

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ ПОГРУЖЕНИЕМ В РАСПЛАВ

Белорусская государственная политехническая академия,

Минск, Беларусь,

Полоцкий государственный университет,

Новополоцк, Беларусь

Процесс индукционной наплавки погружением, заключающийся в том, что наплавляемый металл затвердевает на очищенной от оксидной пленки поверхности заготовки в расплаве этого металла, применяется для наращивания поверхностных слоев заготовки. После кратковременной выдержки заготовку извлекают из расплава и на ее поверхности получают слой присадочного металла [1]. Разница температур расплава T_1 и заготовки T_2 ($T_1 \gg T_2$), задает начальные условия процесса, локальный объем расплава, контактирующий с поверхностью заготовки определяется граничными условиями.

Для исследования тепло-массопереноса между поверхностями, сформированными на смежных переходах, проводилось моделирование температурных полей в рабочей зоне технологической системы.

Для получения математической модели технологического процесса считали, что сток тепла согласно принципу симметрии эквивалентен его распространению. Принимали плотность и теплопроводность материала детали и расплава равными, а ванну расплава – неограниченной. Для упрощения расчетов допускали, что ось шкалы температур направлена к абсолютному нулю, а за ноль этой шкалы принимали температуру расплава. Предполагали, что теплообмен в системе осуществляется только путем теплопроводности.

Измерение температуры бесконечной пластины, толщиной $2l$ в некоторой точке A (рис. 1) от мгновенного плоского источника через время τ [2, 3]:

$$dT_a = \frac{dQ}{F_{cp} \sqrt{4\pi\omega\tau}} \cdot e^{-\frac{x_a^2}{4\omega\tau}}, \quad (1)$$

где dQ – расход тепла через плоский мгновенный сток; F – площадь пластины; c – теплоемкость материала; ρ – плотность материала; ω – коэффициент теплопроводности; τ – время, прошедшее от начала процесса; x_a – расстояние от точки A до плоского мгновенного стока тепла.

$$\Delta T_a = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\Delta T_0 dx}{\sqrt{4\pi\omega\tau}} \cdot e^{-\frac{x_a^2}{4\omega\tau}},$$

где $x_1 = R - l$ – расстояние от точки А до ближней, а $x_2 = R + l$ – до дальней плоскости пластины.

Введя замену $u = \frac{x_a}{\sqrt{4\omega\tau}}$ получили:

$$\Delta T_a = \int_{u_1}^{u_2} \frac{\Delta T_0 \sqrt{4\omega\tau} du}{\sqrt{4\pi\omega\tau}} \cdot e^{-\frac{u^2}{2}}.$$

откуда:

$$\Delta T_a = \Delta T_0 \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{u_1} e^{-\frac{u^2}{2}} du - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{u_2} e^{-\frac{u^2}{2}} du \right] = \Delta T_0 [\Phi(u_2) - \Phi(u_1)],$$

где

$$\Phi(u_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{u_1} e^{-\frac{u^2}{2}} du; \quad \Phi(u_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{u_2} e^{-\frac{u^2}{2}} du,$$

После подстановки пределов интегрирования:

$$\Delta T_a = \Delta T_0 \left[\Phi\left(\frac{R+l}{\sqrt{4\omega\tau}}\right) - \Phi\left(\frac{R-l}{\sqrt{4\omega\tau}}\right) \right] \quad (4)$$

При индукционной наплавке погружением в расплав происходит фазовый переход-кристаллизация жидкого металла. Исходя из этого, действительное изменение температуры в точке А определяется из следующих соображений.

Если вычисленное значение $\Delta T_a \leq \Delta T_n \frac{c_{ж}}{c_m}$, то принимается $\Delta T_a' = \Delta T_a \frac{c_{ж}}{c_m}$, в котором $\Delta T_a'$ – действительная температура в точке А; c_m – теплоемкость материала расплава в твердом состоянии; $c_{ж}$ – теплоемкость материала расплава в жидком состоянии.

Если $\Delta T_a > \Delta T_n \frac{c_{ж}}{c_m}$, то некоторый сток тепла пойдет на компенсацию тепла, выделяющегося при кристаллизации и дальнейшее охлаждение. Тогда уравнение теплового баланса:

$$\Delta T_a c_m \rho dV = \Delta T_n c_{ж} \rho dV + n \rho dV + (\Delta T_a' - \Delta T_n) \cdot c_m \rho dV, \quad (5)$$

где dV – объем элементарного слоя; n – удельная теплота плавления материала расплава.

Первое слагаемое правой части уравнения (5) определяет сток тепла, необходимый для охлаждения перегретого расплава до температуры кристаллизации, второе – выделение тепла при кристаллизации, третье – тепловыделение после кристаллизации.

