

УДК 621.791.75

Бережная Е.В., к.т.н.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ КРАНОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ НАПЛАВКОЙ

В настоящее время с целью повышения износостойкости деталей кранового оборудования разработаны различные способы нанесения покрытий [1]. Электроконтактная наплавка порошковыми материалами позволяет получить на поверхности восстанавливаемого изделия рабочий слой с необходимым комплексом физико-механических свойств [2, 3]. При этом резко сокращается расход дефицитных и дорогих материалов, а эффект повышения работоспособности оказывается значительным, так как в наплавленном композиционном слое можно получить более высокие механические и физические свойства, чем в основном металле. Кроме того процесс электроконтактной наплавки позволяет применять широкую номенклатуру наплавочных материалов: от электродных проволок сплошного сечения до компактных функционально-ориентированных порошковых материалов, изготавливаемых путем объемного сочетания разнородных материалов и позволяющих создавать на поверхности восстанавливаемого изделия слой с программируемым распределением физико-механических характеристик.

При электроконтактной наплавке скорость нагрева порошкового слоя может достигать нескольких тысяч градусов в секунду, что делает необходимым разработку методики расчета теплового состояния наплавляемого слоя, позволяющего оптимизировать режимы процесса. Определение влияния компонентов на тепловое состояние многослойных композиционных покрытий эмпирическими методами является трудной задачей. В связи с этим целесообразно применение математического моделирования процессов теплопередачи в структурных составляющих покрытия и изучение их влияния на распределение температуры в рабочем слое покрытия. Основная проблема при решении поставленной задачи заключается как в моделировании неоднородности теплового состояния покрытия, обусловленной неоднородностью структуры материала, так и в правильном описании закономерностей нагрева в точке контакта «электрод – деталь» на различных этапах термомеханического нагружения.

Целью работы является исследование закономерностей формирования тепловых полей в функционально-ориентированном порошковом материале при электроконтактной наплавке деталей кранового оборудования.

Качественный, а особенно количественный анализ термомеханических процессов в зоне формирования наплавленного слоя затруднен вследствие особенностей сложной полидисперсной гетерогенной системы, которую представляет собой порошковый

материал. Схема расчета включает следующий ряд допущений: теплофизические и электрические свойства материалов зависят от температуры; энергия внутри объема материала выделяется из его электрического сопротивления; энергия на свариваемых поверхностях выделяется за счет работы тока на контактном сопротивлении; интенсивность выделения тепловой энергии зависит от температуры свариваемого контакта; учитывается энергия, выделяемая на электродах; передача теплоты от изделия к электродам осуществляется через тепловое сопротивление электрод-деталь; свариваемое изделие является теплопроводящим.

Представим многослойный порошковый материал в виде модельной схемы, состоящей из плоских, поочередно сменяющих друг друга слоев, составленных из различных порошкообразных компонентов, например меди и никеля. Тепловой поток в термомодеформационном очаге перпендикулярен этим слоям. Вследствие более высокой твердости и тугоплавкости слоя никелевого порошка повышается тепловыделение в нем и кроме того наблюдается экранирование вследствие пониженной теплопроводности никеля. Определим увеличение тепловыделения в термомодеформационном очаге благодаря омическому сопротивлению слоя никелевого порошка при условии неизменности режима наплавки:

$$\Delta Q = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} 100\% ,$$

где Q_1 , Q_2 – соответственно тепловыделение в очаге без слоя никелевого порошка и со слоем никелевого порошка, Дж.

$$Q_1 = 0,24I^2 R_{Cu} t; \quad Q_2 = 0,24I^2 (R_{Cu} + R_{Ni}) t ,$$

где R_{Cu} – сопротивление без слоя никелевого порошка, Ом;
 R_{Ni} – омическое сопротивление никелевого слоя, Ом.

