

УДК 621.036:621.793

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОПЛАМЕННОГО ОПЛАВЛЕНИЯ НАПЫЛЕННОГО ПОКРЫТИЯ

д-р техн. наук, проф. В.С. ИВАШКО, канд. техн. наук В.Ч. ОСУЧУКВУ
(Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск),
д-р техн. наук, проф. М.Л. ХЕЙФЕЦ
(Полоцкий государственный университет)

Предложена модель, учитывающая динамическое воздействие газового потока на наплавляемый слой и нагрев напыленных покрытий газовой струей, позволяющая анализировать режимы и выбирать оптимальные параметры процесса оплавления. Показано, что при оплавлении заданной ширины и толщины покрытий минимальному времени температурного воздействия струи соответствует минимальный расход газа. Установлено, что при увеличении времени оплавления требуемый удельный расход газа уменьшается, а расход является минимальным в точке, определяющей оптимальные параметры оплавления.

Разработка новых и оптимизация существующих технологических процессов нанесения покрытий, и в частности оплавления напыленных покрытий, из самофлюсующихся материалов, а также совершенствование технологического оборудования затруднены ввиду сложности измерения параметров высокотемпературной струи. Поэтому наиболее целесообразно экспериментальные исследования новых технологических процессов предварять моделированием и расчетом основных параметров процесса.

Математической моделью процесса термомеханического воздействия на расплавленный материал покрытия является описание этого процесса, позволяющее найти зависимость расхода газовой смеси горючего газа и окислителя при оплавлении в области воздействия газового потока горелки [1].

Основой математического описания физических процессов, согласно предложенной схеме (рис. 1), являются законы термодинамики, теплофизики и механики деформируемого твердого тела [2].

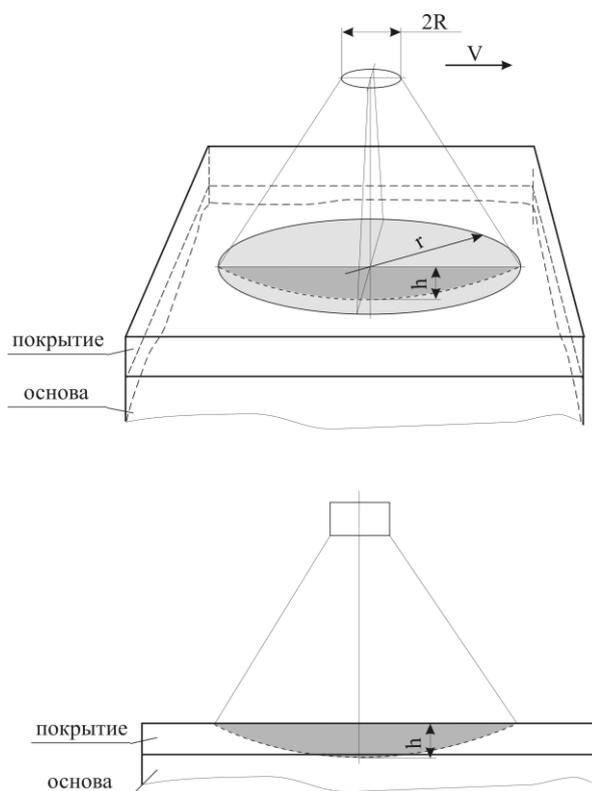


Рис. 1. Схема оплавления:

r – радиус пятна факела на поверхности; R – радиус сопла горелки;

V – скорость перемещения горелки вдоль поверхности;

h – глубина, на которую происходит оплавление поверхности в процесс обработки (толщина нанесенного слоя)

При оплавлении горелкой происходит динамическое воздействие на поверхность покрытия, что вызывает уплотнение материала покрытия. Скорость уплотнения определяется уравнением для скорости деформации Крива [3]:

$$u = \frac{P_{эфф} h}{\eta_0(T)}, \quad (1)$$

где $P_{эфф}$ – эффективное давление, оказываемое газовой смесью на поверхность; $\eta_0(T)$ – коэффициент вязкости материала покрытия.

