

Восстановление деталей лесозаготовительных машин электроконтактной сваркой порошковых материалов в магнитном поле

В.С. Черевань^a, О.М. Тимохова^b

Ухтинский государственный технический университет, ул. Первомайская, 13, Ухта, Республика Коми, Россия

^a www.30.06.1996@mail.ru, ^b chonochka@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0001-7475-6036>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-3179-6382>

Статья поступила 11.10.2021, принята 09.11.2021

Причиной отказов машин является в основном процесс неизбежного износа сопрягаемых деталей. Более того, было доказано, что более 80 % деталей узлов и агрегатов многих тракторов и автомобилей выходят из строя при незначительном износе деталей, иногда не превышающем 0,1 мм. Одним из прогрессивных способов восстановления с очевидными преимуществами по сравнению с другими аналогичными методами ремонта деталей является электроконтактная сварка присадочных материалов и их смесей на изношенные поверхности автокомпонентов в магнитном поле. Оптимальные геометрические параметры электромагнитного устройства ($d/2L = 2,8$) определяются при наименьшем значении магнитодвижущей силы ($F = 1,25 \cdot 10^{-3}$ А). Доказано влияние тока обмотки возбуждения электромагнита на толщину формируемого покрытия до 1,5 мм и более. Определена возможность нанесения (сварки) стальной и чугуновой стружки с размерами частиц от 400 до 1 000 мкм и контроля толщины наносимого слоя, изменения магнитного поля и размера частиц стружки. В этом случае можно получить слой толщиной до 1,6 мм. Испытания на износ образцов показали высокую износостойкость полученных сварных покрытий по сравнению с эталонными стальными образцами.

Ключевые слова: электроконтактная сварка; оксидно-керамические покрытия; магнитное поле; ферромагнитный порошок; восстановление детали; электрод; сплав.

Restoration of logging machines parts with electrocontact welding of powder materials in a magnetic field

V.S. Cherevan^a, O.M. Timokhova^b

Ukhta State Technical University; 13, Pervomayskaya St., Ukhta, Republic of Komi, Russia

^a www.30.06.1996@mail.ru, ^b chonochka@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0001-7475-6036>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-3179-6382>

Received 11.10.2021, accepted 09.11.2021

The cause of machine failures is mainly the process of inevitable wear of the mating parts. Moreover, it is proved that more than 80% of parts of components and assemblies of many tractors and cars fail with minor wear of parts, which sometimes doesn't exceed 0.1 mm. One of the progressive methods of restoration with obvious advantages in comparison with other similar methods of repair of parts is electric contact welding of filler materials. One of the ways to expand the capabilities of the technology is the application of metal powder materials and their mixtures on the worn surfaces of automotive components in a magnetic field. The optimal geometric parameters of the electromagnetic device ($d/2L = 2.8$) are determined at the lowest value of the magnetomotive force ($F = 1.25 \cdot 10^{-3}$ A). The influence of the current of the electromagnet excitation winding on the thickness of the formed coating up to 1.5 mm or more is proved. The possibility of applying (welding) steel and cast iron chips with particle sizes from 400 to 1000 microns and controlling the thickness of the applied layer, changing the magnetic field and the size of the chip particles is determined. In this case, it is possible to get a layer up to 1.6 mm thick. The wear tests of the samples has shown a high wear resistance of the resulting welded coatings compared to the reference steel samples.

Keywords: electric contact welding; oxide-ceramic coatings; magnetic field; ferromagnetic powder; restoration of a part; electrode; alloy.

Введение. Восстановление деталей — важная часть ремонта машин. Восстановление деталей является одним из наилучших способов сократить расходы запасных деталей, позволяет сэкономить денежные средства и человеческий труд, а также способствует защите окружающей природы за счет этапов,

направленных на производственные мероприятия. Как правило изготовление новых деталей является долгим и дорогостоящим процессом, так как состоит из ряда последовательно связанных операций по выплавке, обработке и ряда других операций. Наиболее

оптимальным решением является восстановление изношенных частей оборудования [1–3].

Проблемы восстановления деталей машин путем их восстановления ведутся во всем мире, но огромный научный потенциал в этой области накоплен в основном в научных образовательных организациях России. В настоящее время разработаны различные методы и способы восстановления путем нанесения слоя на изношенные поверхности деталей машин [4].

Как правило, занимаются восстановлением именно дорогостоящих деталей, так как покупка новых деталей является наиболее дорогим мероприятием. Как показывает практика, износ сложных деталей является незначительным, что, в свою очередь, требует более точного метода восстановления.

Обширный анализ геометрии (длина, ширина, высота, диаметр и размеры рабочих поверхностей) показал, что в ремонтной промышленности при восстановлении деталей из общей массы имеются покрытые цилиндрические детали соответственно с незначительным износом до 0,6 мм наружных поверхностей, т. е. детали валового типа с диапазоном диаметров от 10 до 80 мм и длиной до 800 мм. Поэтому, на наш взгляд, выбор наиболее подходящей технологии восстановления должен основываться на результатах показаний дефектоскопии деталей и технологических возможностях получения высококачественных наносимых покрытий на рабочие поверхности машин с перечисленными геометрическими параметрами и с наименьшими потерями металла.

