac{S_c(h)dh}{V_{неод}(h)} = -\frac{c(m+1)}{2\sigma_S m} \left(\frac{\rho v_0^2}{c} \right)^{\frac{m}{m+1}}, \quad (4)$$

где h_0, h_k – линейные размеры недеформированной части частицы вдоль оси подлёта к поверхности в момент столкновения с поверхностью и после завершения деформации, соответственно; $S_c(h)$ – функция площади сечения частицы в точке h ; $V_{неод}(h)$ – функция объёма недеформированной части, c – параметр упрочнения; σ_S – предел текучести материала в зависимости от степени нагрева; ρ – плотность материала частицы; v_0 – скорость частицы в момент соприкосновения с поверхностью.

Задавая форму частицы и расчётные параметры $c, m, \sigma_S, \rho, v_0$, можно определить конечную величину размера недеформированной части по формуле (4) и рассчитать коэффициент деформации:

$$\xi_0 = 1 - \frac{V_{неод}(h)}{V_0}. \quad (5)$$

Правая часть формулы (4) не зависит от формы частицы, и поэтому её можно заменить параметром k :

$$k = -\frac{c(m+1)}{2\sigma_S m} \left(\frac{\rho v_0^2}{c} \right)^{\frac{m}{m+1}}. \quad (6)$$

Если рассматривать частицу формы круглого стержня высотой h_0 и радиуса r , то отношение функции площади сечения к функции объёма недеформированной части примет вид:

$$\frac{S_c(h)}{V_{неод}(h)} = \frac{\pi r^2}{\pi r^2 h} = \frac{1}{h}. \quad (7)$$

Тогда формула (4) примет вид:

$$\ln \frac{h_k}{h_0} = k \Rightarrow h_k = h_0 e^k. \quad (8)$$

Коэффициент деформации (5) в таком случае определяется как:

$$\xi_0 = 1 - \frac{\pi r^2 h_0 e^k}{\pi r^2 h_0} = 1 - e^k. \quad (9)$$

Для частицы шарообразной формы данные расчёты принимают более сложный вид:

$$\frac{S_c(h)}{V_{неод}(h)} = \frac{\pi(2rh - h^2)}{\pi h^2(r - h/3)} = \frac{6r - 3h}{h(3r - h)}. \quad (10)$$

Учитывая $h_0 = 2r$, формула (4) для шара примет вид:

$$\ln \frac{h_k^2(3r - h_k)}{4r^3} = k. \quad (11)$$

Для определения коэффициента деформации необходимо вычислить значение h_k , найдя вещественное решение следующего уравнения на интервале $[0, 2r]$:

$$-h_k^3 + 3rh_k^2 - 4r^3 e^k = 0. \quad (12)$$

Подставив h_k в выражение для расчёта недеформированной части $V_{неод}(h_k) = \pi h_k^2(r - h_k/3)$, по формуле (5) определим коэффициент деформации.

С целью автоматизации расчётов, был разработан автоматизированный программный комплекс. Для проведения расчётов вводятся значения следующих параметров в системе СИ: предел текучести, параметр упрочнения, плотность материала частицы, интервал скоростей частицы, для

которого необходимо рассчитать деформации, величину параметра m и радиус (шарика или поперечного сечения стержня). Строится кривая зависимости степени деформации частицы от её скорости подлёта к поверхности в соответствии с заданными характеристиками материала частицы (рис.3).

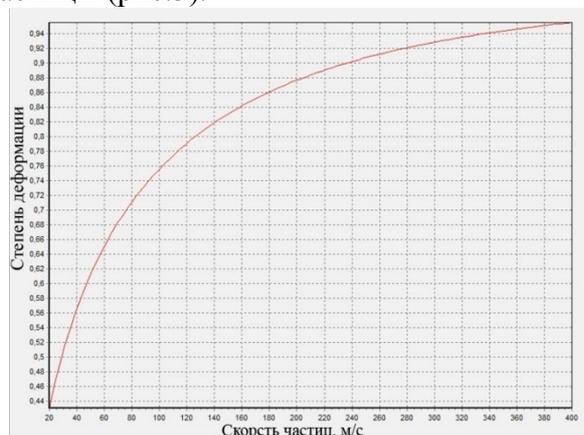


Рис. 3. Зависимость степени деформации частиц от скорости для расчёта деформаций

Для определения скорости и степени нагрева частиц проведено математическое моделирование движения частиц различной дисперсности в плазменном потоке (рис. 4). Произведен расчёт геометрических параметров плазменной струи, распределения температур и скорости потока по её сечению и вдоль её оси, что позволило рассчитать изменение скорости и температуры порошка при его движении в плазменной струе [3].