Считая, что время обработки поверхности достаточно для оплавления покрытия, получаем:

$$u = \frac{h}{t}, \quad (2)$$

где t – время оплавления, определяемое соотношением:

$$t = \frac{2r}{v}. \quad (3)$$

Подставляя (1) в (3), получаем:

$$t = \frac{\eta_0(T)}{P_{эфф}}. \quad (4)$$

Эффективное давление:

$$P_{эфф} = \frac{F}{S}, \quad (5)$$

где $S = \pi r^2$ – оплаваемая площадь; F – сила воздействия газовой смеси на поверхность.

Полагая, что $Q = \frac{\partial V}{\partial t}$ – удельный расход газа, сила F определяется соотношением:

$$F = \frac{\rho \partial V}{\partial t} v_1 = \rho Q v_1, \quad (6)$$

где ρ – плотность газовой смеси; v_1 – скорость истечения газа.

Тогда для v_1 имеем:

$$v_1 = \frac{Q}{S_1}, \quad (7)$$

Площадь сопла:

$$S_1 = \pi R^2. \quad (8)$$

Поставляя (5) и (6) в (4) получаем:

$$P_{эфф} = \frac{\rho Q^2}{SS_1} = \frac{\rho Q^2}{\pi^2 R^2 r^2}. \quad (9)$$

Таким образом, исходя из уравнения (1) и подставляя (4) в (9), приходим к зависимости коэффициента вязкости материала оплаваемой поверхности от параметров процесса:

$$\frac{t}{\eta_0(T)} = \frac{\rho Q^2}{\pi^2 R^2 r^2}. \quad (10)$$

Как видно из (10), коэффициент вязкости обратно пропорционален плотности газовой смеси, квадрату расхода и прямо пропорционален времени воздействия, площади сопла и площади воздействия на оплаваемую поверхность в отдельно взятый момент времени.

Рассмотрим процесс оплавления с точки зрения теории термоактивного уплотнения [2]. Зависимость коэффициента вязкости от температуры T определяется уравнением:

$$\frac{\partial \eta_0(T)}{\partial T} = \frac{U}{R_0} \frac{\eta_0(T)}{T}, \tag{11}$$

где U – энергия активации; R_0 – универсальная газовая постоянная.

Решая дифференциальное уравнение (11), получаем:

$$\eta_0(T) = \eta_0 \cdot e^{\frac{U}{R_0 T}}. \tag{12}$$

Зависимость температуры поверхности при движении горелки от параметров процесса определяется соотношением:

$$T = -\frac{QW}{2\pi\lambda h} e^{\frac{rh}{a}}, \tag{13}$$

где λ – коэффициент теплопроводности металла; a – коэффициент температуропроводности; W – теплотворная способность.

Подставляя (10) в (12) и (13) получаем систему уравнений, которая характеризует рассматриваемый процесс:

$$\begin{aligned} \eta_0(T) &= \frac{\rho Q^2 \eta_0}{\pi^2 R^2 r^2} \cdot e^{\frac{U}{R_0 T}}, \\ T &= -\frac{QW}{2\pi\lambda h} e^{\frac{rh}{a}}. \end{aligned} \tag{14}$$

Система уравнений (14) позволяет определить связь между временем t и расходом Q при условии, что оплавление поверхности происходит на глубину h .

Для решения уравнения воспользуемся алгоритмом нелинейной оптимизации с помощью программного пакета Mathcad 2001 (MathSoft, Inc).

Зависимость расхода $Q_t = Qt$ при оплавлении поверхности ацетиленовой смесью и пропанокислородной смесью от времени воздействия t при глубине оплавления h для различных радиусов r пятна воздействия на поверхность с учетом исходных данных ($a = 8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $\lambda = 41,8 \text{ Дж/м}\cdot\text{с}\cdot\text{град}$; $\rho = 1,5 \text{ кг/м}^3$; $\eta_0 = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ Па}\cdot\text{с}$; $U = 1,84 \cdot 10^5 \text{ Дж/г}\cdot\text{атом}$) показаны на рисунках 2 – 4.