Многолетние исследования ученых в области ремонта и восстановления деталей показывают, что характеристика геометрической формы деталей машин и их износ различны, но большинство деталей тракторов и автомобилей изнашиваются неравномерно, и большинство деталей валового типа, которые устанавливаются на технике, являются очень важными элементами конструкции и наиболее дорогостоящими. Для восстановления этих деталей следует учитывать все показатели, от которых зависят надежность и долговечность техники. На основе экспериментов было доказано, что на качество восстанавливаемой техники влияет множество факторов.

Известно, что для восстановления мелких и средних деталей с небольшим количеством износа электроконтактная сварка порошковых материалов и их смесей является универсальным методом.

Наиболее очевидными преимуществами данного способа являются более высокая производительность процесса (60 см²/мин), незначительная глубина зоны термического воздействия, отсутствие деформации детали в процессе и после восстановления деталей, возможность совмещения упрочнения поверхности нанесенного слоя с процессом сварки, минимальные потери металлического порошка (в 3...4 раза по сравнению с методами дугowego восстановления), возможность контроля толщины нанесенного слоя и высокая экологичность процесса сварки.

Целью исследования является повышение эффективности процесса восстановления поврежденных деталей лесозаготовительных машин электро-

контактной сваркой порошковых материалов в магнитном поле.

Задачи исследования:

1. Определить способы создания магнитного поля в зоне приварки;
2. Теоретически изучить влияние магнитного поля на толщину получаемого покрытия и потери присадочного материала;
3. Экспериментально изучить влияние магнитного поля.

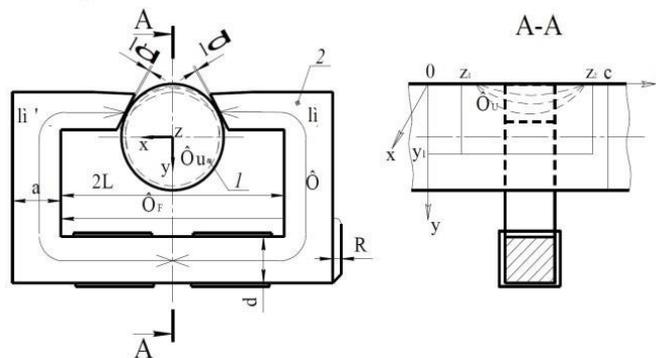


Рис. 1. Схема подвода магнита к поверхности детали: 1 — детали; 2 — электромагнита [5–7]

Материалы и методы. С целью проведения исследований по выявлению влияния магнитного поля на процесс формирования поверхности при электроконтактной сварке порошковых материалов экспериментально определены наиболее технологичные конструкции магнитопроводов. В результате для теоретического обоснования была выбрана конструкция магнитопровода. Схема питания поверхности детали и путь прохождения магнитного поля через деталь показаны на рис. 1.

Как видно на рисунке, для уменьшения потока рассеяния (Φ_F) достаточно плотно подвести концы магнитопровода к поверхности восстановленного участка непосредственно с противоположных сторон, теоретически предполагая, что при этих условиях, при данном расположении детали и магнитопровода будет обеспечиваться наименьшее сопротивление [7].

На практике же прилегание электромагнита не будет обеспечено в должной мере, но при намагничивании магнитопровод будет симметричен, тогда следует, что уравнение Кирхгофа примет вид [5; 11; 12]:

$$\Phi \cdot R_M + \Phi_F R_F = F \quad (1)$$

$$\Phi_U \cdot (R_S + R_U) - \Phi_F R_F = 0 \quad (2)$$

$$\Phi = \Phi_F + \Phi_U \quad (3)$$

Теоретически в предположении, что магнитный поток от полюса электромагнитное устройство, проникает в рамках $\Phi_U = B_S \cdot S_S = \mu_0 H \cdot d \cdot R$ и, решая уравнения, представленные выше (1)–(3), определяют магнитную силу электромагнита [7]:

$$F = \Phi_U \left[\left(\frac{R_\delta + R_U}{R_F} + 1 \right) \cdot R_M + R_\delta + R_U \right] \quad (4)$$

Учитывая принятые обозначения, приведенные на рис. 1, а также по магнитной проницаемости различных материалов ремонтируемых деталей определялось магнитное сопротивление [8–10]:

$$R_U = \frac{\int_0^{\frac{L+d}{2}} H(X,0, \frac{C+R}{2}) dx}{\int_0^{z_1} \int_{y_1}^{z_2} \mu(H) \cdot H_1 dy dz} \quad (5)$$

В этом случае в числителе получается магнитный поток, а в знаменателе — падение магнитного потенциала в детали, которое зависит от магнитной проницаемости $\mu(H)$, напряженности поля H и диаметра сечения восстанавливаемой детали.

Используя полученные формулы, можно более точно определить конструктивные параметры электромагнитного устройства.

Основной целью использования магнитного поля в зоне сварки является увеличение и удержание ферромагнитного порошка в момент его приварки к поверхности детали. Здесь необходимо создать высокую интенсивность магнитного потока в зоне сварки. Схема формирования порошкового слоя на поверхности детали с помощью магнитного поля рассмотрена на рис. 2 [7].

