

УДК 621.793.03

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИ НАНЕСЕНИИ ПОКРЫТИЙ ЦЕНТРОБЕЖНЫМ МЕТОДОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

канд. техн. наук, доц. А.А. ЛЫСОВ, канд. техн. наук, доц. А.С. АРШИКОВ

(Полоцкий государственный университет);

канд. техн. наук, доц. Ю.Н. ГАФО

(Белорусский государственный научно-производственный концерн порошковой металлургии, Минск)

Исследованы температурные особенности процесса нанесения покрытий центробежным методом с использованием индукционного нагрева. Определены температуры в различных точках покрытия и основы при наружном нагреве токами высокой частоты. На основе расчетов и экспериментальной проверки построена номограмма для определения температуры у поверхности покрытия в зависимости от скорости нагрева и толщины порошкового слоя. Получены уравнения, позволяющие описать кинетику нагрева покрытий с учетом вибровоздействия на наносимый порошок. Показано, что при определенных значениях вибровоздействия в значительной мере повышается эффективный коэффициент теплопроводности, величину которого определяли экспериментально по кинетическим кривым нагрева, что приводит к ускорению нагрева за счет уплотнения порошкового слоя и улучшения условий теплообмена. Микроперемещения порошковых частиц под воздействием вибрации приводят к выравниванию температуры по глубине покрытия и сокращению времени нагрева до температуры изотермической выдержки.

Введение. Индукционный нагрев металлов токами высокой частоты (ТВЧ) характеризуется неравномерным распределением удельных тепловых источников [1]. Это приводит к тому, что поверхностные слои металла нагреваются до более высоких температур, чем нижние.

Процесс нагрева при центробежном нанесении покрытий с использованием наружного источника ТВЧ характеризуется наличием отрицательного температурного перепада от наносимого слоя к основному металлу [2]. Исходя из этого можно сделать вывод, что в случае нанесения покрытий центробежным методом с применением индукционного нагрева объективно существуют внутри монолитной детали и порошкового слоя температурные градиенты, а по толщине слоя имеется определенный температурный перепад. Поэтому следует ожидать, что при нанесении покрытия из металлических порошков методом индукционной наплавки по толщине покрытия должны существовать определенные градиенты их физико-механических свойств.

Определение температур основы и порошкового слоя в процессе центробежной наплавки осложняется тем, что в процессе нанесения покрытия изделие вращается с большой скоростью, до 50 м/с.

Для исследования температурных процессов вращающихся объектов известно достаточно большое количество методов и средств [3]. Однако, учитывая то, что в качестве основных требований, предъявляемых к исследованию распределения температуры между заготовкой и покрытием, мы выставляем: возможность получения данных не только об общем тепловом состоянии, но и данные о местных перепадах в различных точках исследуемого объекта; дистанционность получения данных, возможность осциллографирования быстро изменяющихся тепловых процессов; независимость результатов измерений от скорости вращения объекта, наиболее подходящими являются электроизмерительные преобразователи термопары. В значительной степени ускорить процесс нагрева позволяет воздействие вибрации с определенной амплитудой, за счет уплотнения порошкового слоя и улучшения условий теплообмена.

Методика проведения исследований. В качестве термопар использовались хромель-алюмелевые термоэлектрические преобразователи (ТХА) с термоэлектродами диаметром 0,2 мм (ГОСТ 3047-87), рабочий диапазон температур которых до 1570 К. Так, как при высоких температурах нагрева возможно появление жидкой металлической фазы, необходимо исключить его контакт с термопарами, перед измерением температуры спайки термопар покрывались водной суспензией каолина. Полученный слой суспензии на спае подвергали сушке при температуре 250...280 °С в течение часа. Образовавшееся тонкое покрытие надежно защищало термопару от соприкосновения с жидким металлом.

Термопары устанавливались в слое и изделии по схеме, которая позволяла измерять температуру, как по глубине изделия, так и по толщине слоя порошкового покрытия (рис. 1). Термоэлектроды соединялись с регистрирующей аппаратурой (осциллограф Н043) с помощью блока ртутных токосъемников, который крепился на кронштейне экспериментальной установки.

В экспериментальных исследованиях использовались гальванометры М017-400 с чувствительностью по току 135 мм/мА, полоса частот 0...300 Гц. Запись производилась на специальной бумаге УФ-67 с ультрафиолетовым проявлением. Общее сопротивление измерительной цепи устанавливалось с помо-

стью магазина сопротивлений. Пересчет значений ЭДС в градусы осуществлялся по стандартным градуировочным характеристикам (ГОСТ 3049-87) для хромель-алюмелевых термопар. Расчет поправок на температуру свободного конца, не равную 0 °С, на сопротивление измерительного прибора проводили по известной методике [3]. Холодные концы термоэлектродов дополнительно термоизолировались.