Тогда с учетом удельного электросопротивления медного и никелевого порошков (ρ_{Cu} , ρ_{Ni}) и толщины слоев медного (δ_{Cu}) и никелевого (δ_{Ni}) слоев имеем:

$$\Delta Q = \frac{\rho_{Ni}}{\rho_{Cu}} \frac{2\delta_{Ni}}{\delta_{Cu}} 100\% .$$

Удельное электросопротивление никеля в среднем в 5 раз выше, чем меди ($\rho_{Cu} = 0,0175 \cdot 10^{-6}$ Ом·м; $\rho_{Ni} = 0,087 \cdot 10^{-6}$ Ом·м). При относительной толщине слоя никелевого порошка 10 % от толщины слоя медного порошка приращение тепла ΔQ составит ≈ 100 %. Объемная теплоемкость никеля и меди примерно одинакова, и при

нагревании слоя никелевого порошка надо израсходовать около 20 % общего количества тепла, необходимого для нагрева слоя медного порошка. Следовательно, в термомодеформационном очаге при неизменном режиме наплавки в результате введения в состав композиционного материала слоя никелевого порошка относительной толщиной 10 % будет излишек тепла 80 %, что может существенно изменить тепловую картину в очаге деформации. В реальных условиях в порошковом материале присутствует и воздух, который является теплоизолятором ($\lambda_{\text{в}}=0,0264$ Вт/м·К). Обозначив $\delta_{\text{в}}$ – толщина слоя воздуха, F – теплопоглощающая плоская поверхность рассматриваемой системы, имеем объем шихтовой композиции $V_{\text{Cu+Ni}} = F \sum \delta_{\text{Cu+Ni}}$, а объем воздуха будет соответственно равен $V_{\text{в}} = F \sum \delta_{\text{в}}$. Учитывая, что пористость p это отношение объема воздуха к общему объему, получим:

$$\delta = \frac{100V_{\text{а}}}{V_{\text{а}} + V_{\text{Cu+Ni}}} = \frac{100\sum\delta_{\text{а}}}{\sum\delta_{\text{Cu+Ni}} + \sum\delta_{\text{а}}} = \frac{100\sum\delta_{\text{а}}}{\delta_{\text{шихты}}},$$

где $\delta_{\text{шихты}}$ – общая толщина порошковой системы, мм.

Тогда с учетом теплопроводности порошковой композиции (λ_1) и теплопроводности воздуха ($\lambda_{\text{в}}$) имеем величину теплового потока через систему:

$$Q = \frac{F \lambda_1 \lambda_{\text{а}} 100}{\lambda_{\text{а}} \delta_{\text{шихты}} (100 - p) + p \lambda_1 \delta_{\text{шихты}}} \delta_{\text{н}},$$

где $T_{\text{с}}$ – средняя температура порошкового слоя, °С.

В случае электроконтактной наплавки функционально-ориентированного порошкового материала отдельную сварочную точку можно рассматривать как цилиндр, состоящий из слоя основного металла и слоев порошкового материала. Высота свариваемых слоев соответственно d_1, d_2, d_3, d_4 . Распределение тока по поперечному сечению цилиндра принято считать равномерным, а процесс распространения теплоты – линейным. Общепринятый метод анализа процессов распространения теплоты с помощью дифференциальных уравнений основан на использовании первого закона термодинамики для отдельных элементов наплавляемого изделия. Каждый элемент имеет одинаковую длину Δx с другими. Баланс энергии в каждом элементе определяется за отрезок времени Δt . В начальной стадии нагрева температура в изделии распределена равномерно и равна температуре окружающей среды ≈ 30 °С. Затем за определенный интервал времени определяется приращение температуры в отдельных точках элементов. Это повышение температуры в элементах (равномерное по всему рассматриваемому цилиндру) учитывается при расчете следующей