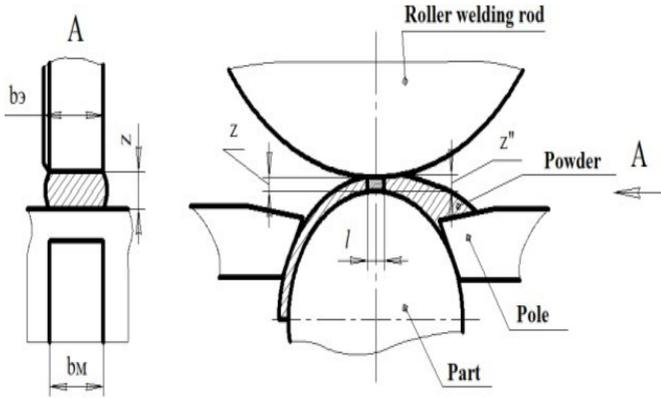


Рис. 2. Схема формирования толщины (нанесенный слой)

Одной из характеристик электроконтактной сварки является прерывистость процесса наплавки [8; 9]. Рассматривая процесс сварки порошка как отдельно свариваемую точку, по форме он чаще всего имеет форму эллипса. Предполагая, что сварная точка имеет симметричную форму с одинаковыми размерами по бокам ($l = b$) и разной плотностью слоя в разных частях, для упрощения исследования форма сварной точки представляется в виде призмы со сторонами l , b и z . Учитывая вышеизложенное, толщина (Z) сварного слоя будет определяться следующим соотношением [7]:

$$Z = \frac{V}{S} = \left(\frac{m/\rho}{S} \right) \times k, \quad (6)$$

где ρ — плотность спеченного покрытия, $г/см^3$; m — масса намагниченного порошка, $кг$; $S = l \times b$ — площадь сварочного пятна, $м^2$; $k = (z - z')/z$ — усадка порошка.

Формула (6) — это математическое отражение формирования толщины наносимого слоя покрытия, изображенное на рис. 2. На рис. 3 представлена диаграмма сил, влияющих на ферромагнитный порошок, который располагается на поверхности детали в тот момент, когда отсутствует импульс тока. Отсюда можно сделать вывод, что сила пропускаемого магнитного тока притягивает ферромагнитный порошок через систему «магнитопровод – деталь» [5–7].

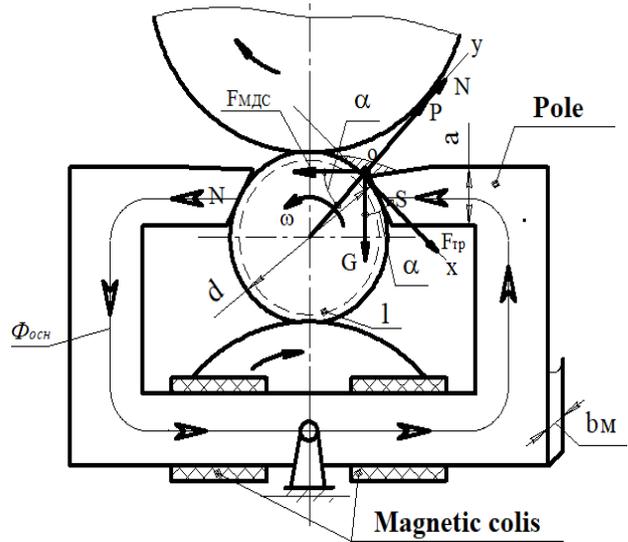


Рис. 3. Диаграмма сил, действующих на ферромагнитный порошок

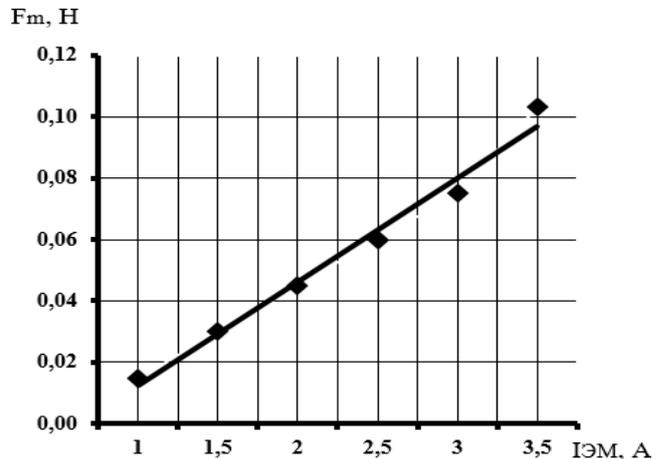


Рис. 4. График зависимости силы F_m от тока обмотки возбуждения электромагнита $i_{ЭМ}$

Единицей измерения магнитодвижущей силы $f_{МДС}$ является ампер, но силы, представленные на диаграмме, измеряются в ньютонах.

Для нахождения силы, определяемой влиянием $f_{МДС}$, был проведен трансляционный эксперимент, основной результат которого представлен на рис. 4 как зависимость $F_m = f(i_{ЭМ})$. Полученный график позволил нам в последующих расчетах перевести силу (F_m), определяемую влиянием магнитодвижущей силы

fМДС, на ток обмотки возбуждения ЭМ (iЭМ). Используя полученные формулы и графики, были получены формулы для определения массы (m) ферромагнитного порошка в зоне сварки и толщины полученного покрытия (Z) [7]:

$$m = \frac{F_m \cdot (\sin \alpha - f \cdot \cos \alpha)}{(\cos \alpha - f \sin \alpha) + f \cdot \omega^2 \cdot R} \quad (7)$$

$$Z = \frac{k \cdot F_m \cdot (\sin \alpha - f \cdot \cos \alpha)}{S \cdot \rho \cdot ((\cos \alpha - f \sin \alpha) + f \cdot \omega^2 \cdot R)} \quad (8)$$

Результаты теоретических и экспериментальных исследований. Эксперименты по нанесению ферромагнитного порошка на поверхность детали показали хорошие результаты по плотности и однородности получаемого слоя, незначительным потерям ферромагнитного порошка и получению многослойных покрытий.