Из приведенного видно, что расход Q_t является минимальным в некоторой точке, определяющей оптимальные параметры наплавки.

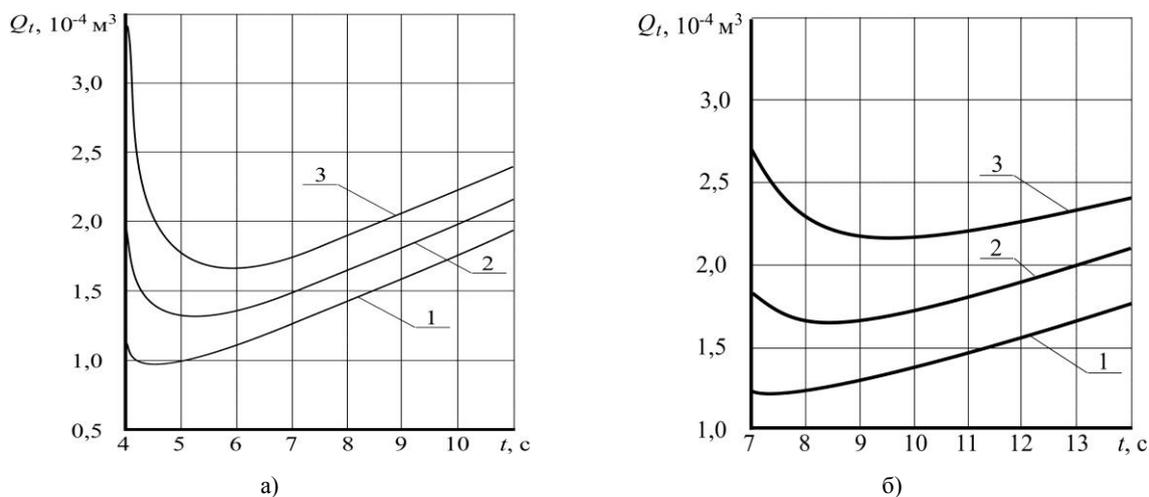


Рис. 2. Зависимость расхода ацетиленокислородной (а) и пропанокислородной (б) смесей Q_t с радиусом пятна факела r на поверхности от времени воздействия t при глубине оплавления $h = 1,0 \text{ мм}$: а) 1 – $r = 1,5 \text{ мм}$; 2 – $r = 2,0 \text{ мм}$; 3 – $r = 2,5 \text{ мм}$; б) $h = 1,0 \text{ мм}$; 1 – $r = 3,0 \text{ мм}$; 2 – $r = 4,0 \text{ мм}$; 3 – $r = 5,0 \text{ мм}$

