

УДК 631.31

DOI 10.37670/2073-0853-2020-86-6-144-149

Методика проведения лабораторных исследований процесса плазменной наплавки

В.А. Шахов¹, д-р техн. наук, профессор; **П.Г. Учкин**¹, канд. техн. наук; **М.Г. Аристанов**¹, инженер; **В.С. Коляда**, канд. техн. наук; **В.А. Смелик**², д-р техн. наук, профессор

¹ ФГБОУ ВО Оренбургский ГАУ

² ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский ГАУ

Плазменная наплавка является одним из прогрессивных способов восстановления деталей машин, в том числе и сельскохозяйственных. Перед проведением эксплуатационных испытаний необходимо провести лабораторные исследования для определения оптимальных параметров процесса плазменной наплавки. В статье представлены методика и результаты лабораторных испытаний покрытий, нанесённых плазменным способом. Описаны установки и оборудование, применяемые при проведении исследований. Проведённые исследования позволили установить оптимальные значения параметров плазменной наплавки при нанесении покрытий, содержащих карбид вольфрама, которыми являются значения: сила тока – 200 А, скорость наплавки – 5 м/ч, содержание карбида вольфрама – 50 % по объёму порошка при наплавке смесей без модификатора. При добавлении в смесь оксида алюминия параметры будут следующими: сила тока – 180 А, скорость наплавки – 5 м/ч, содержание карбида вольфрама – 35 %. При использовании данных параметров возможно получение слоя с твёрдостью, равной 70 HRC, и износостойкостью до 3 раз больше по сравнению с новой деталью.

Ключевые слова: плазменная наплавка, параметры, сила тока, микротвёрдость, микроструктура.

Одним из энергосберегающих способов восстановления изношенных деталей является плазменная наплавка порошковых материалов [1–3]. Данный вид восстановления имеет множество преимуществ, стержневыми из которых являются небольшая глубина проплавления тела основного материала детали и отсутствие перемешивания наплавленного металла в расплаве.

Проведённые ранее теоретические исследования [4, 5] позволяют спрогнозировать свойства наносимого покрытия, получаемого плазменной наплавкой, и управлять его качеством при помощи технологических параметров.

При использовании аналитических выражений [1, 4, 6], с помощью которых можно подобрать режим нанесения покрытий, как правило, принимаются условные допущения. Это снижает уровень точности и требуется уточнение и корректировка посредством проведения экспериментальных исследований.

Материал и методы исследования. Лабораторные исследования включали следующие этапы:

- разработка и сборка установки для плазменной наплавки;
- получение различных составов порошков и определение их плотности;
- плазменная наплавка образцов порошками с разными составами и различными технологическими параметрами;
- определение плотности наплавленного металла на образцах;
- измерение твёрдости образцов;
- исследование микроструктуры образцов;
- исследование химического состава слоя;
- испытание образцов на износостойкость.

Лабораторные исследования осуществлялись в лабораториях кафедры «Технический сервис»

ФГБОУ ВО «Оренбургский ГАУ».

Для реализации способа плазменной наплавки была разработана и собрана установка [7], позволяющая осуществлять процесс как в автоматическом, так и в ручном режимах (рис. 1).

Перед проведением наплавки были сформированы порошковые смеси: ПГ-С27 «Сормайт» + ВК-8 ($WC + W_2C + 8\% Ni$) с различным содержанием карбида вольфрама, так как с изменением его количества меняется плотность как самого порошка, так и полученного наплавленного слоя. Выбор «Сормайта» в качестве матрицы обусловлен тем, что у него железная основа, и именно она хорошо работает в условиях ударно-абразивного изнашивания. В часть смесей добавляли модификатор – нанопорошок оксида алюминия (Al_2O_3). Таким образом, пять составов содержали только порошок карбида вольфрама, с его содержанием от 40 до 60 % по объёму и с шагом 5 %, а также пять смесей с содержанием нанопорошка оксида алюминия с его количеством 0,5–1,5 % по объёму с шагом 0,25 %. При этом содержание карбида вольфрама в смеси составляло 35 %, так как в ряде исследований [1, 8, 9] эта величина будет оптимальной при работе покрытия с содержанием модификатора в условиях ударно-абразивного изнашивания.

