

The technical characteristics, functional and structural schemas of the system of powder electrocontact welding adaptive control are given.

О. О. КУЗНЕЧИК, ГНУ «Институт порошковой металлургии», К. Е. БЕЛЯВИН, БНТУ

УДК 621.792.4

СИСТЕМА АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ НАПЛАВКЕ ПОРОШКОВ САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ СПЛАВОВ

Введение. Повышение долговечности и надежности механизмов и агрегатов, работающих в условиях повышенного абразивного износа, является актуальной задачей для машиностроения, которая может решаться путем порошковой электроконтактной наплавки износостойких покрытий из самофлюсующихся сплавов [1–3]. В основе такой наплавки лежит воздействие электрического тока на подпрессованный порошок, помещенный между электродом-пуансоном и металлической основой. При этом в качестве применяемого оборудования могут использоваться машины контактной сварки [1, 2]. Ограничивают эффективность применения машин контактной сварки в процессах порошковой электроконтактной наплавки используемые регуляторы контактной сварки, которые не обеспечивают автоматизированную корректировку температурного режима и длительности наплавки. Снять эти ограничения можно с помощью включения машины контактной сварки в систему адаптивного управления порошковой электроконтактной наплавкой [4, 5]. Целью работы является сравнительное исследование режимов электроконтактной наплавки порошков самофлюсующихся сплавов, осуществляемой без использования и с использованием системы адаптивного управления, а также сравнение структуры и износостойкости получаемых в результате этого порошковых покрытий.

Система адаптивного управления порошковой электроконтактной наплавкой. На процесс электроконтактной наплавки электропроводных порошков влияют воздействия таких технологических факторов, как давление подпрессовки (p), напряжение (U) и сила (I) электрического тока. При заданных номинальных параметрах электрического тока (I_0 и U_0) и давления сжатого воздуха (p_0),

создающего с помощью пневмоцилиндра машины контактной сварки усилие сжатия электродов сварочного контура, можно [6–8] рассчитать температуру (T_0) разогрева и оптимальную длительность (t) электроконтактной наплавки. Если в этом случае порошок представить как объект управления (OY), то устанавливаемый контактной машиной (источником воздействия) с помощью регулятора (P) контактной сварки режим электроконтактной наплавки вызовет у OY ответную реакцию, внешне проявляющуюся в нагреве и усадке. При этом усадка будет сопровождаться изменением с течением времени положения $h(t)$ электрода-пуансона, являющегося составным элементом источника воздействия (IB). С учетом анализа работ [6–11] в аналитическом виде порошковую электроконтактную наплавку можно представить следующим образом:

$$Y[T(t), h(t)] = X[S(t)], \quad (1)$$

где $Y[T(t), h(t)]$ – функционал состояния OY , определяемый функциями $T(t)$ и $h(t)$, зависящими от времени; $X[S(t)]$ – функционал внешнего воздействия на OY , определяемый сигнальной функцией $S(t)$, задаваемой P :

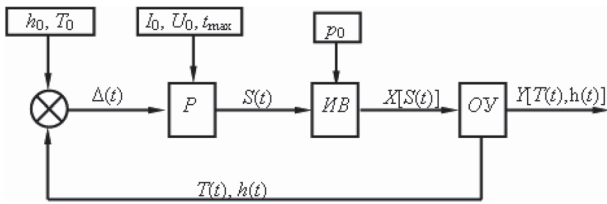
$$S(t) = P(I_0, U_0, p_0, t). \quad (2)$$

При заданной температуре (T_0) наплавляемого порошка и толщине (h_0) получаемых покрытий используем функционал отклонения параметров

$$\Delta(t) = \Delta[\delta_1(t), \delta_2(t)], \quad (3)$$

где $\delta_1(t) = T(t) - T_0$ – параметр отклонения температуры; $\delta_2(t) = h(t) - h_0$ – параметр отклонения толщины покрытия.

