

«Экологическая устойчивость природных систем и роль природообустройства в ее обеспечении», М. 2003, стр. 137-138.

6. Найфэ А.Ю. Методы возмущений, М., 1976.

7. Моисеев Н.Н. «Асимптотические методы нелинейной механики» М.: Наука, 1969.

8. Кузьмина Р.П. «Асимптотические методы для обыкновенных дифференциальных уравнений». М.: Едиториал УРСС, 2003.

9. Гукенхеймер Дж., Холмс Ф. «Нелинейные колебания, динамические системы и бифуркации векторных полей». Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002.

10. Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1955.

ТЕПЛООБМЕН ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ РОЛИКА В ПРОЦЕССЕ ПЛАЗМЕННОЙ НАПЛАВКИ

Шестаков Н.И.,

доктор технических наук, профессор ЧГУ,
г. Череповец, РФ

Журавлева Ю.М.,

аспирантка ЧГУ,
г. Череповец, РФ

Шестакова Е.А.,

кандидат технических наук, доцент ЧГУ,
г. Череповец, РФ

Никонова Е. Л.,

кандидат технических наук, доцент ЧГУ,
г. Череповец, РФ

DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2022.1.101.1678

АННОТАЦИЯ

Исследованы процессы теплообмена при плазменной наплавке металла на поверхность роликов. Даны рекомендации по устранению дефектов.

Ключевые слова: Плазменная наплавка металла, ролик, теплообмен

Плазменная наплавка используется при восстановлении изношенных деталей, а также для изготовления новых.

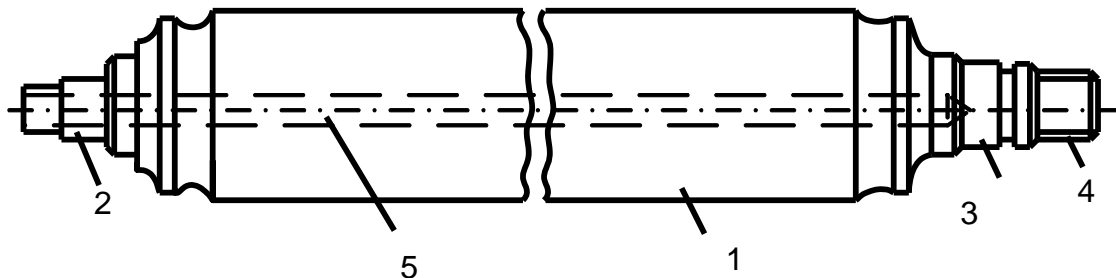


Рисунок 1. Схема ролика: 1 - бочка, 2, 3 - шейка (цанфа), 4 - торец, 5 - отверстие для внутреннего охлаждения ролика.

Ролик вращается с угловой скоростью ω .

В лабораторной системе координат (неподвижной относительно вращающейся детали) теплообмен в основном и наплавленном слое опишется уравнением

$$c_i(T)\rho_i(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \text{div}[\lambda_i(T)\text{grad}T], i = 1, 2, \tau \geq 0, (1)$$

где c - удельная массовая теплоемкость; ρ - плотность; λ - коэффициент теплопроводности; T - температура; τ - время.

Уравнение (1) записано для двух зон:

$$\left. \begin{array}{l} R_0 < r_1' < R_1 \\ R_1 < r_2' < R_2 \end{array} \right\} 0 \leq \varphi' \leq 2\pi; 0 \leq z' \leq 2L. (2)$$

где r', φ', z' - текущие координаты, $2L$ – длина детали.

Начальные условия представлены в виде:

$$T_i(r', \varphi', z', 0) = T_n, i = 1, 2, \quad (3)$$

где T_n - температура загрузки детали в установку.

