

Установлено, что максимальная прочность адгезии составила 36 МПа при температуре основы ≈ 50 °К, при дальнейшем же разогреве подложки до 700 °К и выше происходит спад прочности до 22 МПа. Наибольшая твердость покрытия составила 750 HV, но при нагреве основы свыше 560 °К резко падает до 450 HV. Данное обстоятельство может быть объяснено полной кристаллизацией аморфной составляющей и потерей материалом его начальных свойств.

Исследования показали, что по мере возрастания в напыляемом порошке содержания высокотвердых частиц аморфного сплава до 40–50 % происходит последовательное возрастание прочности адгезии с основой и твердости покрытия, которые стабилизируются на уровне, соответственно, 60–75 МПа и HRC 64–68. Повышение механических свойств сопровождается снижением пористости покрытия вплоть до 2–4 % для разработанной композиции при ощутимом улучшении его триботехнических свойств: износ на уровне 1,6–1,7 мкм/10³ м, коэффициент сухого трения по стали – 0,19–0,20, износ поверхности равномерный.

Литература

1. Коробов, Ю. С. Основные методы и материалы газотермического напыления / Ю. С. Коробов, В. И. Панов, Н. М. Разиков. – Екатеринбург : Урал. ун-т, 2016. – 80 с.
2. Стасенко, Д. Л. Процесс получения сферических порошков и дискретных волокон методом высокоскоростной закалки расплава / Д. Л. Стасенко, М. Н. Верещагин // Изв. НАН Беларуси. Серия физ.-техн. наук. – 2003. – № 10. – С. 1–63.
3. Коррозионностойкие, жаростойкие и высокопрочные стали и сплавы : справ, изд. / А. П. Шлямнев [и др.]. – М. : Промметсплав, 2008. – 336 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНКИ ПОКРЫТИЯ ЕДИНИЧНОЙ КАПЛИ ПРИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОМ НАПЫЛЕНИИ НА ПОВЕРХНОСТЬ

В. Ю. Процко

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Научный руководитель Д. Л. Стасенко

Процесс газотермического напыления покрытий основан на взаимодействии с поверхностью обрабатываемого изделия частиц расплава, которые, растекаясь, деформируются и заполняют все поры и неровности заготовки, что позволяет сформировать защитный слой. Процесс растекания капли расплава по твердой поверхности состоит из трех последовательных стадий – образование из капли пленки, утончение пленки при растекании, затвердевание. Получена аналитическая зависимость для определения конечных размеров растекающейся по поверхности заготовки капли расплава. Рассмотрен процесс растекания капли расплава высокопрочного сплава на основе железа, из которого видно, что для того чтобы получить наименьшие по высоте размеры частицы, необходимо, чтобы исходные размеры капель, попадающих на поверхность кристаллизатора, были минимальными, при этом скорость их полета должна быть максимальной.

Ключевые слова: газотермическое напыление, расплав, растекание капли, энергия капли.

При газотермическом напылении покрытий происходит взаимодействие с поверхностью обрабатываемого изделия частицы расплава, которые, растекаясь, деформируются и заполняют все поры и неровности заготовки, что позволяет сформировать защитный слой, обладающий высокими эксплуатационными характеристиками. Однако

при формировании покрытия возникают следующие недостатки: наличие пористости и других видов несплошностей (2–15 %), сравнительно невысокая адгезионная и когезионная прочность покрытия (максимальные значения составляют 80–100 МПа) [1].

Процесс растекания капли расплава по твердой поверхности можно разделить на три последовательные стадии: 1) на начальной стадии капля под воздействием капиллярных сил и кинетической энергии превращается в плоскую «лужицу»; 2) происходит дальнейшее растекание жидкости со степенной зависимостью расстояния от времени; 3) на последней стадии скорость растекания быстро уменьшается и растекание прекращается [2].

Поэтому анализ формирования пленки из капли расплава является важной задачей, обуславливающей формирование эксплуатационных свойств получаемого покрытия.

Цель работы заключается в определении толщины пленки покрытия единичной капли при газотермическом напылении на поверхности вращающейся заготовки.