Представленная таким образом электроконтактная порошковая наплавка позволяет свести за-



Ри. 1. Функциональная схема системы адаптивного управления электроконтактной порошковой наплавкой

дачу по стабилизации режимов и оптимизации длительности этого процесса к минимизации функционалов (1)–(3). В неявном виде эта задача может решаться системой адаптивного управления, функциональная схема которой приведена на рис. 1.

Минимизация функционалов (1)–(3) в этой системе происходит по регистрируемым датчиками отклонениям и возмущениям в среде ОУ, влияющим на автоматизированную корректировку работы P, который управляет выходными параметрами ИВ, влияющими на температурный режим электроконтактной порошковой наплавки и его длительность. Стабилизация температурного режима и оптимизация его длительности в этом случае осуществляются по двум признакам – температуре и усадке уплотняемого порошка на основании выполнения двух следующих условий:

$$\begin{cases} \delta_1 = T(t) - T_0 = 0, \\ \delta_2 = h(t) - h_0 = 0. \end{cases} \quad (4)$$

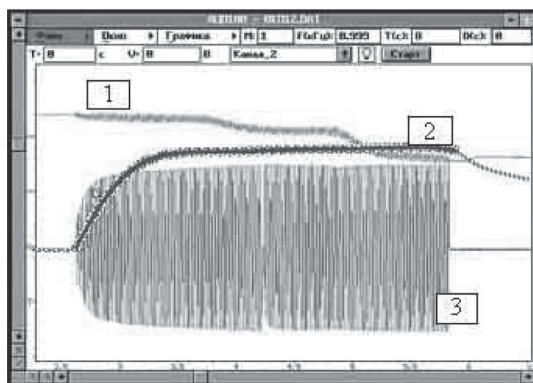
Система адаптивного управления с функциональной схемой, приведенной на рис. 1, может создаваться на основе структурной схемы (рис. 2), включающей в себя измерительные датчики, аналого-цифровой преобразователь с селектором-мультиплексором, цифро-аналоговый преобразователь, управляющую электронно-вычислительную машину (ЭВМ) и высокоэнергетический источник, в качестве которого может быть машина контактной сварки. В качестве управляющей может использо-

ваться и персональная ЭВМ, а аналого-цифровой преобразователь с селектором-мультиплексором и цифро-аналоговый преобразователь конструктивно могут входить в микропроцессорный модуль цифровой обработки сигналов, к которому подключаются измерительные датчики, а при использовании в качестве высокоэнергетического источника машины контактной сварки также подключается внешний канал управления регулятором контактной сварки.

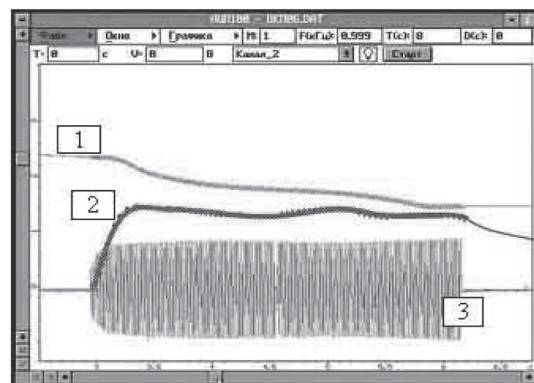
Погрешность стабилизации температуры разогрева и оптимизации длительности порошковой электроконтактной наплавки для системы адаптивного управления определяется точностью работы входящих в функциональную схему (см. рис. 1) элементов, точностью регулятора контактной сварки и точностью работы исполнительных механизмов машины контактной сварки.