Конструкция установки позволяет осуществлять сварку ферромагнитных порошков по различным схемам применения [11–14].

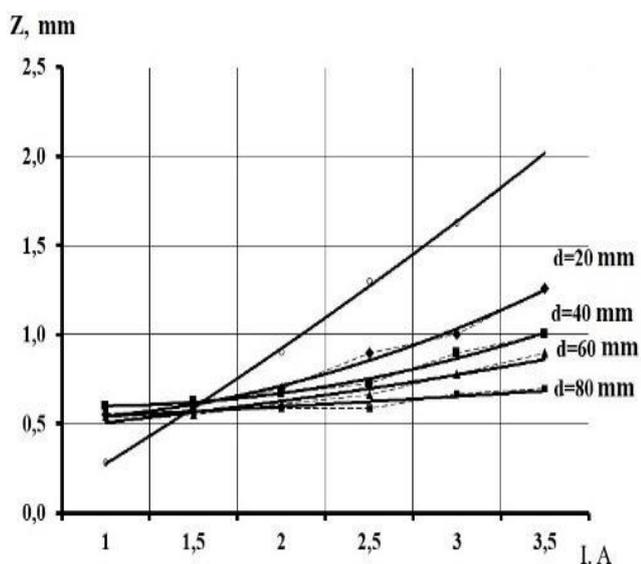


Рис. 5. Зависимости тока электромагнита (iЭМ) от толщины наносимых покрытий (Z) при различных диаметрах деталей

В результате обработки экспериментальных данных видно, что импульс сварочного тока влияет на накопление ферромагнитного порошка и, следовательно, на изменение толщины наносимого покрытия. Усиление величины электромагнитного тока влияет на формирование толщины наносимого покрытия, где благодаря его воздействию толщина слоя достигает 1,6 мм. При различных схемах сварки можно регулировать и получать различную толщину покрытия.

Кроме того, экспериментальные исследования показали, что толщина получаемых покрытий также изменяется при нанесении порошков с различными размерами фракций ферромагнитного порошка и

величиной электромагнитного тока (iЭМ) (рис. 5 и 6). Например, при нанесении ферромагнитных порошков в переменном магнитном поле при использовании чугуновой и стальной стружки это позволяет комплексно увеличивать толщину покрытий. В то же время, насыпная плотность чугуновой стружки значительно меньше насыпной плотности стальной стружки, поэтому при использовании чугуновой стружки толщина слоя формируется гораздо интенсивнее, чем при нанесении стальной стружки [22].

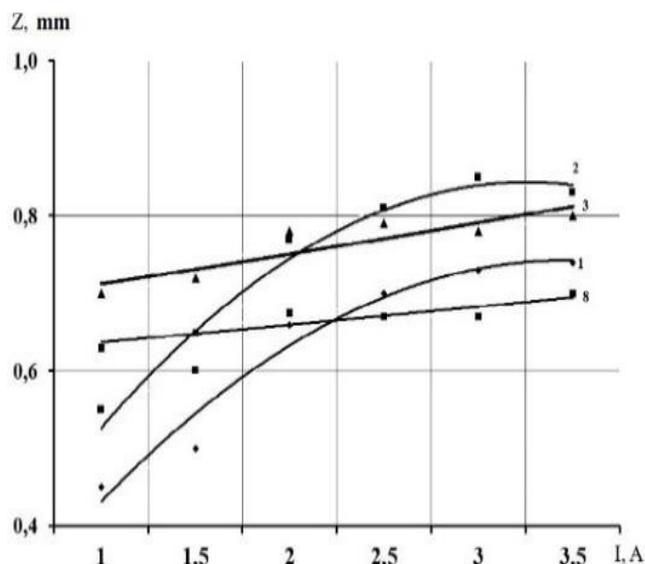


Рис. 6. Зависимости толщины полученных покрытий (Z) по току электромагнита (iЭМ) и размеру частиц ферромагнитного порошка в микронах: 1 — Ш 18 (200–400); 2 — Ш 18 (400–1000); 3 — сталь 45 (200–400); 4 — сталь 45 (400–1200)

Одним из важных показателей сварки ферромагнитного порошка на поверхности восстанавливаемых электроконтактной сваркой деталей является потеря присадочного материала. В ходе практических экспериментов по оценке этого показателя с помощью электромагнита было установлено, что расположение магнитопровода относительно дисковых электродов существенно влияет на осыпание избыточного ферромагнитного порошка. Наилучший эффект намагничивания восстановленного участка детали достигается при установке магнитопровода электромагнита на одной оси со сварочными электродами. Графические результаты экспериментов представлены на рис. 2.