стадии нагрева. Таким образом, расчет ведут до интересующего времени нагрева. Точность метода тем выше, чем меньше интервал времени $\Delta\tau$ и длина слоя Δx . Наплавку осуществляли одним импульсом (полуволна) переменного тока. Выделение теплоты в каждом элементе в любой момент времени в соответствии с мгновенным значением тока происходит за счет работы тока на местном (локальном) сопротивлении σ данного материала с учетом его изменения с температурой. Значения сопротивления для каждого материала в функции температуры выбирали по справочным данным. Распространение теплоты в наплавляемом изделии происходит для одномерной задачи согласно уравнению Фурье. Расчет ведется с учетом изменения градиента между соседними точками. Точность вычисления обеспечивается очень малыми размерами слоев Δx и интервалов времени $\Delta\tau$. Для каждого приращения времени в дифференциальное уравнение вводили соответствующие данной температуре слоя коэффициенты теплопроводности K и температуропроводности $K/(\rho \cdot C)$, учитывая плотность материала ρ и его теплоемкость C . Выделение теплоты в контакте осуществляется за счет работы тока на контактном сопротивлении. Это местный источник теплоты и его интенсивность измеряется с изменением сопротивления в функции температуры. Интенсивность нагрева в контакте пропорциональна квадрату тока и контактному сопротивлению. Известно, что при нагреве контактной поверхности контактное сопротивление быстро исчезает. В свою очередь, величина контактного сопротивления зависит от свойств материала и состояния восстанавливаемой поверхности – оксидные пленки, класс обработки и т.д. Изменение контактного сопротивления во времени не играет существенной роли в процессе наплавки вследствие незначительной толщины приконтактного слоя и сравнительно быстрого нагрева контактной поверхности, поэтому его сопротивление быстро убывает до своего номинального значения. В контакте электрод-деталь выделяется теплота на переходных сопротивлениях в приконтактном слое.

Учитывая площадь контакта S , термическое сопротивление в контакте электрод-деталь R и температуру поверхности изделия T_ω , уравнение энергетического баланса примет вид:

$$\hat{E}S \frac{T_{n+1} - T_n}{\Delta x} \Delta\theta + \frac{2KR\Delta\theta}{2K + h\Delta x} = (T_0 - T_n) + I^2 S \sigma \Delta x \Delta\theta = S \Delta x C (T'_n - T_n).$$

Дифференциальное уравнение:

$$T'_n = T_n + \frac{K\Delta\theta}{\rho C (\Delta x)^2} (T_{n+1} - T_n) + \frac{2KR\Delta x}{\rho C (2K + R\Delta x)} \cdot \frac{\Delta\theta}{(\Delta x)^2} (T_0 - T_n) + \frac{\sigma}{\rho C} I^2 \Delta\theta.$$

При постоянных $\Delta\theta$ и Δx должно удовлетворяться равенство:

$$\frac{K}{\rho C} \left(1 + \frac{2R\Delta x}{2K + R\Delta x} \right) \frac{\Delta\theta}{(\Delta x)^2} \leq 1.$$

Таким образом, тепловые процессы, происходящие при электроконтактной наплавке функционально-ориентированным порошковым материалом, сложны: изменяются геометрические размеры слоев, тепловые свойства ингредиентов шихты, происходят фазовые переходы с перемещением границы раздела фаз, т.е. это процесс с ярко выраженным температурным активированием поверхности. Поэтому особый интерес для регулирования технологического процесса представляет распределение тепла по толщине функционально-ориентированного порошкового материала, что позволяет контролировать нагрев и расплавление компонентов, а, следовательно, и качество наплавляемого рабочего слоя.

Данная методика расчета использована для оптимизации энергосиловых параметров процесса восстановительной электроконтактной наплавки изношенных деталей кранового оборудования функционально-ориентированными порошковыми материалами, получаемыми путем послойной засыпки, которую необходимо проводить таким образом, чтобы по сечению порошкового слоя происходило программированное изменение формы частиц износостойкой фазы от осколочной нерегулярной в нижнем слое до сферической в верхнем слое (рис.1, 2).