Методика исследования, результаты и анализ процесса порошковой электроконтактной наплавки. Для нанесения износостойких покрытий использовали порошки со сферическими частицами фракции 160–200 мкм самофлюсующихся сплавов ПР-Х4Г2Р4С2Ф и ПГ-СР4. Наплавку этих порошков осуществляли на машине контактной сварки МТ-2201 с регулятором контактной сварки РКС 801. Корректировку работы РКС 801 осуществляли согласно функциональной схеме системы адаптивного управления (см. рис. 1). Основу системы адаптивного управления составили такие структурные элементы, как микропроцессорный модуль аналого-цифровой и цифро-аналоговой обработки сигналов, а также измерительные датчики. Технические характеристики структурных элементов системы адаптивного управления приведены в табл. 1, 2.

При порошковой электроконтактной наплавке измерительные датчики размещали на МТ-2201 таким образом, что с их помощью контроль прово-



а



б

Рис. 2. Диаграмма режимов электроконтактной наплавки порошков: а – с системой адаптивного управления; б – без системы адаптивного управления; характер изменения усадки (1); температуры (2); импульсного тока (3)

Т а б л и ц а 1. Характеристики измерительных датчиков

Тип датчика	Характеристика
ДТХ-25	Диапазон измерения тока 0–25 кА; частота измеряемого тока до 300 кГц; точность измерения 1%
ДДХ-600	Диапазон измерения давления воздуха 0–600 кПа; время установки 1 мс; точность измерения 1,5%
ДПХ-005	Диапазон измерения перемещения 0–5 мм, точность измерения 0,5%
LT(DL2, SC)	Диапазон измерения температуры 250–1500 К, диапазон волн ИК излучения 8–14 мкм

Т а б л и ц а 2. Характеристики микропроцессорного модуля

Характеристика	Величина
Внешний интерфейс	RS232; ISA
ОЗУ, Мбайт	16
Количество измерительных каналов	16
Время преобразования аналоговых сигналов в цифровой код, мс	~ 0,1–1
Диапазон входных напряжений, В	± (0–10)
Частота коммутации измерительных каналов, МГц	до 10

дился за следующими параметрами осуществляемого процесса: силой тока в сварочном контуре, давлением воздуха на входе в пневмоцилиндр, задающий усилие сжатия сварочных электродов, и их перемещением. При этом датчик температуры контролировал температуру относительно стенки матрицы.

В качестве материала для нанесения порошковых покрытий использовали стальные (сталь 20) цилиндрические заготовки диаметром 20 мм и высотой 10 мм.

Порошковая электроконтактная наплавка осуществлялась следующим образом.

Сначала на основании работ [5,6, 9–11], с учетом решения уравнений (1)–(3), с помощью ПЭВМ системы адаптивного управления рассчитывали оптимальные значения температуры T_0 , давления p_0 , амплитуды силы тока I_0 и длительности t_0 , определяющие необходимые режимы электроконтактной наплавки. Режимы наплавки устанавливали на МТ-2201 с помощью РКС 801. Затем на этих режимах были получены две опытные партии экспериментальных образцов покрытий, причем одна с использованием, а другая без использования системы адаптивного управления электроконтактной наплавкой. В последнем случае система адаптивного управления работала как регистрирующая.

Механические испытания экспериментальных образцов износостойких покрытий осуществляли на машине трения МТ-2. Металлографические исследования структуры наплавленных покрытий изучали с помощью светового микроскопа МИМ-7 с использованием методики микроскопических исследований металлов и сплавов [12].

Остаточную пористость покрытий определяли количественным стереологическим анализом образцов с помощью программного комплекса обработки и анализа изображений «Autoscan» (разработчик НИИ прикладных физических проблем, г. Минск).

Результаты регистрации режимов электроконтактной наплавки с использованием и без использования системы адаптивного управления показали:

- адаптивное управление приводит (рис. 2, а) к стабилизации температурного режима и совпадению длительностей воздействия электрического тока и усадки порошка;
- отсутствие такой системы может приводить (рис. 2, б) не только к случаям низкой стабильности температурного режима, но и возникновению таких ситуаций, когда длительность воздействия электрического тока превосходит длительность усадки порошка.