На рис. 7 видно, что при наименьшем токе электромагнита (iЭМ = 1 А) для образцов с малым диаметром до 20 мм потери присадочного материала — порошка составляют около 60 %, при увеличении диаметра образцов потери уменьшаются, при использовании образцов диаметром 80 мм потери составят не более 40 %. В свою очередь, величина тока электромагнита (iЭМ) до 3,5 А снижает потери до 10 %.

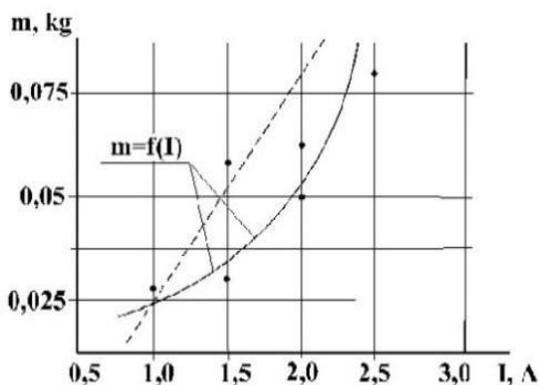


Рис. 7. Влияние величины потерь ферромагнитного порошка

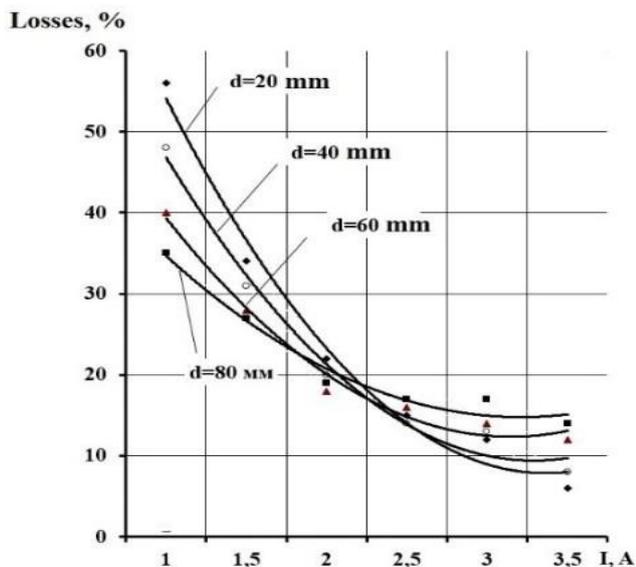


Рис. 8. Зависимость массы (m) порошка, удерживаемого в зоне сварки, от тока электромагнита ($iЭМ$) и диаметра образцов

Технологические свойства порошков также важны, это влияет на формирование толщины покрытия. Результаты исследований в этом направлении заключались в сравнении теоретических предпосылок с экспериментальными и определении массы ферромагнитного порошка в зоне сварки, которая в дальнейшем определяет толщину наносимого покрытия. Корреляционный анализ ранее описанной теоретической гипотезы и экспериментальных данных был проведен путем измерения массы ферромагнитного порошка на поверхности детали в момент ее сварки, в различных режимах сварки при изменении магнитного тока электромагнита на образцах диаметром 50 мм. Результаты исследования представлены на рис. 8. Полученный график показывает, что при увеличении концентрации ферромагнитного порошка в момент сварки он совпадает с моментом прохождения импульса тока, проходящего через систему «электрокомпонент – электрод», а также при воздействии внешнего магнитного поля с увеличением тока электромагнита до 2,5 А. Последующее увеличение магнитного тока не влияет на концентрацию наибольшего количества ферромагнитного порошка. Как показывают графические результаты, существует небольшое расхождение

между кривыми, полученными экспериментально и теоретически [15–17].

Выводы исследований одного из важнейших показателей сварочных порошков доказывают, что использование внешнего магнитного поля в момент нанесения порошка обладает способностью снижать потери при восстановлении цилиндрических деталей. Исследование качественных характеристик является окончательным анализом применения разработанного метода на практике. Одной из основных характеристик качества является прочность сцепления наносимого ферромагнитного порошка с основным металлом. Определение этого показателя проводилось по стандартной методике, в исследованиях использовались различные схемы нанесения ферромагнитных порошков и железной стружки различных размеров и марок. Для сравнения адгезионной прочности был использован цельный кусок стали 45. Эксперименты показали, что адгезионная прочность полученных покрытий с использованием металлической стружки с размерами частиц 800–1000 мкм снижается примерно на 30 МПа. Благодаря экспериментам мы пришли к выводу, что сварку порошков можно производить двумя способами. Первый способ — это подача порошка в верхнюю часть детали, второй способ — подача порошка одновременной в верхнюю и нижнюю часть сварки (рис. 9).

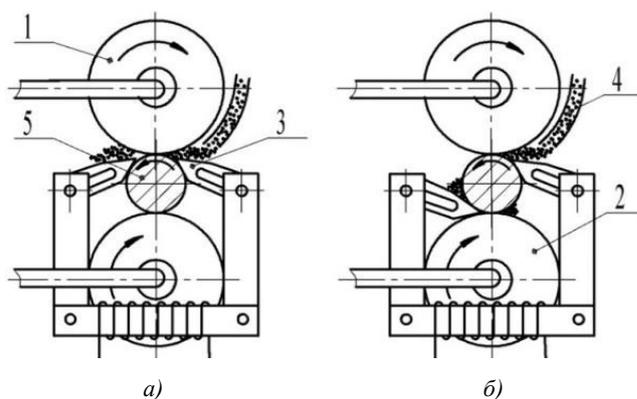


Рис. 9. Способы подачи порошков в места сварки: а) первая схема — подача в верхнюю зону сварки; б) вторая схема сварки — подача в верхнюю и нижнюю зоны сварки; 1, 2 — электроды; 3 — полюс; 4 — порошок; 5 — извлекаемая часть

Было установлено, что на прочность сцепления покрытия и детали влияет именно способ подачи порошковых материалов. Применение второго способа нанесения сварки понижает прочность покрытия до 30 МПа, особенно применение присадочных материалов с размерами 800–1000 мкм.