Далее все смеси взвешивались объёмом 10 см^3 на аналитических электронных весах GR-200, затем определялась их плотность. Также взвешивались образцы размером $40 \times 110\text{ мм}$ из стали 65Г, на которые наплавливались покрытия, для того чтобы затем определить плотность нанесённого материала по разности масс до и после наплавки.

Наплавка проводилась при следующих режимах: сила тока – от 180 до 230 А с шагом 10 А; скорость наплавки варьировала от 3 до 7 м/ч с шагом 0,5 м/ч; напряжение – величина постоян-

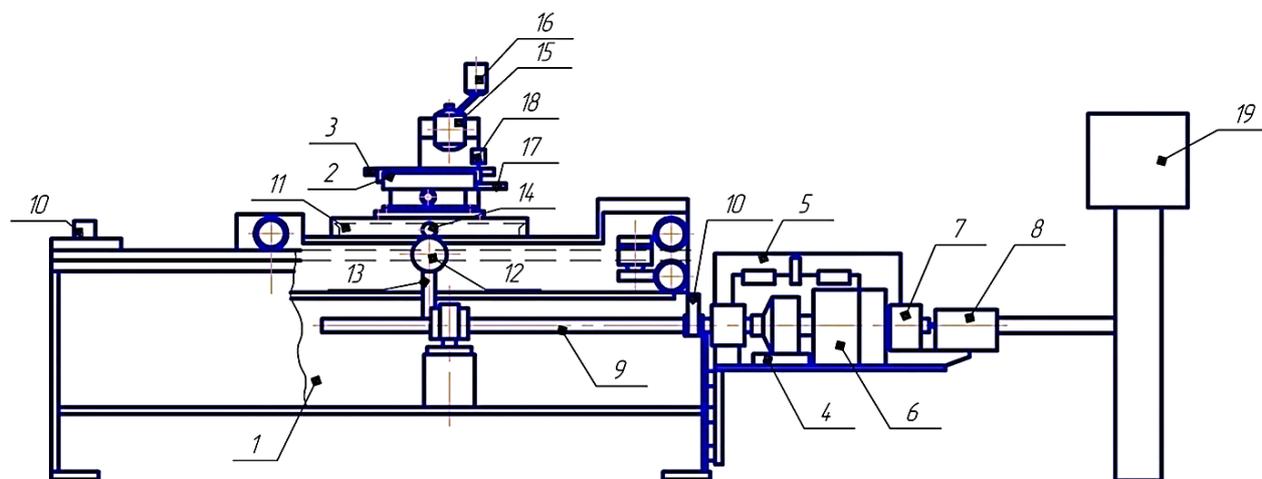


Рис. 1 – Установка для плазменной наплавки:

- 1 – станина; 2 – тиски; 3 – восстанавливаемая деталь; 4 – привод продольного перемещения; 5 – электродвигатель; 6 – редуктор; 7 – ременная передача; 8 – тахогенератор; 9 – ходовой винт; 10 – конечные выключатели; 11 – привод поперечного перемещения; 12 – шестерня; 13 – ходовой винт; 14 – направляющая; 15 – плазмотрон; 16 – порошковый питатель; 17 – пирометр; 18 – магнитное устройство; 19 – блок управления

ная, равная 35 В. Было проведено трёхфакторное моделирование эксперимента, поэтому в итоге было получено 540 наплавленных образцов. Образцы нумеровались маркером непосредственно после проведения наплавки и остывания для исключения его стирания в процессе опыта.

У полученных образцов измеряли твёрдость наплавленного металла с помощью твердомера «ТЕМП-2» с динамическим принципом действия. Согласно ГОСТу 22975–78 измерения твёрдости покрытия проводили на расстоянии не менее 5 мм между точками, количество – не меньше 4 раз по шкале Роквелла.