Количественный стереологический анализ структуры материала наплавленных порошковых покрытий (рис. 3) показал, что существующая в них остаточная пористость в среднем на 35–40% ниже там, где процесс осуществлялся с использованием системы адаптивного управления электроконтактной порошковой наплавкой. При этом границы разброса остаточной пористости в первом случае (6–10%) в 2 раза меньше, чем во втором (6–16%). Полученные результаты количественного стереологического анализа свидетельствуют о стабилизации структуры материала порошковых покрытий в результате использования при электроконтактной порошковой наплавке системы адаптивного управления.

Металлографические исследования материала покрытий на отдельных образцах, имевших остаточную пористость 6–8% и полученных без использования системы адаптивного управления электроконтактной порошковой наплавкой, выявили трещины (рис. 4) с раскрытием у основания. Отбор таких образцов осуществлялся по диаграммам электроконтактной наплавки порошков (см. рис. 3, б). Причинами появления таких трещин могли быть повышенные термические напряжения, вы-

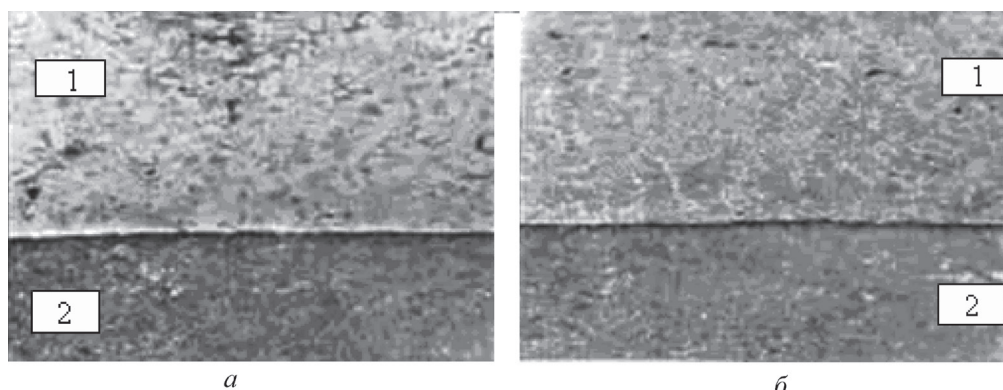


Рис. 3. Структура наплавленных порошковых покрытий: *а* – без системы адаптивного управления; *б* – с системой адаптивного управления: 1 – покрытие; 2 – основа. $\times 200$

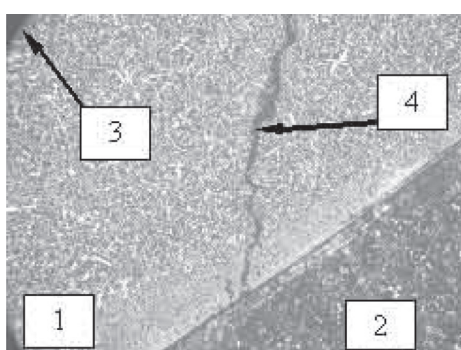


Рис. 4. Структура наплавленных порошковых покрытий без системы адаптивного управления: 1 – покрытие; 2 – основа; 3 – фрагмент поры; 4 – трещина. $\times 200$

званные относительно низкой стабилизацией температурного режима электроконтактной порошковой наплавки, которая привела к разным скоростям охлаждения материалов покрытия и основы.

Механические испытания на машине трения показали, что износостойкость покрытий из самофлюсующихся сплавов, полученных электроконтактной порошковой наплавкой с использованием системы адаптивного управления, в среднем на 10–15% выше, чем у аналогичных покрытий, полученных без использования этой системы.

Выводы

1. Приведенная система адаптивного управления за счет выполняемой в неявном виде миними-

зации функционалов, характеризующих состояние порошкового материала и оказываемое на него термомеханическое воздействие, может обеспечить стабилизацию температуры разогрева и оптимизацию длительности режима порошковой электроконтактной наплавки.

