

УДК 621.793.722

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ДЕТАЛЕЙ ПРИ
КОМБИНИРОВАННОМ ПЛАЗМЕННОМ НАПЫЛЕНИИ С
ОДНОВРЕМЕННЫМ ОПЛАВЛЕНИЕМ ВЫНОСНОЙ
МОДУЛИРУЕМОЙ ДУГОЙ

Кадырметов А.М., Иванников В.А.,
Бухтояров В.Н. (ФГБОУ ВПО ВГЛТА)

Одной из прогрессивных технологий, позволяющей наносить износостойкие покрытия, не изменяя сопротивление усталости основного материала, является плазменное напыление. Однако покрытия, формируемые данным способом, не всегда обеспечивают необходимой прочности, как самого покрытия, так и соединения его с основой. Для устранения данного недостатка можно применять последующее силовое, термо-силовое, термическое воздействие на покрытие, либо их одновременное действие с напылением.

Одним из таких методов является применение метода напыления с одновременным оплавлением выносной модулируемой дугой. Модуляция электрических параметров заключается в наложении импульсов тока на постоянный ток дуги. Импульс создается от заряда, накопленного в ем-кости конденсатора. Заряд и разряд осуществляется открытием и закрытием тиристорного моста, в который заключена емкость.

Применение данного метода, позволяет снизить затраты труда и энергии, повысить эффективность процесса, за счет совмещения напыления и оплавления. При этом способе дистанция напыления находится в пределах 20 ... 35 мм, тогда как при классическом напылении дистанция равна 150 ... 200 мм. В результате повышается вложение энергии в покрытие, что позволяет оплавить покрытие на заданную глубину [1].

Качество покрытий, получаемых совмещением процессов нанесения с помощью косвенной дуги с оплавлением выносной модулируемой дугой, обеспечивается оптимизацией температурных режимов напыления. Необходимо подобрать такие режимы, чтобы оплавить переходную зону «покрытие-основа». Как перегрев, так и недогрев ухудшает качество нанесения покрытия.

При недогреве ухудшаются прочностные характеристики (адгезионная и когезионная связь) покрытия. При излишнем подводе теплоты происходит окисление поверхности и ухудшение структуры покрытия (усиление процессов рекристаллизации и отпуска основы), приводящее к разупрочнению материала подложки и короблению детали. При формировании покрытия на детали с использованием только одного режима возможно получение неоднородной структуры в разных местах напыляемой поверхности (закаленной в начале и отпущенной в конце процесса). Сформированное покрытие характеризуется остаточными напряжениями, которые рассчитываются на основании распределения температурных полей в детали в момент времени, соответствующему нулевому напряжению в покрытии, т. е. во время его образования [2].

Для расчета остаточных напряжений, обеспечения однородности свойств покрытия и оценки его надежности в условиях эксплуатации, прежде всего, необходимо знать поле температур на поверхности детали при нанесении покрытия.

Рассмотрим задачу определения температурного поля в цилиндре при нагреве его косвенной и прямой (выносной) дугами, движущимися по винтовой линии. Факторами процесса являются тепловые мощности косвенной q_k и выносной q_v дуг, амплитуды Δq_k , Δq_v и длительности τ_k , τ_v их импульсов, частота модуляции ν_m , шаг винтовой линии H , линейная скорость перемещения дуг относительно поверхности V , радиус R и длина l цилиндра.

При разработке модели тепловых процессов были приняты следующие допущения:

- 1 Источники тепла сосредоточены в элементарном точечном объеме на поверхности цилиндра и равномерно перемещаются по винтовой линии изделия с постоянной скоростью ($V = const$).
- 2 Распространение тепла в теле происходит по закону теплопроводности Фурье.
- 3 Привязка выносной дуги находится в центре пятна напыления.
- 4 Коэффициенты теплофизических свойств основного металла (коэффициент теплопроводности и объемная теплоемкость) не зависят от температуры.
- 5 Фазовые и структурные превращения металла покрытия происходят без выделения и поглощения тепла.