С помощью инвертированного металлографического микроскопа МИКРОМЕД МЕТ проводили исследование микроструктуры. Данный микроскоп позволяет получать изображение микроструктуры покрытия и переносить его на монитор компьютера в реальном времени.

Для изучения микроструктуры необходимо подготовить микрошлифы (рис. 2) с фрагментами полученных при наплавке валиков. Процесс подготовки микрошлифов включал в себя вырезку кусочка наплавленного образца, исключаящую нагрев металла, для сохранения исходной микроструктуры без искажения. Затем отрезанный кусочек заливался в специальную форму эпоксидной смолой ЭДП. Далее проводили шлифовку, в процессе которой происходило торцевание поверхности. Завершающим этапом было полирование с помощью пасты ГОИ. Для определения микроструктуры шлифы протравливались 5%-ным раствором азотной кислоты в этиловом спирте.

Исследование химического состава наплавленного материала проводилось оптическим эмиссионным анализатором металлов и сплавов PMI-MASTERUVR. С помощью данного анализатора проводится экспресс-анализ химического состава металлов, содержащих углерод, фосфор,



Рис. 2 – Подготовленные микрошлифы, наплавленные плазменным способом порошками с разным содержанием карбида вольфрама, запрессованные в эпоксидную смолу

серу и другие элементы (попадающие в ультрафиолетовую область спектра), с точностью до 0,005 %.

PMI-MASTER оснащается датчиком-пистолетом, имеющим адаптер и систему «JetStream», заключающуюся в обтекании потоком аргона электрода, обеспечивая небольшой расход газа и делая анализатор более устойчивым к значительным перепадам температур, перемещению в пространстве и вибрации поверхности.

Анализатор может работать в двух режимах – «дуга» и «искра». При использовании режима «дуга» (проводится без аргона) делаются анализы по идентификации и сортировке, а при работе в режиме «искра» (используется аргон) делаются точные измерения на содержание различных элементов в составе металла.

В нашем случае использовался режим «искра» для определения содержания элементов, входящих в состав наплавленного шва. Для химического анализа использовались наплавленные образцы без каких-либо предварительных манипуляций, так как они удовлетворяют требованиям при измерении.

Для изучения вопросов износостойкости нанесённых покрытий в Оренбургском ГАУ была разработана установка для ускоренного испытания наплавленных образцов на базе токарно-винторезного станка 1К62 (рис. 3) [10], создающая разнообразные условия работы при помощи шлифовальных кругов разной зернистости (0,15 и 0,30 мм). Совместно испытываются три образца, одновременно прижимаемые к двум абразивным кругам с одинаковым усилием. В рамках испытания выставляется усилие прижатия образцов, равное $P = 0,12$ МПа. Частота вращения шпинделя выставляется равным $n_{шпн} = 1600$ об/мин.

Перед и после испытания на износ образцы взвешиваются на электронных весах ANDGR-300 и измеряется высота наплавленного слоя при помощи штангенрейсмаса, в котором закреплена индикаторная головка с цифровым отсчётным устройством Micron и установочной плоскостью [11–13].

Результаты исследования. Анализ результатов исследования показал, что с увеличением содержания карбида вольфрама твёрдость покрытия увеличивается до величины 70 HRC при содержании карбида вольфрама 50 %. Дальнейшее увеличение количества карбида не влияет на твёрдость в связи с переизбытком его частиц, что приводит к их выкрашиванию с поверхности и низкой адгезии с матрицей. Присутствие нанопорошка оксида алюминия в смеси также способствует повышению твёрдости до 67 HRC при содержании модификатора в количестве 1,25 % по объёму, и затем также наблюдается её снижение, связанное с переизбытком центров кристаллизации.

При наплавке смесей без модификатора увеличение силы тока между деталью и соплом до 200 А приводит к повышению твёрдости в связи с лучшим оплавлением карбида вольфрама и лучшей сцепляемостью с основным металлом. Дальнейшее повышение силы тока негативно влияет на твёрдость. Это связано с тем, что частицы карбида вольфрама начинают расплавляться и перемешиваться с металлом матрицы и самой детали, приводя к изменениям в кристаллической решётке, и тем самым снижая твёрдость наплавленного слоя. При наилучшем сочетании силы тока и твёрдости скорость наплавки составляет 5 м/ч.