Формирование покрытия связано с процессом растекания расплава по поверхности заготовки. Второй стадии растекания расплава препятствует, главным образом, вязкое сопротивление жидкого металла, на который расходуется запас свободной поверхностной энергии. Для случая линейной задачи имеет место следующий закон перемещения фронта жидкого металла, который подчиняется уравнению [2]:

$$X = \left(\frac{3m_{\text{ж}} \Delta\sigma_{\text{ж}}}{2\eta_l \rho_l \xi} \right)^{1/3} \cdot t^{1/3}, \quad (1)$$

где X – расстояние от центра капли с массой $m_{\text{ж}}$; η_l, ρ_l – вязкость и плотность жидкого металла; ξ – коэффициент, учитывающий неоднородность толщины слоя расплава ($\xi = 10$).

Процесс растекания капли расплава условно можно разделить на два этапа: кинематический и диффузионный. При кинематическом этапе происходит перемещение периметра смачивания под действием тянущего усилия $\Delta\sigma_{\text{ж}}$, а второй этап характеризуется доставкой массы жидкости к периметру смачивания за счет объемных сил. При изотермическом процессе термодинамическая сила $\Delta\mu_l$ определяет тянущее усилие $\Delta\sigma_{\text{ж}}$ на периметре смачивания:

$$\Delta\mu_l = \Delta\sigma_{\text{ж}} = \sigma_T - \sigma_{T-\text{ж}} - \sigma_{\text{ж}} \cos \theta. \quad (2)$$

Скорость перемещения жидкого металла с учетом выражения (2) описывается следующим уравнением:

$$V_{\text{ж}} = k \Delta\sigma_{\text{ж}}, \quad (3)$$

где k – коэффициент пропорциональности, определяемый в начальный момент по скорости растекания V^0 и угле смачивания $\theta = \theta_0$. С учетом уравнения Юнга соотношение для радиуса растекания жидкого металла примет следующий вид:

$$\Delta\sigma_{\text{ж}} = \sigma_{\text{ж}} (\cos \theta_0 - \cos \theta). \quad (4)$$

Используя соотношения (3) и (4), можно оценить величину скорости растекания капли жидкого металла по поверхности заготовки, а также режимы смачивания.

Теоретический анализ полной системы уравнений движения вязкой несжимаемой жидкости [2] показывает, что кинетика растекания тонкого слоя при $\delta_k \ll r_{kp}$ расплава описывается следующим соотношением:

$$r_{kp} = \left(\frac{4\Delta\sigma_{ж} m_{ж}}{\pi\mu_l \rho_l \alpha} \right)^{1/4} \cdot t^{1/4}, \quad (5)$$

где $\Delta\sigma_{ж} = k_1(\sigma_T - \sigma_{ж}) - \sigma_{ж}$, k_1 – коэффициент шероховатости подложки; $m_{ж}$ – масса капли расплава; μ_l , ρ_l – вязкость и плотность расплава; δ_k – толщина слоя, $\alpha > 1$ – поправочный коэффициент учитывающий повышение гидравлического сопротивления слоя.

Соотношение (5) справедливо при выполнении условий квазистационарности ($t \gg \frac{\rho_l \delta_k^2}{\mu_l}$) и безинерционности ($Re \ll r_{kp} / \delta_k$).

Кинетическую энергию капли жидкого металла, летящей со скоростью V_r в направлении закалочной поверхности, можно рассчитать по следующей формуле:

$$E = 0,5\rho_l V_l V_r^2, \quad (6)$$

где V_l , ρ_l – объем и плотность расплава. Если предположить, что температура расплава постоянна до окончания кристаллизации и приобретения пленкой расплава конечной формы, а также если пренебрегать кривизной боковой поверхности полученной пленки на цилиндрической поверхности диска-кристаллизатора, процесс утонения пленки расплава можно рассматривать с момента принятия капель формы цилиндра с квадратным осевым сечением высотой h_k и объемом $V_r = (\pi h_k^3)/4$.