Поэтому для достижения эталонной прочности в некоторых случаях необходимо было увеличить сварочный ток до 700 А/мм, а давление на ролики — до 300 Н/мм. Низкая адгезионная прочность (от 110 до 120 МПа) наблюдалась в образцах, полученных с использованием чугушной стружки. Этот наполнитель подходит для деталей, испытывающих легкие нагрузки. Применение стальной стружки и ферромагнитного

порошка марки ФБХ-6-2 показывает хорошие результаты прочности до 180 МПа. В ходе экспериментов было выявлено, что для получения высокой адгезионной прочности необходимо регулировать режимы нанесения (сварки). В ходе длительных испытаний и экспериментов были определены наиболее оптимальные режимы осаждения рекомендуемых порошков.

Также одним из показателей качества покрытий, получаемых электроконтактной сваркой порошковых материалов, является пористость покрытий. Этот показатель оценивался на покрытиях образцов, полученных при различных режимах сварки, при одновременном условии достаточной высокой адгезии покрытия к основанию. В то же время, при изменении диапазона регулирования тока электромагнита от 1 до 2,5 А пористость изменялась незначительно (от 5 до 10 %). Пористость свариваемой поверхности служит качественной и количественной характеристикой порошковых материалов и определяет плотность и другие физико-механические свойства деталей [18–21].

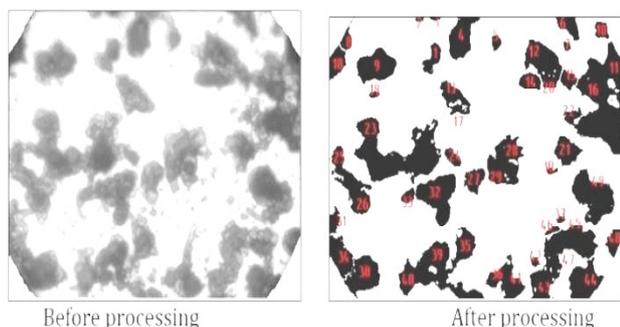


Рис. 10. Обработка фотографий микроструктур

Литература

1. Габитов И.И., Сайфуллин Р.Н., Фархшатов М.Н., Неговорал С.Г., Мударисов Е.Р., Хасанов Р.Р., Галиуллин Ф.З., Габдрафиков Н.М., Валиев В.А. Упрочнение клапанных узлов электрогидравлических форсунок дизелей при ремонте // Технические и прикладные науки. 2018. Вып. 13. С. 8.
2. Черноиванов В.И., Лялякин В.П., Аулов В.Ф., Ишков А.В., Кривочуров Н.Т., Иванайский В.В., Соколов А.В. Особенности износа деталей сельскохозяйственной техники, упрочненных композитными боридными покрытиями // Журнал трения и износа. 2015. Т. 36. С. 132-137.
3. Чжан Х., Чжан Х., Лю З., Мяо К. Понимание теорий и методов оценки эксплуатационной надежности оборудования, при обнаружении, диагностике, прогнозировании и управлении (SDPC), Междунар. конференция 2017 г., IEEE. С. 367-370.
4. Халфин М.А., Хисметов Н.З., Сидыганов Ю.Н. Перспективы развития инженерно-технической сферы АПК России в новых экономических условиях // Ремонт, восстановления, модернизация. 2003. № 5. С. 23-25.
5. Щетинина В.И., Щетинин С.В. Регулирование магнитного поля сварочной дуги // Сварочное производство. 2014. № 3. С. 3-7.

Пористость определялась при помощи определенной программы и представлена на (рис. 10). Дальнейшее увеличение напряженности магнитного поля позволило получить не пористое покрытие [5–7].

Заключение

В ходе экспериментов было установлено, что внешнее воздействие магнитного поля позволяет повысить технологичность процесса электроконтактной сварки за счет концентрации ферромагнитных порошковых материалов в зоне сварки и снижает потери дорогостоящего порошкового материала. Благодаря теоретическим изучениям электромагнитного устройства ($d/2L = 2,8$) были определены его оптимальные параметры при наименьшем показателе магнитодвижущей силы ($F = 1,25 \times 10 - 3$ А). Также исследования показали, что увеличение тока до 3,5 А позволяет увеличить толщину и самого покрытия до 1,5 мм и выше.

Успешно проверена возможность нанесения (сварки) стальной и чугуновой стружки с размерами частиц от 400 до 1 000 мкм на поверхность образцов. Результаты исследований также показали возможность контроля толщины наносимого слоя (до 1,6 мм) путем изменения размера частиц и влияния магнитного поля. Получены следующие результаты по технологическим и эксплуатационным свойствам поверхностей [22; 23]:

1. Разработан технологический процесс восстановления изношенных деталей электроконтактной сваркой порошковых материалов в магнитном поле.
2. Определены оптимальные геометрические параметры П-образного электромагнита при минимальном значении магнитодвижущей силы.
3. Экспериментально определена возможность приварки порошка по двум схемам: с подачей в верхнюю зону приварки и с подачей в нижнюю и верхнюю зоны приварки.

