

ном. Архангельск: Северо-Западное книжное издательство, 1995. 341 с.

5. Сабуров Э.Н., Карпов С.В. Циклонные устройства в деревообрабатывающем и целлюлозно-бумажном производстве. М.: Экология, 1993. 368 с.

References

1. Zaiceva M.L., Orekhov A.N., Saburov E.N. O nekotorykh osobennostyakh aerodinamiki ciklonnykh kamer bol'shoi otnositel'noi dliny [Some features of aerodynamics of relatively long cyclone chambers]. *Vestnik Cherepoveckogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Cherepovets State University], 2013, V. 2, №4 (52), pp. 11–15.

2. Saburov E.N., Ostashev S.I. *Konvektivnyi teploobmen v ciklonnykh sekcionnykh nagrevatel'nykh ustroystvakh* [Convective

heat dissipation in cyclone sectional heat devices]. Arkhangel'sk, 2004. 192 p.

3. Saburov E.N. O vliyanií otnositel'noi dliny ciklonno-vihrevykh nagrevatel'nykh kamer na aerodinamiku greyushchego potoka [The effect of the relative length of the cyclone vortex heating chambers on the aerodynamics of the flow of the heating]. *Kuznechnoshtampovoye proizvodstvo* [Forge and stamping production], 1968, №3, pp. 35–38.

4. Saburov E.N. *Ciklonnye nagrevatel'nye ustroystva s intensifitsirovannym konvektivnym teploobmenom* [Cyclone heat devices with intensive convective heat exchange]. Arkhangel'sk, 1995. 341 p.

5. Saburov E.N., Karpov S.V. *Ciklonnye ustroystva v derevoobrabatyvayushchem i cellyulozno-bumazhnom proizvodstve* [Cyclone devices in the woodworking and pulp and paper production], Arkhangel'sk, 1993. 368 p.

УДК 669.2

Н.А. Петров
ООО «БиМетТех»,
А.А. Комков
ООО «Крейд Плюс»,
А.И. Тартаковский
ООО «Твердослав»

Н.И. Шестаков, Ю.М. Журавлева
Черепоовецкий государственный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА СПЕКАНИЯ, ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОДА НА НИКЕЛЕВОЙ СВЯЗКЕ С ДОБАВКАМИ ЖЕЛЕЗА

В данной статье рассматривается влияние изменения состава электродов, используемых для поверхностного упрочнения электроискровым способом инструмента, применяемого в производстве холодного проката, с кобальтовой связки на железо-никелевую, что позволяет существенно снизить себестоимость готовой продукции. Никель в составе электрода позволяет избавиться от разгарных трещин, появляющихся на обработанной поверхности при температурных колебаниях в большом интервале значений. Введение железа в состав электрода позволяет увеличить прочность и сплошность покрытия. Так же в статье описывается определение оптимальных геометрических параметров электрода.

Электроискровая наплавка, электрод, железо-никелевая связка, спекание твердосплавного электрода.

This article examines the impact of changes in the composition of the electrodes used for surface electrospark hardening of the tool, used in the production of cold rolled steel (from cobalt ligament to the iron-nickel one) that can substantially reduce the cost of the end product. Nickel in the composition of the electrode allows you to get rid of cracks appearing on the surface when the temperature fluctuates in a large range of values. The introduction of iron in the composition of the electrode allows to increase the strength and continuity of coverage. The optimal geometric parameters of electrode are also determined in the article.

Spark welding, electrode, iron-nickel bunch, sintering of carbide-tipped electrode.

Введение

В современной промышленности электроискровая наплавка металлокерамических покрытий осуществляется только ручным способом, так как существуют сложности с автоматизацией электроискровой наплавки с использованием металлокерамических электродов. Для автоматизации процесса объединяют несколько установок (вибромеханизмов) на общий каркас или применяют дисковые или спиральные электроды [11]. Но данные виды автоматизации имеют свои существенные недостатки в виде недостаточной сплошности покрытия либо сложности и больших габаритов конструкции и т.д.