При нанесении покрытий с модификатором с повышением силы тока до 180 А также наблюдается повышение твёрдости, а затем снижение. Однако с повышением количества модификатора повышается и поверхностная энергия наноразмерных частиц оксида алюминия, что увеличивает глубину проплавления основного металла. Содержание модификатора при указанной силе тока будет составлять 1,25 % по объёму.

Исследование микроструктуры показывает, что все наплавленные слои характеризуются развитой дендритной структурой, вызванной малыми скоростями охлаждения, отличаясь лишь количеством центров зарождения кристаллизации, тем самым формируя макроструктуру металла шва. При увеличении объёма карбида в смесях без модификатора возрастает количество вводимой энергии, необходимой для лучшего оплавления всех его частиц, что способствует образованию ячеек в связи с увеличением скорости охлаждения, так как она складывается из скоростей

охлаждения матрицы порошка и карбида. При этом карбид вольфрама обладает высокой теплопроводностью, тем самым не увеличивая задержки тепла, а скорость охлаждения будет зависеть от скорости охлаждения «Сормайта», которого в смеси будет становиться меньше при увеличении количества вольфрама в одной и той же единице объёма. Таким образом, структура наплавленного металла становится дендритно-ячеистого типа, который нам и необходим. Для получения данной структуры режимы наплавки находятся в следующих пределах: сила тока – 190–210 А, скорость наплавки – 4,0–5,0 м/ч, содержание карбида вольфрама – 40–50 % от объёма. Дальнейшее увеличение карбида способствует повышению скорости охлаждения и понижению градиента температур, что приводит к переходу к ячеистому типу структуры.

Структура наплавленных слоёв при нанесении порошков, содержащих оксид алюминия, характеризуется развитой дендритно-ячеистой структурой при содержании модификатора в количестве 1,25 %. В остальных случаях преобладает либо дендритная структура (до 1,0 % модификатора), либо ячеистая (свыше 1,5 % оксида алюминия). Для получения дендритно-ячеистой структуры должны быть следующие режимы наплавки: сила тока – 170–180 А, скорость наплавки – 4,5–5,0 м/ч.

Анализируя данные химического анализа, можно сделать следующий вывод: количество примесей зависит в основном от соотношения карбида вольфрама и матрицы, а также модификатора (в смесях с его присутствием), т.к. примеси содержатся в «Сормайте», причём чем