6. Гайтов Б.К., Кашин Ю., Копелевич Л., Самородов А., Кашин А. Производство магнитных цепей для осевого сварочного оборудования. 2017. Вып. 10. С. 823-826. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09507116.2017.1343985> (дата обращения: 14.11.2021).
7. Слейд П.Г., Тейлор Э., Лавол А. Влияние структуры осевого магнитного поля на пороговый сварочный ток для замкнутых контактов вакуумного прерывателя осевого магнитного поля в электрических контактах, 2017, IEEE. С. 253-257. URL: <https://s3-us-west-2.amazonaws.com/ieeeshutupages/xplore/xplore-ie-notice.html> (дата обращения: 14.11.2021).
8. Бурак П.И., Латыпов Р.А. Влияние промежуточного слоя на свойства покрытия из стали 50ХФА, полученного контактной сваркой сопротивлением // Welding International. 2012. № 26. Вып. 7. С. 547-549.
9. Бурак П.И., Серов А., Латыпов Р.А. Оптимизация процесса контактной сварки металлических лент аморфным припоем // Welding International. 2012. Вып. 26. С. 814-818.
10. Нафиков М.З. Формализованное описание процесса формирования сварного соединения при контактной приварке проволок // Сварочное производство. 2014. № 6. С. 10-14.
11. Вардавулиас М., Эконому С., Папапанос Г. Восстановление промышленных компонентов с использованием тех-

- нологий термического распыления // Технологии модификации поверхности. 2006. Т. XVIII. С. 195-200.
12. Князьков В.Л., Петрова Е.Е., Пимонов М.В., Мелкозерных Н.В. Исследование характера повреждений деталей машин с целью оптимизации технологии восстановления // Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении (ТЭК-2017): сб. тр. междунар. науч.-практической конф. (18-21 апр. 2017 г.). Кемерово, 2017. С. 92-98.
 13. Цзяньцзюнь Х., Юэцинь М., Юнфэй Ф., Цзяньчан Л., Хунце Л. Восстановление зубчатого вала с помощью реактивной электроискровой сварки нарастающим током // Труды Китайского общества сельскохозяйственного машиностроения. 2008.
 14. Косенко П.В. Применимость существующих методов обновления в технологии ремонта винтовых компрессоров // Материаловедение и инженерия. 2017. Т. 233. DOI: 10.1088/1757-899X/233/1/012027.
 15. Лялякин В.П., Иванов В.П. Восстановление и упрочнение деталей машин в агропромышленном комплексе России и Белоруси // Ремонт, восстановление, модернизация. 2004. № 2. С. 2-7.
 16. Курчаткин В.В. Надежность и ремонт машин. М.: Колос, 2000. 775 с.
 17. Валиев М.М. Магнитные цепи и электромагнитные устройства. Уфа: Изд-во БГАУ, 2000. 87 с.
 18. Бругинский Л.Б., Валков В.Г. Восстановление электроконтактной наваркой поверхностей тел вращения с большим износом // Ремонт, восстановление, модернизация. 2003. № 10. С. 20-21.
 19. Понамарев А.А. Разработка восстановления поверхностей качения электроконтактной наваркой проволокой: дис. ... канд. техн. наук. М., 2004. 213 с.
 20. Петров М.Ю. Упрочнение рабочих органов почвообрабатывающих машин композиционными материалами: дис. ... канд. техн. наук. М., 2005. 130 с.
 21. Порошки для газотермического напыления и наплавки покрытий, производимые российскими производителями. Справочный материал // Ремонт, восстановление, модернизация. 2006. С. 8.
 22. Эдвард К., Чин Т. Х., Аптигроув С. Обеспечение надежной работы компрессоров устаревшего газа с использованием новых методов ремонта // Междунар. конф. по нефтегазовым технологиям, 2014. URL: <https://onepetro.org/IPTCONF/proceedings-abstract/14IPTC/All-14IPTC/IPTC-18202-MS/153532> (дата обращения: 14.11.2021).
 23. Коломейченко А.В., Шарифуллин С.Н., Кузнецов Ю.А., Логачев В.Н., Титов Н.В. Повышение ресурса деталей машин, работающих комбинированными методами с использованием плазменного электролитического окисления // Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий: X Юбилейная междунар. науч.-техническая конф. (05-08 нояб. 2018 г.) Казань, 2018. С. 324-331.
 - wear of agricultural machinery parts reinforced with composite boride coatings // Journal of Friction and Wear. 2015. V. 36. P. 132-137.
 3. CHzhan H., CHzhan H., Lyu Z., Myao K. Understanding Theories and Methods for Assessing Equipment Serviceability in Detection, Diagnosis, Prediction and Control (SDPC), Mezhdunar. konferenciya 2017 g., IEEE. P. 367-370.
 4. Halfin M.A., Hismetov N.3., Sidyganov YU.N. Prospects for the development of the engineering and technical sphere of the agro-industrial complex of Russia in the new economic conditions // Remont, Vosstanovlenie, Modernizatsiya (Repair, Reconditioning, Modernization). 2003. № 5. P. 23-25.
 5. SHCHetinina V.I., SHCHetinin S.V. Regulation of the magnetic field of the welding arc // Welding International. 2014. № 3. P. 3-7.
 6. Gajtov B.K., Kashin YU., Kopelevich L., Samorodov A., Kashin A. Production of magnetic circuits for axial welding equipment. 2017. Vyp. 10. P. 823-826. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09507116.2017.1343985> (data obrashcheniya: 14.11.2021).
 7. Slejd P.G., Tejlor E., Lavol A. Effect of Axial Magnetic Field Structure on Threshold Welding, 2017, IEEE. P. 253-257. URL: <https://s3-us-west-2.amazonaws.com/ieeeshutpages/xplore/xplore-ie-notice.html> (data obrashcheniya: 14.11.2021).
 8. Burak P.I., Latypov R.A. Influence of the intermediate layer on the properties of the 50KhFA steel coating obtained by resistance welding // Welding International. 2012. № 26. Vyp. 7. P. 547-549.
 9. Burak P.I., Serov A., Latypov R.A. Optimization of the process of resistance welding of metal strips with amorphous solder // Welding International. 2012. Vyp. 26. P. 814-818.
 10. Nafikov M.Z. Formalized description of the process of forming a welded joint in resistance welding of wires // Welding International. 2014. № 6. P. 10-14.
 11. Vardavulias M., Ekonomu S., Papapanos G. Recovery of Industrial Components Using Thermal Spraying Technologies, Surface Modification Technologies. 2006. V. XVIII. P. 195-200.
 12. Knyaz'kov V.L., Petrova E.E., Pimonov M.V., Melkozernyh N.V. Fine-grained, Investigation of the nature of damage to machine parts in order to optimize recovery technology // Innovacii v toplivno-energeticheskom komplekse i mashinostroenii (TEK-2017): sb. tr. mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (18-21 apr. 2017 g.). Kemerovo, 2017. P. 92-98.
 13. Czhan'czyun' H., YUeczin' M., YUnej F., Czhan'chan L., Huncze L. Reconditioning a Gear Shaft Using Reactive Electric Spark Rising Current Welding // Trudy Kitajskogo obshchestva sel'skohozyajstvennogo mashinostroeniya. 2008.
 14. Kosenko P.V. Applicability of existing renovation methods in screw compressor repair technology // Materials Science and Engineering. 2017. V. 233. DOI: 10.1088/1757-899X/233/1/012027.
 15. Lyalyakin V.P., Ivanov V.P. Restoration and hardening of machine parts in the agro-industrial complex of Russia and Belarus // Remont, Vosstanovlenie, Modernizatsiya (Repair, Reconditioning, Modernization). 2004. № 2. P. 2-7.
 16. Kurchatkin V.V. Reliability and repair of machines. M.: Kolos, 2000. 775 p.
 17. Valiev M.M. Magnetic circuits and electromagnetic devices. Ufa: Izd-vo BGAU, 2000. 87 p.
 18. Broginskij L.B., Valkov V.G. Restoration by electrocontact welding of surfaces of bodies of revolution with high wear //