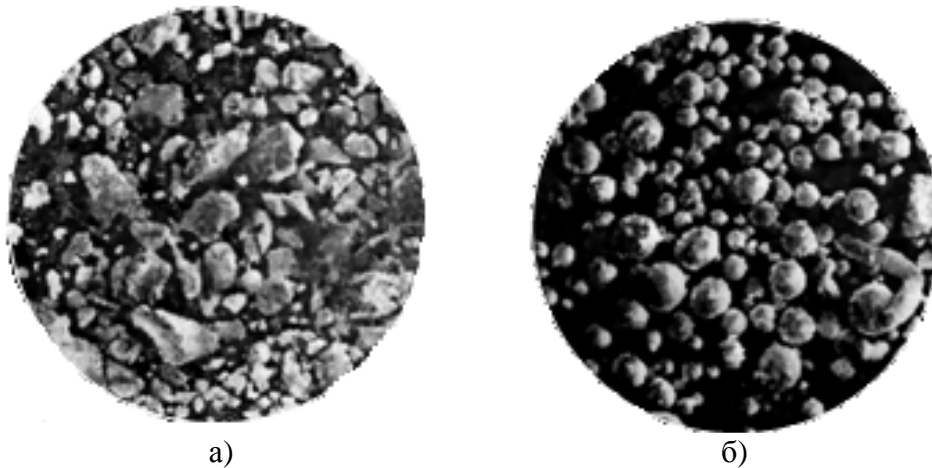


Рисунок 1. Механическая смесь частиц износостойкой фазы (карбида вольфрама), подготовленная для нижнего (а) и для верхнего (б) слоя сердечника

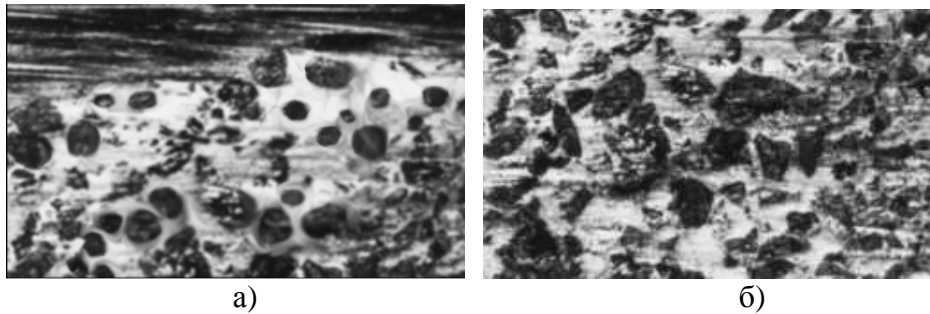


Рисунок 2. Микроструктура наплавленного порошкового функционально-ориентированного слоя с программированным распределением свойств по сечению: верхнего слоя (а) и нижнего (б)

Такое программируемое распределение частиц с различными физико-механическими характеристиками по сечению наплавленного слоя позволяет снизить скорость изнашивания поверхности, а также повысить прочность сцепления наплавленного слоя с поверхностью восстанавливаемого изделия.

Выводы. Применение электроконтактной наплавки, при которой на изношенную поверхность деталей кранового оборудования наносят слой требуемой толщины, обладающий заданным уровнем рабочих характеристик, позволяет эффективно решать задачу продления нормативного срока службы технологических узлов. Рациональная корректировка формирования тепловых полей в функционально-ориентированных порошковых материалах, а также гранулометрический состав и программируемое распределение физико-механических характеристик по сечению наплавочного материала оказывает существенное влияние на получаемые в результате проведения восстановительных работ свойства наплавленного слоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черноиванов В.И. Восстановление деталей машин. – М.:ГОСНИТИ, 1995. – 278с.
2. Бережная Е.В., Кассов В.Д., Малыгина С.В. Повышение надежности главных балок сварных крановых мостов / Е.В. Бережная, В.Д. Кассов, С.В. Малыгина // Будівництво, реконструкція та експлуатація конструкцій і споруд залізничного транспорту: Зб. наук. праць ДонІЗТ, 2012, №29. – С.273-279.
3. Бережная Е.В. Современные методы повышения износостойкости землеройной техники / Е.В. Бережная // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: Зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА. – 2012. – №3 (28). – С. 33-36.