Кинетическую энергию, необходимую для перевода сферической капли в тонкую пленку на охлаждающей поверхности кристаллизатора, можно найти из следующего выражения:

$$E = \frac{1}{2} \rho_l V_k \left(0,5 \frac{dh_k}{dt} \right)^2. \quad (7)$$

Совместное решение уравнений (6, 7) позволяет получить выражение для нахождения конечных размеров растекающейся по поверхности заготовки капли расплава, т. е. пленки затвердевшего металла:

$$h_k = 0,406 \left(\frac{v}{\rho_l V_0} \right)^{0,178} \cdot h_{k0}^{0,822}. \quad (8)$$

Для анализа полученной зависимости рассмотрим процесс растекания капли расплава высокопрочного сплав на основе железа $Fe_{75,49}Cr_1Ni_{2,5}Al_6Ca_{0,06}V_{3,1}P_{0,2}Si_{7,5}Mg_{0,05}C_{1,2}Mn_{2,9}$. В качестве исходных данных были приняты следующие параметры:

Кинематическая вязкость и плотность расплава при температуре 1550 °С:

$$V_1 = 729,023 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}; \quad \rho_1 = 7270 \text{ кг/м}^3.$$

Скорость полета капли расплава:

$$V_{01} = 2 \text{ м/с}; \quad V_{022} = 5 \text{ м/с}; \quad V_{023} = 10 \text{ м/с}; \quad V_{024} = 20 \text{ м/с}.$$

Начальный диаметр порошка:

$$d_1 = 10 \cdot 10^{-6} \text{ м}; \quad d_2 = 50 \cdot 10^{-6} \text{ м}; \quad d_3 = 100 \cdot 10^{-6} \text{ м}; \quad d_4 = 150 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Зависимости конечных размеров растекающейся по поверхности кристаллизатора капли расплава от размеров капли при различных скоростях полета капли, представлены на графиках (рис. 1).

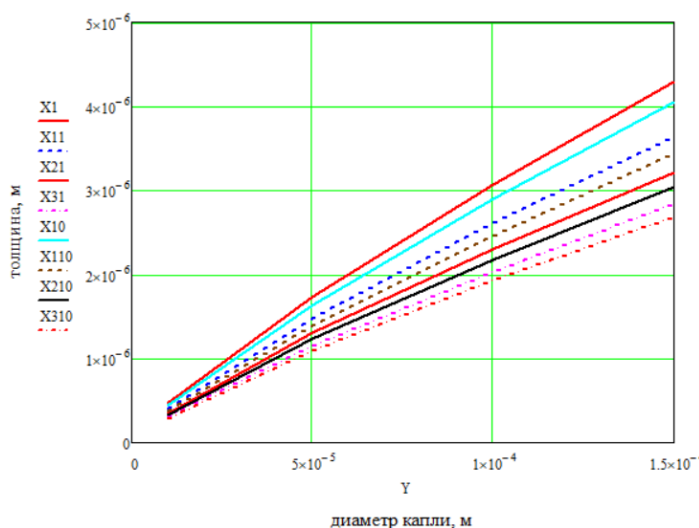


Рис. 1. Результаты расчета по определению толщины пленки, полученной из капли расплава при различных начальных условиях (линии меняются от скорости капли)

Из графиков можно видеть, что с увеличением исходных размеров капли d_c увеличивается высота растекающейся капли h_k , а с увеличением скорости полета капли V_0 высота растекающейся капли h_k уменьшается. Из этого же можно сделать вывод, что для того чтобы получить наименьшие по высоте размеры частицы, необходимо, чтобы исходные размеры капель, попадающих на поверхность кристаллизатора были минимальными, а скорость их полета должна быть максимальной.

Литература

1. Коробов, Ю. С. Основные методы и материалы газотермического напыления / Ю. С. Коробов, В. И. Панов, Н. М. Разиков. – Екатеринбург : Урал. ун-т, 2016. – 80 с.
2. Стасенко, Д. Л. Процесс получения сферических порошков и дискретных волокон методом высокоскоростной закалки расплава / Д. Л. Стасенко, М. Н. Верещагин // Изв. НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2003. – № 10. – С. 1–63.