Преобразовав выражение (5), получили

$$\Delta T_a' = \Delta T_a + \Delta T_n - \frac{n}{c_m} - T_n \cdot \frac{c_x}{c_m} \quad (6)$$

для которого возможны два случая:

$$\Delta T_a \leq \frac{n}{c_m} + \Delta T_n \cdot \frac{c_x}{c_m} \quad (7)$$

когда весь сток обеспечивает компенсацию тепла, выделяющегося при кристаллизации, в этом случае $\Delta T_a' = \Delta T_n$, а также

$$\Delta T_a > \frac{n}{c_m} + \Delta T_n \cdot \frac{c_x}{c_m} \quad (8)$$

когда будет происходить дальнейшее охлаждение точки А, тогда $\Delta T_a'$ вычисляется по формуле (6).

В результате основной характеристикой наплавочной системы будет выражение

$$T_{0x} = \frac{n}{c_m} + \Delta T_n \cdot \frac{c_x}{c_m} \quad (9)$$

физический смысл которого заключается в том, что оно дает минимальную разность температур расплава и детали, при которой будет происходить наплавка погружением в расплав.

Расчеты по формуле (4) с использованием (6)...(8) позволяют построить номограмму, по которой можно оптимизировать технологический процесс наплавки намерзанием. Однако реальная толщина наплавленного слоя будет несколько меньше расчетной. Это связано с тем, что в математической модели не учитывается теплопередача конвекцией и излучением. Поэтому в выражение (4) введены два поправочных коэффициента K_1 и K_2 , которые зависят от свойств материалов детали и расплава, а также условий тепло-массообмена. Они дают реальные значения как температуры материала в заданной точке, так и времени протекания процесса.

С учетом поправочных коэффициентов выражение (4) примет вид

$$\Delta T_a = K_1 \Delta T_0 \left[\Phi \left(\frac{R+l}{\sqrt{4\omega t K_2}} \right) - \Phi \left(\frac{R-l}{\sqrt{4\omega t K_2}} \right) \right] \quad (10)$$

По выражению (10) построена номограмма (рис. 2), согласно которой, в зависимости от требуемой толщины наплаваемого слоя покрытия, можно определить оптимальный режим индукционной наплавки погружением в расплав.

Теплоемкость материала детали из конструкционной стали в твердом состоянии принимали $c_m = 0,7$ Дж/(г·°С); в жидком – $c_x = 0,9$ Дж/(г·°С), а удельную теплоту плавления $n = 200$ Дж/г [4, 5]. Коэффициенты $0,82 < K_1 \leq 0,92$ и $0,85 < K_2 \leq 0,95$, установленные экспериментально, близки к единице.

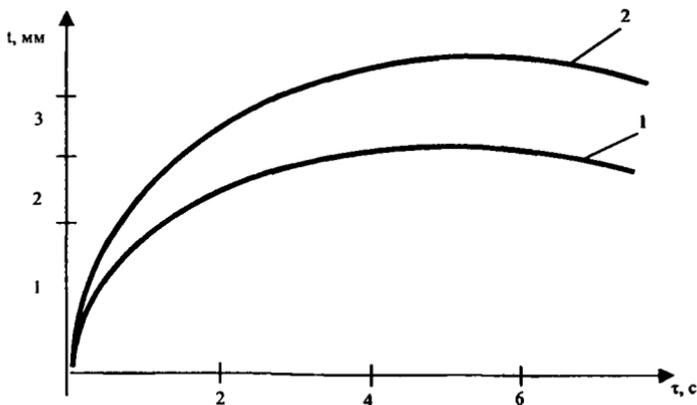


Рис. 2 Зависимость толщины наплавляемого слоя t от времени обработки детали t при основной характеристике системы $T_{\text{ос}}=350\text{ }^{\circ}\text{C}$: 1 – $\Delta T_0 = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\Delta T_n = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – для $\Delta T_0 = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\Delta T_n = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

Так, для пластины толщиной 12 мм слой наплавки, равный 2 мм при $\Delta T_0 = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\Delta T_n = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ должен формироваться за 2 с, а при $\Delta T_0 = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\Delta T_n = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 1 с.

Для расчета по полученной математической модели требуемой толщины t покрытия индукционной наплавкой погружением в расплав в зависимости от основной характеристики системы (9) выбирают время наплавки t . При этом имеют в виду, что требуемую толщину слоя можно получить последовательными технологическими переходами при наплавке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Индукционная наплавка твердых сплавов/ В.Н Ткачев, Б.М Фиштейн, Н В. Казинцев и др. – М.: Машиностроение, 1970. – 184с. 2. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. – М.: Машгиз, 1951.– 296с. 3. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1981.– 279с. 4. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справочник/ Под общ. ред. В.А.Григорьева и В.М.Зорина.– М.: Энергоатомиздат,1988. – 560с. 5. Енохович А.С. Справочник по физике и технике.– М.: Просвещение, 1976. – 175с.