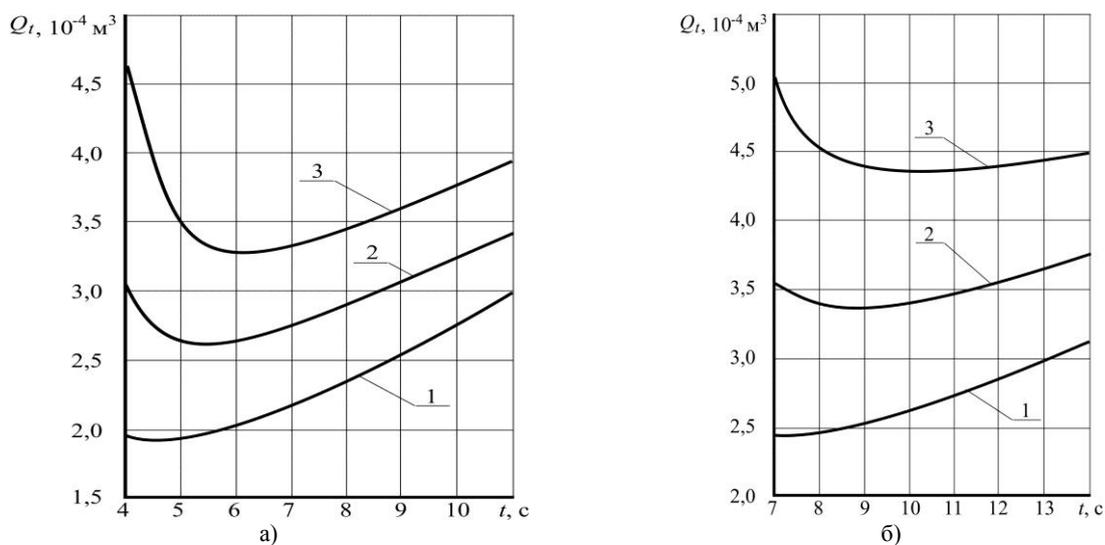


Рис. 3. Зависимость расхода ацетиленокислородной (а) и пропанокислородной (б) смесей Q_t с радиусом пятна факела r на поверхности от времени воздействия t при глубине оплавления $h = 1,5$ мм: а) 1 – $r = 1,5$ мм; 2 – $r = 2,0$ мм; 3 – $r = 2,5$ мм; б) $h = 1,0$ мм; 1 – $r = 3,0$ мм; 2 – $r = 4,0$ мм; 3 – $r = 5,0$ мм

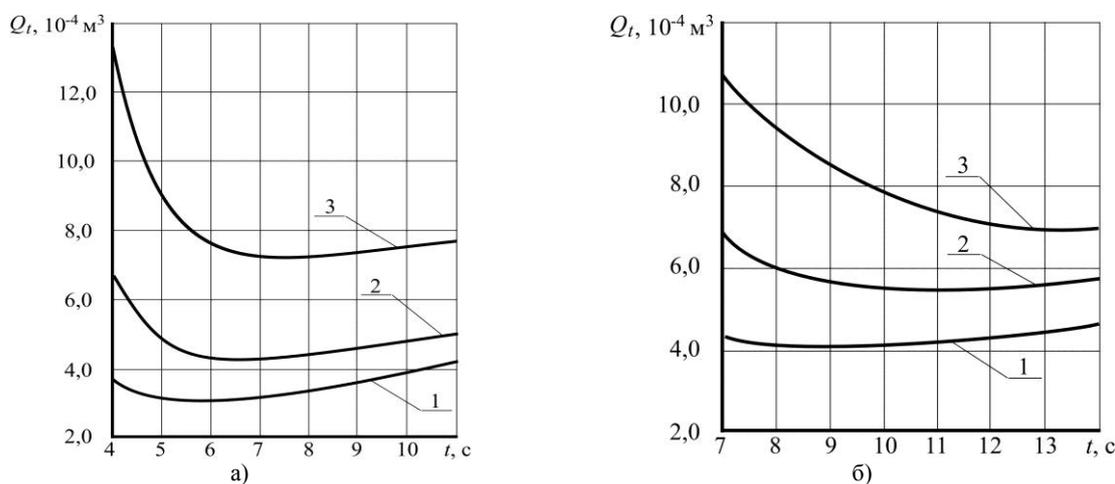


Рис. 4. Зависимость расхода ацетиленокислородной (а) и пропанокислородной (б) смесей Q_t с радиусом пятна факела r на поверхности от времени воздействия t при глубине оплавления $h = 2,0$ мм: а) 1 – $r = 1,5$ мм; 2 – $r = 2,0$ мм; 3 – $r = 2,5$ мм; б) $h = 1,0$ мм; 1 – $r = 3,0$ мм; 2 – $r = 4,0$ мм; 3 – $r = 5,0$ мм

Решая систему уравнений (14), определим конкретные режимы оплавления покрытий, исходя из расхода газов, толщины оплавляемого слоя с учетом рекомендуемой температуры на границе покрытия с основой (1050 °С).

В таблицах 1 и 2 приведены минимальные значения расхода и соответствующего времени оплавления для различных h и r .