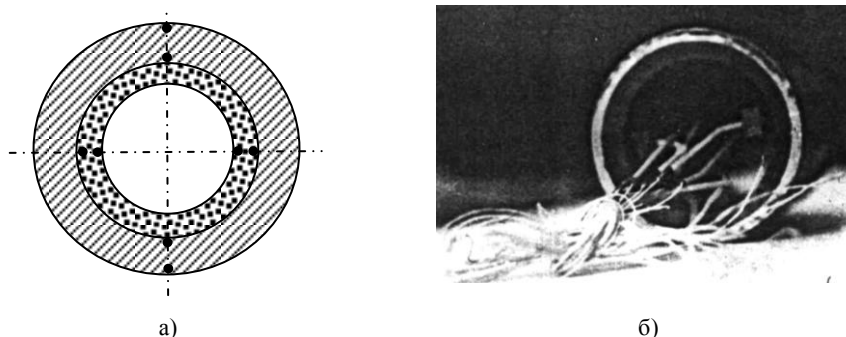


Рис. 1. Схема установки термопар (а) и внешний вид детали с зачеканенными термопарами (б)

Результаты и обсуждение. Процесс центробежного нанесения покрытий с применением индукционного нагрева характеризуется сохранением отрицательного температурного перепада от покрытия к детали в процессе нагрева.

На рисунке 2 приведены графики зависимости температуры в различных точках покрытия и основы, построенные по экспериментальным и теоретическим данным, рассчитанным по формуле (1). Расчет производился методом последовательных интервалов.

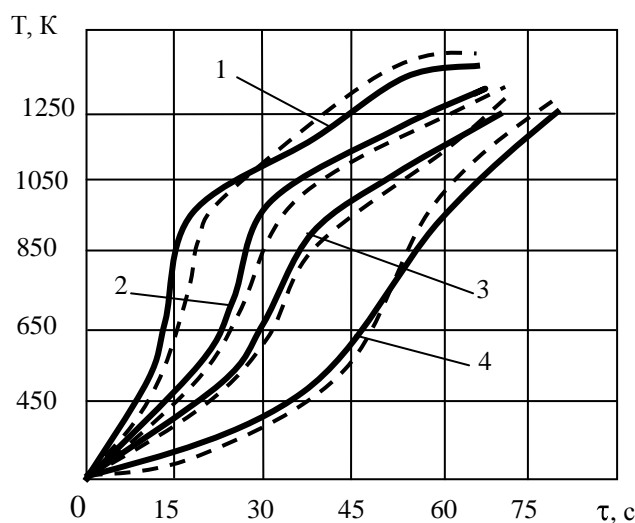


Рис. 2. Температура в различных точках покрытия и основы при наружном нагреве ТВЧ: сплошные линии – экспериментальные значения; штриховые линии – расчетные значения (координаты точек: 1 – r = 55 мм; 2 – r = 40 мм; 3 – r = 38 мм; 4 – r = 36 мм)

$$T_{\Pi, r, \varphi, Z, t} = \left[1 + r - R_1 \frac{\alpha_1}{\lambda_{\Pi} + \alpha_1 d} \right] T_{R_1, \varphi, Z, t} - r - R_1 \frac{\alpha_1}{\lambda_{\Pi} + \alpha_1 d} T_c, Z, t. \quad (1)$$

Для выбора подхода к разработке теоретической модели индукционного нагрева порошковых слоев рассматривали систему, состоящую из монолитной металлической детали, на внутренней поверхности которой сформирован слой из металлического порошка, и охватывающий деталь системы внешних токов индуктора. Приняв допущение, что покрытие относительно тонкое и температура распространяется в нем по линейному закону в условиях плотного теплового контакта, сводили сложную задачу о двухслойном цилиндре к задаче о полой цилиндре, что значительно упрощает применение полученного решения на практике.

На основе расчетов и экспериментальной проверки построена номограмма для определения температуры у поверхности покрытия из БрОФ-10-1 в зависимости от скорости нагрева и толщины порошкового слоя (рис. 3).