Граничные условия:

$$-\lambda_i(T_i) \frac{\partial T_i(r', \varphi', 0, \tau)}{\partial z'} + \alpha_a(T_i)[T_i(r', \varphi', 0, \tau) - T_0] + \sigma_a^* \left[\left(\frac{T_i(r', \varphi', 0, \tau)}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] = 0 \quad (4)$$

$$i = 1, 2,$$

$$\lambda_i(T_i) \frac{\partial T_i(r', \varphi', 2L, \tau)}{\partial z'} + \alpha_b(T_i)[T_i(r', \varphi', 2L, \tau) - T_0] + \sigma_b^* \left[\left(\frac{T_i(r', \varphi', 2L, \tau)}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] = 0 \quad (5)$$

$$i = 1, 2;$$

$$\lambda_i(T_i) \frac{\partial T_i(R_2, \varphi', z', \tau)}{\partial r} + \alpha_d(T_i)[T_i(R_2, \varphi', z', \tau) - T_0] + \sigma_d^* \left[\left(\frac{T_i(R_2, \varphi', z', \tau)}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] = 0, i = 1, 2; (z', \varphi') \in d; \quad (6)$$

$$-\lambda_i(T_i) \frac{\partial T_i(R_0, \phi', z', \tau)}{\partial r} + \alpha_e(T_i)[T_i(R_0, \phi', z', \tau) - T_3(\tau)] = 0, \quad (z', \phi') \in e, \quad (7)$$

где α – коэффициент теплоотдачи; T_0 – температура окружающего воздуха; σ - приведенный коэффициент излучения; q_n - плотность теплового потока в пятне плазмы; а,в – поверхность торцев; d – наружная цилиндрическая поверхность, за исключением плазменного пятна; e – внутренняя цилиндрическая поверхность; f – поверхность плазменного пятна.

В процессе наплавки внутренний канал загерметизирован, поэтому температура T_3 в нем будет повышаться в соответствии с уравнением:

$$c_3 \rho_3 V_3 \frac{dT_3(\tau)}{d\tau} = \iint_e \alpha_e(T_1)[T_1(R_0, \phi', z', \tau) - T_3(\tau)] ds, \quad (8)$$

где V_3 – объем воздуха в канале, $V_3 = \pi R_0^2 2L$.

Теплоотдача на торцевых поверхностях описывается уравнением подобия [2]:

$$Nu = 0,503 [Ra \Pr]^{0,25}, \quad (9)$$

где Nu – число Нуссельта; Ra – критерий Релея; \Pr – критерий Прандтля. Безразмерные комплексы, входящие в (9), определяются из соотношений:

$$Nu = \alpha x / \lambda_3; Ra = Gr \Pr = g \beta \Delta T \frac{x^3}{V_3 a_3}; \Pr = \nu_3 / a_3, \quad (10)$$

где x – расстояние от нижней кромки до рассматриваемой точки; λ_3 - коэффициент теплопроводности воздуха; g – ускорение свободного падения; β - температурный коэффициент объемного расширения; ΔT - разность между температурой поверхности и температурой окружающей среды, для поверхности (а): $\Delta T = [T_i(r', \varphi', 0, \tau) - T_0]$, для поверхности (б):

$\Delta T = [T_i(r', \varphi', L, \tau) - T_0]$; ν_3 - кинематический коэффициент вязкости; a_3 - коэффициент теплопроводности воздуха.

Функция $\psi(\text{Pr})$ имеет вид:

$$\psi(\text{Pr}) = \left[1 + \left(\frac{0,492}{\text{Pr}} \right)^{9/16} \right]^{-16/9}.$$

Пренебрегая влиянием ограждающих конструкций, приведенный коэффициент излучения можно определить из соотношения:

$$\sigma_a = \sigma_b = \sigma_d = \varepsilon_i C_0 \quad (11)$$

где ε_i - степень черноты поверхности; C_0 - коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Теплоотдача на внешней цилиндрической поверхности опишется известным уравнением подобия:

$$Nu = A Gr^{0,25}, \quad (12)$$

где $Nu = 2\alpha_d R_2 / \lambda_3$ - число Нуссельта; A - коэффициент,

при $0,7 \cdot 10^3 < Gr < 0,7 \cdot 10^8$ $A = 0,46$;

при $0,7 \cdot 10^8 < Gr < 0,7 \cdot 10^9$ $A = 0,695$;