На данный момент используются исключительно электроды на кобальтовой связке. При этом не из-

вестны характеристики поверхности, обработанной электродами из карбида вольфрама на никелево-железной связке методом электроискровой наплавки, так как для электроискровой наплавки впервые будут использоваться данные электроды. Предполагалось, что использование никелевой связки позволит увеличить качество покрытия.

Цель работы – определение оптимального химического состава электродов на никелевой связке с добавками железа, а также увеличение стойкости электродов.

В работе использовался метод металлографического анализа для определения металлургического перемешивания и контроль твердости. Для усовершенствования способа электроискровой наплавки

металлокерамических покрытий определялись оптимальные геометрические параметры электрода, а также был разработан режим спекания электрода-инструмента в вакуумной печи для предотвращения коробления.

Основная часть

В ходе экспериментальных исследований изменялось соотношение компонентов никель – железо в составе электрода. Было изготовлено несколько экспериментальных электродов. Этими электродами с помощью ручной установки электроискровой наплавки была обработана стальная поверхность образцов из Ст45, Ст40Х. Обработанная поверхность была подвергнута анализу на соответствие предъявляемым требованиям.

Твердость поверхности определялась с помощью портативного твердомера МЕТ-У1. Измерение твердости производилась по шкале Роквелла. Сплошность покрытия определялась с помощью микроскоп-камеры МК10. Металлургическое перемешивание определялось косвенно через определение прочности покрытия путем механического воздействия на нанесенный слой. Критерием определения качества металлургического перемешивания являлось отсутствие отслоения покрытия.

Показатели критериев металлургического перемешивания удовлетворяли предъявляемым требованиям. Результаты анализа представлены в таблице.

Таблица

Результаты анализа обработанной поверхности

№ образца	Свойства поверхности	
	Твердость, HRC	Сплошность наплавки, %
1	72	96
2	72	92
3	74	92
4	72	94
5	70	96
6	74	95
7	73	92
8	74	93
9	71	95
10	71	92

Оптимальным составом электродов является основа из твердого сплава ВК15, 8 % никеля и 7 % железа с твердостью покрытия 74 HRC и сплошностью 95 %.

Самая значительная сплошность покрытия твердым сплавом при максимальном сечении электрода была достигнута на наибольшей мощности используемой многоэлектродной установки ALIER. Температура электрода в зоне контакта с обрабатываемой поверхностью должна находиться в интервале ~800–1000 °С (оранжевое свечение). Превышение температуры в зоне контакта до ~1200 °С (желтое свечение)

способствует выгоранию связки и прекращению массопереноса. Снижение температуры в зоне контакта ниже 800 °С препятствует протеканию необходимого металлургического перемешивания частиц наплавляемого материала и обрабатываемой детали, при этом проявляется только адгезия.

Определение оптимального режима спекания электродов необходимо для предотвращения коробления, так как металлокерамические детали из твердого сплава имеют свойство усадки во время спекания. Для изделий с большим отношением длины к диаметру (или минимальной стороны прямоугольного сечения) (>20) происходит коробление электрода. Коробление и искажение формы часто наблюдается в плоских изделиях, толщина которых незначительна по сравнению с длиной. Причиной появления такого вида брака является слишком быстрый подъем температуры при спекании, а также плохое качество перемешивания компонентов шихты. Минимизация коробления возможна путем изменения подъема температуры спекания или повышением качества перемешивания компонентов шихты.

Качество шихты снижается главным образом из-за оседания более тяжелых фракций компонентов. Качество перемешивания шихты повышалось путем дополнительного просеивания через мелкодисперсное сито (3–5 мкм), увеличение времени перемешивания, уменьшение интервалов времени между перемешиванием и засыпкой в пресс-форму. Перед каждой загрузкой шихты осуществлялось повторное ее перемешивание в барабане.