2. Погрешность стабилизации температуры разогрева и оптимизации длительности порошковой электроконтактной наплавки для системы адаптивного управления определяется точностью работы входящих в функциональную схему (см. рис. 1) элементов, точностью регулятора контактной сварки и точностью работы исполнительных механизмов машины контактной сварки.

3. Осуществляемая системой адаптивного управления стабилизация температурного режима и оптимизация длительности электроконтактной порошковой наплавки за счет снижения на 35–40% остаточной пористости и уменьшения вероятности трещинообразования способствуют стабилизации наплавленной структуры порошковых материалов.

4. Использование системы адаптивного управления в порошковой электроконтактной наплавке позволяет повысить износостойкость покрытий из самофлюсующихся сплавов в среднем на 10–15%.

Литература

1. Гаф о Ю. Н. и др. Технология электротермического восстановления и упрочнения рабочих поверхностей деталей машин порошковыми материалами на основе бронзы и самофлюсующихся сплавов // *Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин*: Сб. науч. тр. VII междунар. науч.-техн. конф. В 3-х т. Т. III. Новополоцк: ПГУ, 2009. С. 57–60.
2. Гаф о Ю. Н. и др. Электротермическая наплавка порошковых материалов на узлы трения // *Новые материалы и технологии в машиностроении*: Сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. Брянск: БГИТА, 2008. Вып. 8. С. 23–26.
3. Со с н о в с к и й И. А. Прогрессивные технологии электротермической наплавки порошковых покрытий на узлы трения // *Модели и алгоритмы для имитации физико-химических процессов*: Сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. «МАФП-2008», 5–7 октября 2008 г. Таганрог: ТГПИ. 2008. С. 17–25.
4. Д о р о ж к и н Н. Н., А б р а м о в и ч Т. М., Я р о ш е в и ч В. К. Импульсные процессы нанесения порошковых покрытий. Мн.: Наука и техника, 1985.
5. Д о р о ж к и н Н. Н., М и р о н о в В. А., К о т А. А. Электрофизические методы получения покрытий из металлических порошков. Рига: Зинатне, 1985.

6. Г л е б о в Л. В., П е с к а р е в Н. А., Ф а й г е н б а у м Д. С. Расчет и конструирование машин контактной сварки. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоиздат, Ленингр. отд-ние, 1981.

7. С а р а е в Ю. Н. и др. Разработка принципов адаптивного управления электротехническими процессами наплавки порошковыми материалами // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: Материалы докл. 8-й междунар. науч.-техн. конф., г. Минск, Беларусь 27–28 мая 2008 г. Мн., Ин-т порошковой металлургии ГНПО ПМ, 2008. С. 221–222.

8. K h u d o l e i A. L., K u z n e c h i k O. O. A system for adaptive control of the process of electric resistance surfacing // Welding International. 2003. Vol. 17. N 5. P. 394–398.

9. Л о п а т а Л. А., К р а с о т а М. В. Досягнення рівномірного нагріву порошкових шарів при електроімпульсному прип'яканні металевих порошоків // Тр. Таврической гос. акад. Мелитополь: ТГА. 1999. Т. 7. Вып. 2. С. 67–69.

10. В е р е щ а г и н В. А., Л о п а т а Л. А., Ж о р н и к В. И. Анализ температурных полей при электроконтактном упрочнении деталей сельхозмашин // Конструирование и производство сельхозмашин: межвед. Республ. науч.-техн. сб. Киев, 1989. Вып. 9. С. 88–91.

11. Л о п а т а Л. А. и др. Электроконтактное упрочнение. Мн.: Наука и техника, 1982.

12. Ж а р к о в В. Я., М е л ь н и к о в В. П. Материаловедение. Материаловедение и технология конструкционных материалов. Микроанализ металлов и сплавов: методические указания. Изд. 3-е перераб. и доп. Брянск: БГТУ, 2007.