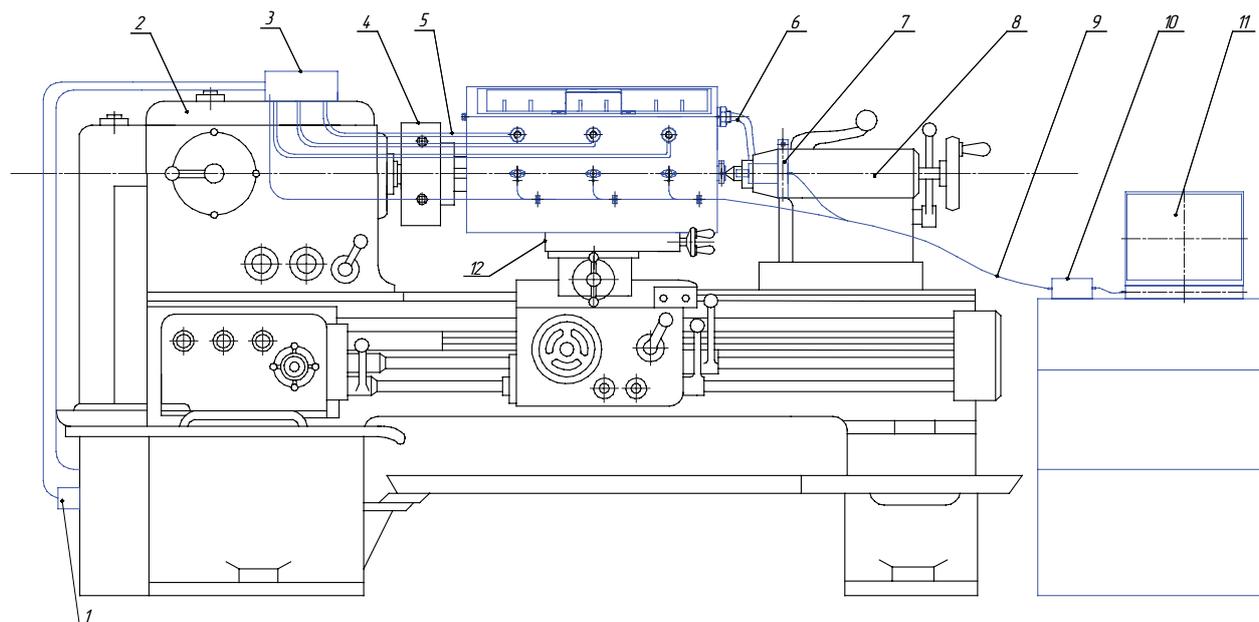


Рис. 3 – Установка для исследования процессов износа деталей машин:

1 – гидрораспределительный клапан; 2 – токарно-винторезный станок; 3 – гидрораспределитель; 4 – трёхкулачковый патрон; 5, 6 – трубопровод; 7 – датчик оборотов; 8 – задняя бабка; 9 – соединительные провода; 10 – контроллер; 11 – компьютер; 12 – суппорт с установкой для испытаний

больше его количество в смеси, тем больше количество примесей в металле шва, которые, как правило, скапливаются на границе между основным металлом и нанесённым, что приводит к некачественной адгезии наплавленного слоя.

Экспериментальные исследования на износостойкость показали, что большее её значение характерно для слоёв, имеющих большую твёрдость (более 65 HRC), дендритно-ячеистую микроструктуру при содержании карбида вольфрама 50 % в смесях без модификатора и наличие таких же показателей при содержании оксида алюминия 1,25 %. При этих параметрах износостойкость полученных покрытий выше, чем у деталей без них, в 2,5–3 раза.

Выводы. Проведённые исследования позволили установить оптимальные значения параметров плазменной наплавки при нанесении покрытий, содержащих карбид вольфрама: сила тока, равная 200 А, скорость наплавки – 5 м/ч, содержание карбида вольфрама – 50 % по объёму порошка при наплавке смесей без модификатора. При добавлении в смесь оксида алюминия параметры будут следующими: сила тока – 180 А, скорость наплавки – 5 м/ч, содержание карбида вольфрама – 35 %. При использовании данных параметров, возможно получение слоя с твёрдостью, равной 70 HRC и износостойкостью до 3 раз больше по сравнению с новой деталью.