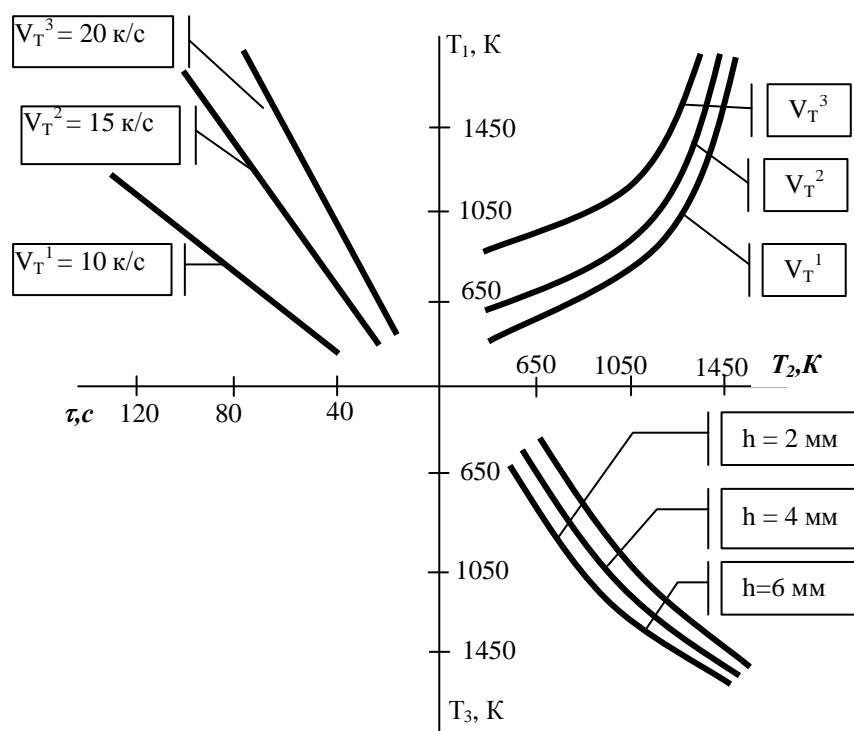


Рис. 3. Зависимость температуры покрытий из БрОФ-10-1 от скорости нагрева и толщины покрытий:
 T_1 , T_2 , T_3 – температура соответственно на наружной и внутренней поверхности основы и порошкового слоя

Влияние вибровоздействия на кинетику нагрева порошкового слоя до температуры расплавления проявляется в ускорении нагрева за счет уплотнения порошкового слоя и улучшения условий теплообмена [4]. Кроме того, микроперемещение порошковых частиц под воздействием вибрации приводит к выравниванию температуры по глубине порошкового слоя и сокращению времени нагрева до температуры изотермической выдержки (рис. 4, 5).

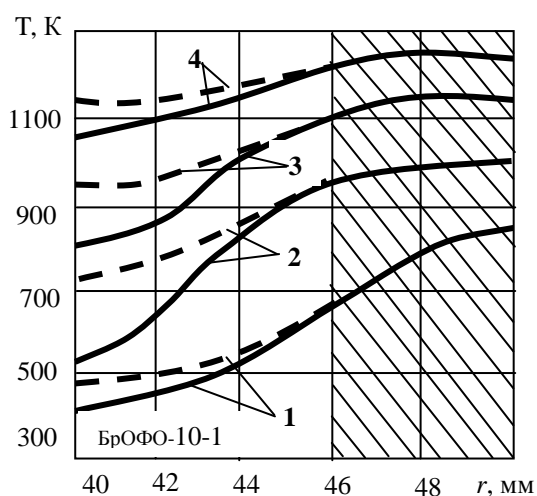


Рис. 4. Распределение температуры по сечению покрытия и основы для различных моментов времени:
 1 – 10 с; 2 – 20 с; 3 – 30 с; 4 – 40 с;
 (сплошная линия – нагрев без вибровоздействия;
 пунктирная линия – с вибровоздействием)

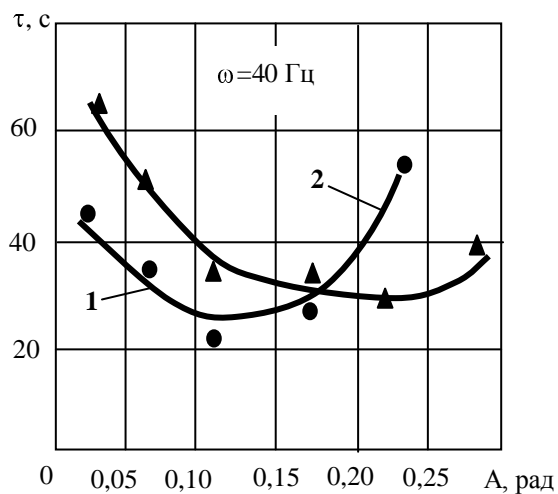


Рис. 5. Зависимость температуры нагрева до температуры изотермической выдержки от амплитуды колебаний:
 1 – БрОФ-1-1; 2 – ПГ-СРЗ