Математическая модель теплообмена при обработке поверхности цилиндра косвенной и выносной дугами базируется на теории тепловых процессов при сварке Н.Н. Рыкалина [4] и моделях В.И. Махненко [5]. Воспользуемся для этого схемой мощного быстродвижущегося источника тепла. В этом случае считается, что в зоне за источником уже на некотором расстоянии от начала напыления тепло распространяется в основном в плоскости, перпендикулярной к линии наплавки.

Температурное поле можно представить в виде суммы двух полей: общего поля вдали от источника T_{Σ} , местного поля вблизи него T_{ng} и начальной температуры T_0 :

$$T(r, z, \Theta, t) = T_{\Sigma}(r, z, \Theta, t) + T_{ng} + T_0, \quad (1)$$

где r, z, Θ – цилиндрические координаты, связанные с источником, соответственно: радиус, продольная и угловая координаты; t – время; T_0 – начальная температура.

В безразмерных параметрах распределение температуры определится такой зависимостью как:

$$g(\rho, \xi, N) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sum_{i=0}^N \frac{\Phi_i(\rho, \tau_i)}{\sqrt{\tau_i}} \exp\left[-\frac{(\xi - \xi_i)^2}{4\tau_i}\right], \quad (2)$$

где N – количество витков; R – радиус цилиндра; a – коэффициент теплопроводности основы; $q_n = q/V_z$ – погонная энергия; q – тепловая мощность плазмотрона; $\Phi_i(\rho, \tau_i)$ – функция, характеризующая процесс распространения тепла по радиусу цилиндра.

Для расчета температурного поля в зоне напыления с достаточной для практических расчетов точностью, ее можно представить в виде:

$$g_{\Sigma} = \frac{1}{\sqrt{\pi\tau^*}} \sum_{i=1}^N \frac{\exp\left[\frac{-\xi_i^2}{4\tau^*}\right]}{\sqrt{i}} = (T_{\Sigma}R^2 \cdot c_{\gamma})/q_n, \quad (3)$$

где ξ – относительный шаг наплавки, $\xi=H/R$; τ^* – безразмерный критерий времени одного оборота источника, $\tau^*=at^*/R^2$.

Влияние последнего незаконченного витка $\mathcal{G}_{n\bar{6}}$ может быть оценено по схеме мощного быстродвижущегося источника на поверхности полубесконечного тела с помощью зависимости:

$$\mathcal{G}_{n\bar{6}} = \frac{1}{2\pi\tau} \exp\left[-\frac{h^{2*}}{4\tau}\right] m^{\bar{*}}; = (T_{n\bar{6}} \cdot R^2 \cdot c_\gamma) / q_n, \quad (4)$$

где $T_{n\bar{6}}$ – размерная температура последнего неполного витка; h^* – относительное расстояние исследуемой точки от поверхности цилиндра, $h^*=h/R$; $m^{\bar{*}}$ – поправка на ограниченность сечения цилиндра; τ – безразмерный критерий времени действия источника тепла от последнего незаконченного витка, отсчитываемого с момента пересечения источником полуплоскости, в которой находится исследуемая точка, $\tau=at/R^2$.

Основным параметром влияющим на температуру основы, является мощность плазматрона. В случае использования модуляции электрических параметров плазматрона его тепловую мощность можно представить в виде