Разность температур, входящая в критерий Грасгофа (10), определится из выражения:

$$\Delta T = [T_i(R_2, \varphi', z', \tau) - T_0].$$

При $Gr \geq 0,7 \cdot 10^9$ уравнение (11) представится в виде:

$$Nu = 0,133 Gr^{0,33}.$$

Для определения коэффициента теплоотдачи на внутренней поверхности воспользуемся уравнением [1]:

$$Nu_e = \left(\left\{ \left[1 + \left(\frac{Ra_0}{4472} \right)^2 \frac{2R_0}{L} \right]^{-8} + \left[\frac{Ra_e (2R_0/L) f(\text{Pr})}{57\Phi} \right]^{-2} \right\}^{-3/8} + \frac{Ra_e f(\text{Pr})}{8000} \right)^{1/3}, \quad (13)$$

где $Nu_e = \alpha_e R_0 / \lambda_3$ - число Нуссельта; $Ra_e = g \beta \Delta T \frac{(2R_0)^2}{\nu_3 a_3}$ - критерий Релея.

Функция $f(\text{Pr})$ найдется из соотношения [2,3]:

$$f(\text{Pr}) = \left[1 + \left(\frac{0,5}{\text{Pr}} \right)^{9/16} \right]^{-16/9}. \quad (14)$$

Функцию Φ можно найти из выражения [2]:

$$\Phi\left(Ra_e, \frac{L}{2R_0}\right) = \left\{ 1 + \frac{0,231}{[Ra_e(L/2R_0)^4]^{1/4}} \right\}^2. \quad (15)$$

Для расчета по (13)-(15) можно принять $Pr = 0,7$.

Плотность теплового потока в пятне плазмы определится из соотношения, найденного Г. А. Поздеевым:

$$q_n = 23,4 j^{1,22} G_{nl}^{0,16} G_{mp}^{-0,06} h^{-0,07}, \quad (16)$$

где j – величина электрического тока дуги; G_{nl} – расход плазмообразующего газа; h – дистанция наплавки (расстояние от среза сопла до поверхности детали); G_{tr} – расход транспортирующего газа.

Закон движения центра плазменного пятна:

$$\left. \begin{aligned} z'_c &= \frac{L}{2} + \left(\frac{L}{2} - \gamma\right) \sin \beta \tau; \\ \varphi'_c &= \omega \tau, \tau > 0 \end{aligned} \right\}, \quad (17)$$

где z'_c , φ'_c – координаты центра пятна.

Уравнения (1)-(17) представляют собой математическую модель теплообмена при плазменной наплавке металла на поверхность ролика.

Рассмотрим качественные показатели полученного наплавленного металла для различных температур нагрева расплава и продолжительности выдержки, выраженной через t .

При наплавлении основы в расплаве с $T_{ж} = 1520..1560^{\circ}C$ отмечается невысокий уровень пластических характеристик плакированного металла (рисунок 2). В макроструктуре образцов наблюдается отслоение металла покрытия, особенно характерное для заготовок, полученных в рамках первой стадии операции наплавки.

В структуре основного металла в зоне термического влияния отмечено обезуглероживание приграничных участков соединения в силу диффузионной активности углерода. В зоне термического влияния со стороны покрытия зарегистрирована крупнозернистая структура аустенита, полученная в результате кратковременности процесса наплавки.

Практически для всех образцов регистрируются трещины в приграничных областях переходного слоя со стороны основы, что объясняется активной диффузией углерода в сторону образовавшегося сварного соединения, образованием множества карбидных участков в зоне термического влияния со стороны основы. Карбидные включения, как концентраторы напряжений, определяют склонность металла со стороны основы к хрупкому разрушению в зоне термического влияния, и способствуют развитию такого дефекта операции наплавки, как «расслой».