Результаты математического моделирования позволяют при напылении порошков определённого состава и дисперсности определить режимы получения покрытий кластерной структуры.

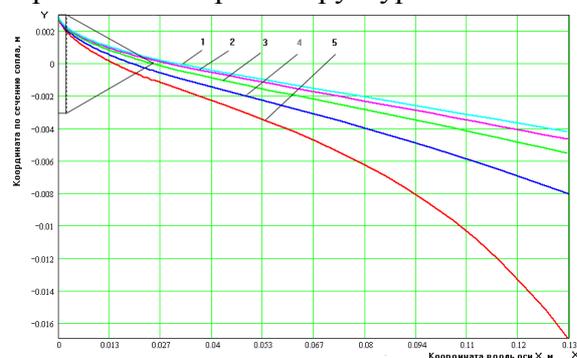


Рис. 4. Траектории движения частиц за ядром плазменной струи в зависимости от их диаметра: 1 - 80 мкм, 2 - 60 мкм, 3 - 40 мкм, 4 - 20 мкм, 5 - 10 мкм

Исследования эксплуатационных свойств покрытий показали, что покрытия, полученные из порошков узкой дисперсности с сформированной упорядоченной кластерной структурой, обладают более высокими показателями износостойкости, термостойкости и жаростойкости [5].

Библиографический список

1. Барвинок, В.А. Плазма в технологии, надежность, ресурс [Текст] / В.А. Барвинок - М.: Наука и технологии, 2005. 456с.
2. Кудинов, В.В. Плазменные покрытия [Текст] / В.В. Кудинов - М.: Наука, 1977. - 184 с.
3. Барвинок, В.А. Физическое и математическое моделирование динамики движения дисперсных частиц в плазменной струе [Текст] / В.А. Барвинок, В.И.Богданович, И.А. Докукина и др. // Известия Самарского научного центра РАН, Спец. выпуск, Самара. - 2008. - Том 3. -С. 83-96.
4. Докукина, И.А. Теоретические исследования формирования мезоструктурно-упорядоченных кластерных структур в плазменных покрытиях [Текст] / И.А. Докукина // Международный журнал «Проблемы машиностроения и автоматизации». - М., 2009. - №4.- С. 106-112.
5. Докукина, И.А. Исследование структуры и свойств теплозащитных плазменных покрытий [Текст] / И.А. Докукина // Международный журнал «Проблемы машиностроения и автоматизации». - М., 2011. - №3.- С. 91-97.

INCREASE OF OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF DETAILS AT THE EXPENSE OF DEPOSITIONS PLASMA THERMAL SPRAY COATINGS CLUSTER STRUCTURE

© 2012 I. A. Dokukina

Samara State Aerospace University
named after academician S.P. Korolyov (National Research University)

Creating the structure of ordered clusters of plasma coating enhances performance properties of coatings. This structure facilitates the localization of fatigue cracks and prevent their further spread. The simulation of the formation of such a structure, which allows to determine the optimal modes of deposition of different materials.

Plasma thermal spray coatings, cluster structure, the optimal mode.

Информация об авторе

Докукина Ирина Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: barvinok@ssau.ru. Область научных интересов: плазма, плазменные покрытия, упорядоченные структуры с заданным свойством, математическое моделирование.

Dokukina Irina Aleksandrovna, Candidate of Technics, associate professor of the Department of air and space craft manufacture and quality management in engineering. Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: barvinok@ssau.ru. Area of research: plasma, plasma coverings, the ordered structures with the set property, mathematical modeling.