Режим спекания электродов был выбран из рекомендаций Всероссийского научно-исследовательского института твердых сплавов (ВНИИТС). Данный режим приводит к излишнему короблению электрода и не подходит при спекании электродов на никелево-железной связке. Коробление изготавливаемых электродов составляет порядка 8 % от длины электрода. Подобное коробление влечет за собой искривление рабочей контактной окружности электроискровой наплавки, что негативно влияет на сплошность покрытия. Для уменьшения коробления электрода до значения, не превышающего 3 %, необходимо снижение скорости подъема температуры. Но снижение скорости подъема температуры возможно в очень малом диапазоне величин, так как слишком низкая скорость увеличивает время загрузки печи, чем повышает себестоимость продукции. Учитывая все факторы, коробление удалось снизить за счет уменьшения скорости подъема температуры. Разработанный режим спекания электродов представлен на рисунке.

Для спекания использовалась печька СНВЭ-1.3.1/16 с молибденовой корзиной, вольфрамовыми нагревателями и водяным охлаждением корпуса. В соответствии с разработанным режимом спекания электродов скорость подъема температуры до значения 900–960 °С должна составлять 5°С/мин., а до значения 1400–1440 °С – 7 °С/мин. За счет оптимизации режима и увеличения качества перемешивания компонентов шихты коробление удалось снизить с 8 до 3 % от длины электрода.

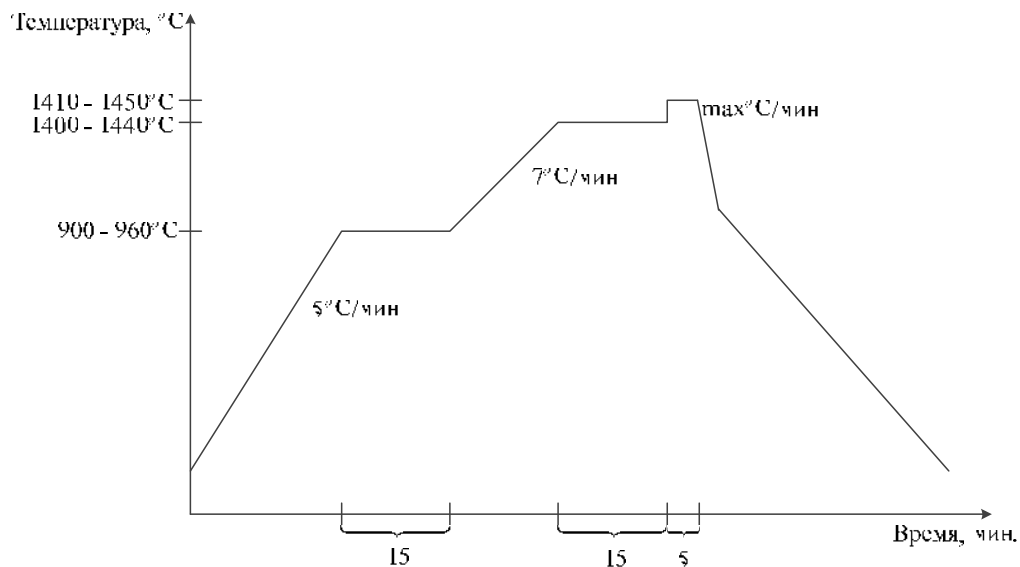


Рисунок. Режим спекания электродов

Поиск оптимальных режимов электроискровой обработки деталей связан с требованиями обеспечения необходимой толщины нанесенного слоя (h) и его микротвердости (H_μ). Функции h и H_μ зависят от многих переменных, которые носят как качественный, так и количественный характер

$$h; H_\mu = f(S_{эл}, m, d_{эл}, n_{об}, n_{эл}, M_{д}, M_{эл}, W, \dots), \quad (1)$$

где $S_{эл}$ — подача электрода, m — число проходов электрода, $d_{эл}$ — диаметр электрода, $n_{об}$ — число оборотов в минуту детали (образца) и электрода, $M_{д}$, $M_{эл}$ — материал детали и электрода, W — энергия единичного искрового разряда.

Параметры $S_{эл}$, $d_{эл}$, $n_{д}$, $n_{эл}$, W имеют размерный характер, а остальные — качественный и безразмерный.