В работе экспериментально оценивался разогрев порошкового слоя вследствие диссипации энергии упругих колебаний, повышение температуры слоя составляло 15...20 К, т.е. находилось в пределах погрешности эксперимента и не учитывалось в теоретической модели.

Кинетику нагрева покрытия с учетом вибровоздействия на порошковый слой можно описать с помощью уравнения (1), заменив значения коэффициента теплопроводности λ на эффективный коэффициент $\lambda_{эф}$, величину которого определяли экспериментально по кинетическим кривым нагрева.

При определенных значениях параметров вибровоздействия $\lambda_{эф}$ повышается (рис. 6). Это вызвано, с одной стороны, уплотнением порошкового слоя при вибровоздействии, а с другой – тем, что при микроперемещении частиц сдираются окисные пленки и улучшаются условия теплообмена между частицами. Однако при повышении значения амплитуды вибрации выше 0,15...0,20 рад, величина $\lambda_{эф}$ снижается, что, очевидно, вызвано разупрочнением порошкового слоя и ухудшением условий теплообмена.

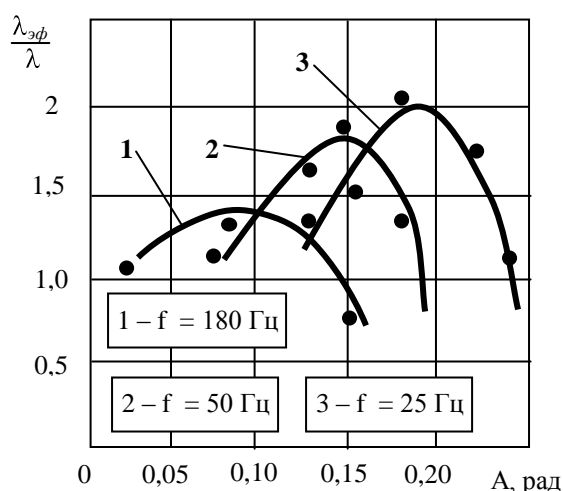


Рис. 6. Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от параметров вибровоздействия:
 $1 - \omega = 80 \text{ с}^{-1}$; $2 - \omega = 50 \text{ с}^{-1}$; $3 - \omega = 25 \text{ с}^{-1}$

Выводы. Исследованы температурные особенности процесса нанесения покрытий центробежным методом с использованием индукционного нагрева. На основе расчетов и экспериментальной проверки построена номограмма для определения температуры у поверхности покрытия в зависимости от скорости нагрева и толщины порошкового слоя. Получены уравнения, позволяющие описать кинетику нагрева покрытий с учетом вибровоздействия на наносимый порошковый слой.

Показано, что наложение вибровоздействия в процессе нагрева на порошковый слой с частотой 30...40 с^{-1} и амплитудой 0,10...0,15 рад сокращает время нагрева до температуры изотермической выдержки в 1,3...1,5 раза, снижает температурный перепад по толщине порошкового слоя 2...6 мм на 30 %.

Величина эффективной теплопроводности порошкового слоя зависит от амплитуды колебаний, при амплитудах свыше 0,15...0,20 рад теплопроводность порошкового слоя снижается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Немков, В.С. Теория и расчет устройств индукционного нагрева / В.С. Немков, В.Б. Демидович. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
2. Дорожкин, Н.Н. Определение температурного поля в цилиндрических деталях при нанесении покрытий / Н.Н. Дорожкин, А.И. Жорник, В.И. Жорник // Изв. АН БССР, Сер. Физ.-энерг. науки. – 1979. – № 2. – С. 89 – 95.
3. Зедгинидзе, Г.П. Измерение температур вращающихся деталей машин / Г.П. Зедгинидзе. – М.: Машиностроение, 1982. – 225 с.
4. Forsters, M.A. The Kinetics of Powder Densification due to Capillary Forces / M.A. Forsters // Powder Met. Int. – 1982. – V. 14, № 2. – P. 96 – 100.

Поступила 23.05.2009