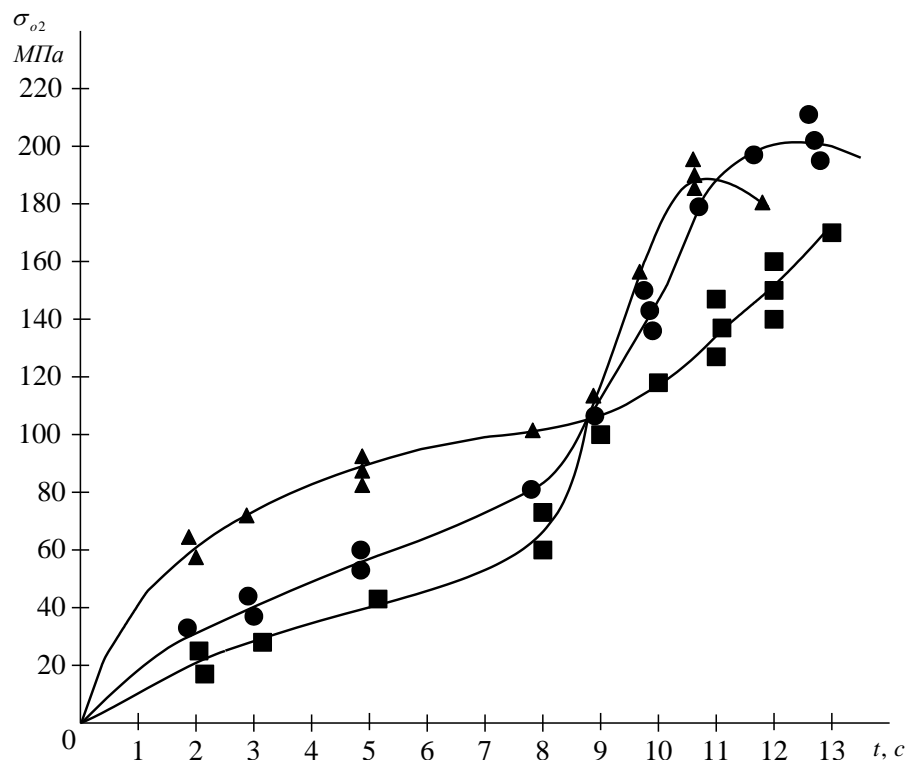


Рисунок 2: 1 - $T_p = 1540 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 2 - $T_p = 1570 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 3 - $T_p = 1600 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Для заготовок, полученных как на первой, так и на второй стадии наплавки, характерно полное, либо частичное отслоение покрытия при испытаниях металла на изгиб. В макроструктуре наплавленного слоя заготовок, полученных при нанесении на основу расплава с $T_{ж} = 1520..1560 \text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдаются трещины по кромкам покрытия, что указывает на потерю металлом высокого уровня пластичности, характерного для коррозионноустойчивых марок стали, в результате неоптимальных теплофизических условий ведения процесса. Этот эффект особенно характерен для первой стадии наплавки.

Предложено после завершения процесса наплавки ролик подвергнуть термостатированию для выравнивания температурных полей по объему и снижения термических напряжений.

Список использованной литературы

1. Математическое моделирование теплообмена при изготовлении роликов с упрочненным внешним слоем/ Н.И. Шестаков,

Ю.М. Журавлева, Е.Л. Никонова [и др.]// Научные аспекты современных исследований. LIV Международная научно-практическая конференция Евразийского научного объединения. (РИИЦ). Москва: 2019. Часть 1. С. 83-85.

2. Математическая модель температурного поля ролика при плазменной наплавке/ Н.И. Шестаков, Ю.М. Журавлева, Ю.В. Антонова [и др.]// Перспективы модернизации современной науки. Международная научно-практическая конференция Евразийского научного объединения. (РИИЦ). Москва: 2020. Часть 2. С. 158-160.

3. Исследование теплообмена при изготовлении ролика в процессе плазменной наплавки/ Н.И. Шестаков, Ю.М. Журавлева, Е.Л. Никонова [и др.]// Современные задачи научной работы. Перспективы внедрения инновационных решений// Сборник статей по итогам Международной научно - практической конференции. Агентство международных исследований. Магнитогорск: 2022. С.72-77.

© Шестаков Н.И., Журавлева Ю.М., Шестакова Е.А., Никонова Е.Л., 2022