Для конкретных фиксированных значений параметров m , $M_{д}$, $M_{эл}$, $n_{эл}$, функция (1) может быть записана в виде:

$$h; H_\mu = f(S_{эл}, d_{эл}, n_{д}, W, \dots) \quad (2)$$

Как следует из формулы (2), определяющими факторами толщины и микротвердости наплавляемого слоя для конкретных сочетаний материалов электрода и детали являются подача и диаметр электрода, частота вращения детали, а также энергия единичного искрового разряда.

Для определения степени влияния каждого фактора на толщину и качество наплавляемого покрытия использованы методы статистического моделирования, математической моделью для которых является преобразованное уравнение (1) в виде:

$$\begin{aligned} Ln h &= Ln b_0 + b_1 Ln S_{эл} + b_2 Ln d_{эл} + b_3 Ln n_{д} + b_4 Ln W \\ Ln H_\mu &= Ln b_0 + b_1 Ln S_{эл} + b_2 Ln d_{эл} + b_3 Ln n_{д} + b_4 Ln W. \end{aligned}$$

С целью определения оптимальных геометрических параметров электрода были изготовлены электроды прямоугольного сечения: 1,5 x 2 мм, 2 x 2 мм,

3,5 x 3,5 мм, 3 x 2 мм, 6 x 3 мм. Площадь сечения выбиралась исходя из размеров уже используемых электродов.

Электроискровая наплавка производилась на установке ALIER54. Лучшие рабочие свойства показал электрод сечением 1,5x2 мм. В отличие от остальных образцов имел оптимальный нагрев в зоне контакта с обрабатываемой деталью и достаточную сплошность металлокерамического покрытия. Малая площадь сечения электрода обуславливает малую стойкость (малое время расхода) электрода при электроискровой наплавке.

Определено оптимальное соотношение энергии импульса генератора установки ALIER к сечению электрода (коэффициент К). Сечение 1,5x2 мм — 3 мм². Для получения максимальной величины слоя наплавки используется режим с максимальной энергией импульса. Максимальная энергия импульса используемой установки — 4,41 Дж. Оптимальное соотношение энергии импульса генератора установки ALIER к сечению электрода (коэффициент К) равен 1,47. Знание оптимального соотношения энергии импульса генератора установки ALIER к сечению электрода позволит выбрать величину сечения.

Выводы

В результате работы был определен оптимальный состав металлокерамических электродов на никелевой связке с добавками железа: основа из твердого сплава BK15, 8 % никеля и 7 % железа с твердостью покрытия 74 HRC и сплошностью 95 %. Были определены оптимальные геометрические параметры электрода через оптимальное соотношение энергии импульса генератора к сечению электрода. Был определен оптимальный режим спекания электрода в вакуумной печи за счет снижения скорости нагрева, что привело к уменьшению коробления с 8 до 3 %.

Литература

1. Андреевский Р.А. Порошковое материаловедение. М.: Металлургия, 1991. 205 с.

2. Бальшин М. Ю. Порошковое металловедение. М.: Metallurgizdat, 1948. 332 с.
3. Верхотуров А.Д., Муха И.М. Технология электроискрового легирования металлических поверхностей. Киев: Техника, 1982. 181 с.
4. Кипарисов С.С., Либенсон Г.А. Порошковая металлургия. М.: Металлургия, 1991. 432 с.
5. Лазаренко Б.Р. Электроискровая обработка токопроводящих материалов. М.: АН СССР, 1959. 184 с.
6. Петров Ю.Н. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Кишинев, 1985. 196 с.
7. Самсонов Г.В., Верхотуров А.Д., Бовкун Г.А., Сычев В.С. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Киев: Наукова думка, 1976. 219 с.
8. Сафронов Г.В. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Киев: Наукова думка, 1979. 119 с.
9. Федорченко И.М. Основы порошковой металлургии. Киев: Издат. Академии наук Украинской ССР, 1963. 420 с.
10. Цукерман С.А. Порошковая металлургия. М.: Издат. Академия наук СССР, 1958. 158 с.
11. Энциклопедия по машиностроению XXL, 2015. URL: <http://mash-xxl.info/>