$$q(t)=q_o+q'_{имп}, \quad (5)$$

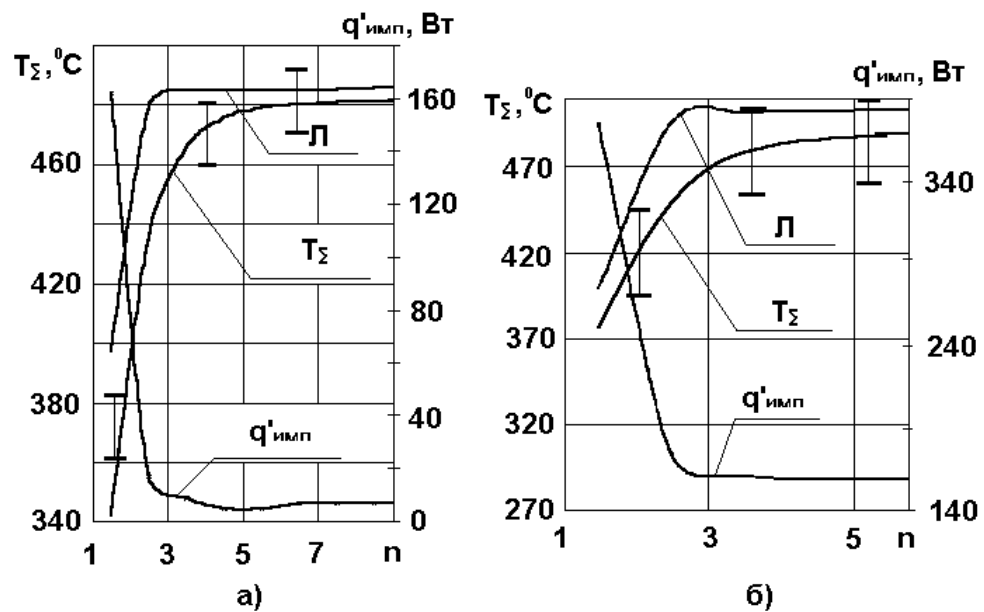
где q_o , $q'_{имп}$ – соответственно начальная и импульсная мощности плазматрона.

На основе формул (1) ... (5) была получена зависимость для расчета размерной температуры:

$$T_\Sigma(r, z, \theta, t) = \frac{q_n}{R^2 \cdot C_\gamma} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \sum_{n=1}^N \frac{\Phi(\rho, \tau_n)}{\sqrt{\tau_n}} \cdot \exp\left[-\frac{\xi^2 \cdot n^2}{4 \cdot \tau_n}\right], \quad (6)$$

$$\tau_n = \frac{2\pi a}{V_\theta} \cdot n; \quad \xi = \frac{H}{R}, \quad (7)$$

где n – количество оборотов.



а) шатунная шейка; б) коренная шейка; л – температура от нагрева предыдущих витков, соответствующая температуре ликвидус, покрытия

Рисунок 1 – Распределение температуры шеек T_{Σ} коленчатого вала по виткам напыления n при различных значениях импульсной мощности $q'_{имп}$

По представленной модели были проведены расчеты температурного поля, на примере коленчатого вала двигателя КАМАЗ. Результаты расчетов представлены на рисунке 1. Здесь же на графике показана кривая ликвидуса, за пределы которой выходить не желательно, так как покрытие может перегреться и стечь с поверхности.

Произведенный расчет показывает, что для обеспечения одинаковых тепловых условий, без перегрева целесообразно наносить покрытие сначала на все шатунные шейки по одному слою толщиной приблизительно 0,3 мм, затем на все коренные шейки по одному слою толщиной примерно 0,25 ... 0,3 мм. В случае необходимости нанесения более толстого покрытия весь процесс повторяется 2 ... 3 раза.

Эмпирические исследования представленные в виде поля (рисунок 1) показывают, что отклонение экспериментальных исследований от теоретических составляет 8 ... 10 %.

Предлагаемая модель позволяет подобрать необходимые режимы напыления, избегая перегрева оплавить покрытие на необходимую глубину, тем самым контролировать температурные напряжения и структурные изменения в этих покрытиях.

Библиографический список

- 1 Станчев, Д. И. Методы моделирования тепловых процессов при напылении и оплавлении деталей сложной формы / Д. И. Станчев, А.М. Кадырметов, В. Н. Бухтояров, А. В. Винокуров // Математическое моделирование, компьютерная оптимизация технологий, параметров оборудования и систем управления лесного комплекса: Межвуз. сб. науч. тр. / Под ред. проф. В. С. Петровского. Воронеж : ВГЛТА, 2001. – с.161-164.
- 2 Кудинов, В. В. Нанесение покрытий напылением: Теория, технология и оборудование / В. В. Кудинов, Г. В. Бобров – М. : Металлургия, 1992. – 432 с.
- 3 Рыкалин, Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н. Н. Рыкалин, – М. : Машгиз,1951. – 296 с.
- 4 Махненко, В. И. Тепловые процессы при механизированной наплавке деталей круговых цилиндров/ В. И. Махненко – Киев : “Наук. думка”, 1976. – 159 с.