Таблица 1

Оптимальные параметры оплавления при использовании ацетиленокислородного пламени

t, c	$Q_t, 10^{-4} m^3$	r, mm	h, mm
1	2	3	4
7,2	7,22	2,5	2,0
6,5	4,25	2,0	2,0
5,7	3,02	1,5	2,0
6,0	3,35	2,5	1,5
5,4	2,65	2,0	1,5
4,5	1,95	1,5	1,5
5,9	1,62	2,5	1,0
5,2	1,31	2,0	1,0
4,5	0,99	1,5	1,0

Таблица 2

Оптимальные параметры оплавления при использовании пропанокислородного пламени

t , с	Q , 10^{-4} м ³	r , мм	h , мм
13,2	6,85	5	2,0
11,1	5,52	4	2,0
9,1	4,12	3	2,0
10,5	4,45	5	1,5
8,7	3,44	4	1,5
8,0	2,47	3	1,5
9,5	2,21	5	1,0
8,2	1,65	4	1,0
7,3	1,25	3	1,0

Как видно из рисунков 2 – 4 и таблиц 1 и 2, при оплавлении заданной ширины и толщины покрытий из самофлюсующихся сплавов на основе никеля одноструйными горелками с уплотнением пор и проплавлением покрытия минимальному времени температурного воздействия струи соответствует минимальный расход (ацетилено- или пропан-бутаново-кислородной) смеси.

В результате параметры оптимального режима оплавления для глубины проплавления 1,5 мм и дистанции 30 мм при использовании в качестве горючего газа:

- пропан-бутановой смеси – время оплавления 8,0 с пятна радиусом 3 мм, для расхода смеси газов $2,47 \cdot 10^{-4}$ м³;

- ацетиленовой смеси – время оплавления 4,5 с пятна радиусом 1,5 мм, для расхода смеси газов $1,95 \cdot 10^{-4}$ м³.

Радиус пятна оплавления для пропанокислородной смеси принят в два раза больше, чем для ацетиленокислородной смеси, учитывая теплотворные свойства пропана и ацетилена.

Заключение

1. Предложена модель, учитывающая динамическое воздействие газового потока на наплавляемый слой и нагрев напыленных покрытий газовой струей и позволяющая анализировать режимы и выбирать оптимальные параметры процесса оплавления.

2. Показано, что при оплавлении заданной ширины и толщины покрытий из самофлюсующихся сплавов одноструйными горелками с уплотнением пор и проплавлением покрытия минимальному времени температурного воздействия струи соответствует минимальный расход смеси (ацетиленовой или пропан-бутановой).

3. Получены зависимости расхода газовой смеси горючего газа и окислителя при оплавлении, которые дают возможность прогнозировать качество покрытия и сокращать необходимое количество экспериментальных данных.

4. Установлено, что при увеличении времени оплавления требуемый удельный расход газа уменьшается и становится минимальным при оптимальных параметрах оплавления.

5. Определены параметры оптимального режима при глубине проплавления 1,5 мм, дистанции 30 мм при использовании в качестве горючего газа: пропан-бутановой смеси – время оплавления 8,0 с пятна радиусом 3 мм для расхода смеси газов $2,47 \cdot 10^{-4}$ м³; ацетиленовой смеси – время оплавления 4,5 с пятна радиусом 1,5 мм для расхода смеси газов $1,95 \cdot 10^{-4}$ м³.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ивашко В.С., Осучукву В.Ч. Моделирование процесса оплавления покрытий из самофлюсующихся сплавов // Математическое моделирование физических процессов и их свойства: Сб. науч. тр. 7-й междунар. науч. конф. / Под ред. Т.Н. Абрамовича. – Таганрог: ТГПИ, 2001. – С. 17 – 23.
2. Хейфец М.Л. Математическое моделирование технологических процессов. – Новоплоцк: ПГУ, 1999. – 104 с.
3. Дорожкин Н.Н. Упрочнение и восстановление деталей машин металлическими порошками. – Мн.: Наука и техника, 1975. – 152 с.