References

1. Gabitov I.I., Sajfullin R.N., Farhshatov M.N., Negovoral S.G., Mudarisov E.R., Hasanov R.R., Galiullin F.Z., Gabdrarifov N.M., Valiev V.A. Strengthening of valve assemblies of electro-hydraulic nozzles of diesel engines during repair // Technical and applied sciences. 2018. Vyp. 13. P. 8.
2. SHERNOIVANOV V.I., LYALYAKIN V.P., AULOV V.F., ISHKOV A.V., KRIVUCHUROV N.T., IVANAJSKIY V.V., SOKOLOV A.V. Features of

- Remont, Vosstanovlenie, Modernizatsiya (Repair, Reconditioning, Modernization). 2003. № 10. P. 20-21.
19. Ponamarev A.A. Development of restoration of rolling surfaces by electrocontact welding with wire: dis. ... kand. tekhn. nauk. M., 2004. 213 p.
20. Petrov M.YU. Strengthening the working bodies of tillage machines with composite materials: dis. ... kand. tekhn. nauk. M., 2005. 130 p.
21. Powders for thermal spraying and surfacing of coatings produced by Russian manufacturers // Remont, Vosstanovlenie, Modernizatsiya (Repair, Reconditioning, Modernization). 2006. P. 8.
22. Edvard K., CHin T. H., Aptigrouv S. Ensuring Reliable Operation of Agile Gas Compressors Using New Repair Techniques // Mezhdunar. konf. po neftegazovym tekhnologiyam, 2014. URL: <https://onepetro.org/IPTCONF/proceedings-abstract/14IPTC/All-14IPTC/IPTC-18202-MS/153532> (data obrashcheniya: 14.11.2021).
23. Kolomejchenko A.V., SHarifullin S.N., Kuznecov YU.A., Logachev V.N., Titov N.V. Increasing the resource of machine parts operating by combined methods using plasma electrolytic oxidation // Nizkotemperaturnaya plazma v processah naneseniya funkcional'nyh pokrytij: X YUbilejnaya mezhdunar. nauch.-tehnicheskaya konf. (05-08 noyab. 2018 g.) Kazan', 2018. P. 324-331.