References

1. Andreevskii R.A. *Poroshkovoe materialovedenie* [Powder materials]. Moscow: Metallurgiya, 1991. 205 p.

2. Bal'shin M.Iu. *Poroshkovoe metallovedenie* [Powder metallography]. Moscow: Metallurgiya, 1948. 332 p.
3. Verhoturov A.D., Muha I.M. *Tehnologiya elektroiskrovogo legirovaniia metallicheskih poverkhnostei* [Technology of electrosark alloying metal surfaces]. Kiev: Tehnika, 1982. 181 p.
4. Kiparisov S.S., Libenson G.A. *Poroshkovaia metallurgiya* [Powder materials]. Moscow: Metallurgiya, 1991. 432 p.
5. Lazarenko B.R. *Elektroiskrovaia obrabotka tokoprovodiashchih materialov* [Electric disintegration of conductive materials]. Moscow: AN SSSR, 1959. 184 p.
6. Petrov Iu.N. *Elektroiskrovoe legirovanie metallicheskih poverkhnostei* [Electric spark alloying of metal surfaces]. Kishinev, 1985. 196 p.
7. Samsonov G.V., Verhoturov A.D., Bovkun G.A., Sychev B.C. *Elektroiskrovoe legirovanie metallicheskih poverkhnostey* [Electric spark alloying of metal surfaces]. Kiev: Naukova dumka, 1976. 219 p.
8. Safronov G.V. *Elektroiskrovoe legirovanie metallicheskih poverkhnostey* [Electric spark alloying of metal surfaces]. Kiev: Naukova dumka, 1979. 119 p.
9. Fedorchenko I.M. *Osnovy poroshkovoi metallurgii* [Fundamentals of powder metallurgy]. Kiev: Izdat. Akademii nauk Ukrainskoi SSR, 1963. 420 p.
10. Tsukerman S.A. *Poroshkovaia metallurgiya* [Powder materials]. Moscow: Akademiia nauk SSSR, 1958. 158 p.
11. *Enciklopediia po mashinostroeniiu XXL* [Encyclopedia of mechanical engineering], 2015. Available at: <http://mash-xxl.info/>

УДК 004.021

Н.И. Шаханов, И.А. Варфоломеев, Е.В. Еришов, О.В. Юдина
Череповецкий государственный университет

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОТКАЗОВ ОБОРУДОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ МАЛОГО КОЛИЧЕСТВА ПОЛОМОК

Предложена модель прогнозирования отказов оборудования на основе алгоритма машинного обучения Random Forest. Рассмотрены ключевые этапы построения и настройки модели. Модель включает в себя несколько подмоделей, прогнозирующих отказ оборудования, используя фактические и прогнозируемые показания с датчиков. График разности в показаниях фактического и прогнозного значения сигналов в последующий промежуток времени используется для выявления отказов и аномалий. Обучение модели проводится на нормальных данных, а настройка модели на данных о предыдущих поломках.

Прогнозирование отказов, машинное обучение, Random Forest, дерево решений, модель.

Model predicting equipment failures based on machine learning algorithm Random Forest is suggested. The key stages of construction and configuration of the model are considered. The model includes several sub-models predicting equipment failure, using the actual and forecasted readings from the sensors. Schedule difference in the readings of actual and forecasted values of the signals in the subsequent period of time is used to detect failures and anomalies. Model's training is conducted on normal data, setting thresholds on data with breakdowns.

Forecasting failures, machine learning, Random Forest, decision tree, model.

Введение

Финансовые потери от ошибочных решений о прекращении эксплуатации промышленного оборудования или, наоборот, о необоснованном продлении его ресурса измеряются миллионами рублей. Это делает задачу оценки оборудования и прогнозирования его отказов чрезвычайно актуальной для обеспечения планирования его загрузки и ремонтов, безопасной эксплуатации. Наличие достаточно точного

прогноза отказов сможет обеспечить высокую надежность, безопасность и экономическую эффективность эксплуатации промышленных объектов [1].

Основной путь повышения эксплуатационной надежности состоит в том, чтобы прогнозировать неисправности устройств. На основании прогноза неисправностей устройств предсказывают возможности выхода оборудования из строя, что позволяет выявлять неисправные устройства для их последую-