Литература

- Ожегов Н.М., Лялякин В.П., Слинко Д.Б. Особенности нанесения тонкостенных покрытий плазменно-порошковой наплавкой стационарной и импульсной дугой // Сварочное производство. 2017. № 10. С. 28–33.
- Анализ способов восстановления рабочих органов глубокорыхлителей / П.Г. Учкин, В.А. Шахов, С.А. Соловьёв [и др.] // Инженерному образованию – научную основу: матер. национ. Рос. науч.-технич. конф. Оренбург, 2018. С. 18–23.
- Обоснование параметров и выбор оборудования для плазменной наплавки порошков с содержанием карбида вольфрама при восстановлении рабочих органов сельскохозяйственных машин / В.А. Шахов, П.Г. Учкин, В.С. Коляда [и др.] // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2018. № 3 (71). С. 144–146.
- Шахов В.А., Учкин П.Г. Влияние различных факторов на качество восстановленной плазменным способом поверхности // Качественный рост агропромышленного комплекса: возможности, проблемы и перспективы: матер. междунар. конгресса. СПб.: Экспофорум, 2018. С. 269–273.
- Учкин П.Г., Шахов В.А. Использование порошков с добавлением карбида вольфрама для плазменной наплавки рабочих органов глубокорыхлителей // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2017. № 6 (68). С. 92–96.
- Шахов В.А., Учкин П.Г., Шаркаев Р.Р. Расчёт режимов процесса плазменной наплавки при восстановлении рабочих органов сельскохозяйственных машин // Вклад молодых учёных в аграрную науку: сб. науч. трудов по матер. Междунар. науч.-практич. конф. 17–18 апреля 2018 г. Кинель, 2018. С. 352–355.
- Пат. на полезную модель № 191023 РФ. Установка для плазменной наплавки рабочих органов сельскохозяйственных машин / В.А. Шахов, П.Г. Учкин, В.П. Чернышев. Оpubл. 19.07.2019. Бюл. № 20.
- Князьков К.В. Разработка технологии модифицирования износостойких покрытий системы Ni-Cr-B-Si-Fe/WC в процессе плазменно-порошковой наплавки: дис. ... канд. техн. наук. Барнаул, 2015. 125 с.
- Шахов В.А., Аристанов М.Г., Ларионов Е.П. Надёжность зарубежной почвообрабатывающей техники в условиях Оренбургской области // Машинно-технологическая станция. 2010. № 6. С. 23.
- Пат. на изобретение № 2675208 РФ. Установка для исследования износа деталей машин / В.А. Шахов, М.Г. Аристанов, П.Г. Учкин. Оpubл. 17.12.2018. Бюл. № 35.
- Чернышёв В.П., Шахов В.А. Практикум по основам надёжности сельскохозяйственной техники: учебное пособие. Оренбург: Издательский центр ОГАУ, 2000. 76 с.
- Практикум по надёжности технических систем сельскохозяйственных машин: учебн. пособ. / В.Е. Рогов, В.П. Чернышев, В.А. Шахов [и др.]. Оренбург: Издательский центр ОГАУ, 2012. 76 с.
- Чернышев В.П., Шахов В.А., Учкин П.Г. Курсовое проектирование по организации ремонта в мастерских хозяйств: учебн. пособ. Оренбург: Издательский центр ОГАУ, 2016. 86 с.

Шахов Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор

Учкин Павел Григорьевич, кандидат технических наук

Аристанов Максим Галимжанович, инженер

Коляда Виталий Сергеевич, кандидат технических наук

ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет»

Россия, 460014, г. Оренбург, ул. Челюскинцев, 18

E-mail: shahov-v@yandex.ru; pu1985@rambler.ru; srvg1982@rambler.ru

Смелик Виктор Александрович, доктор технических наук, профессор

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет»

Россия, 196601, г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, Петербургское шоссе, 2

E-mail: agro@sbgau.ru

Technique for laboratory studies of the plasma surfacing process

Shahov Vladimir Alexandrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor

Uchkin Pavel Grigorievich, Candidate of Technical Sciences

Aristanov Maksim Galimzhanovich, engineer

Kolyada Vitaly Sergeevich, Candidate of Technical Sciences

Orenburg State Agrarian University

18, Chelyuskintsev St., Orenburg, 460014, Russia

E-mail: shahov-v@yandex.ru; pu1985@rambler.ru; srvg1982@rambler.ru

Smelik Viktor Aleksandrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor
St. Petersburg State Agrarian University
2, Petersburg highway, Pushkin, St. Petersburg, 196601, Russia,
E-mail: agro@spbgau.ru

Plasma surfacing is one of the progressive methods of restoring machine parts, including agricultural ones. Before carrying out operational tests, it is necessary to conduct laboratory studies to determine the optimal parameters of the plasma cladding process. The article presents the methodology and results of laboratory tests of plasma-applied coatings. Also described are the installations and equipment used in the research. The studies carried out made it possible to establish the optimal values of the parameters of plasma surfacing when depositing coatings containing tungsten carbide, which are the following values: current equal to 200 A, surfacing rate 5 m/h, tungsten carbide content 50 % by volume of the powder when surfacing mixtures without a modifier. When adding aluminum oxide to the mixture, the parameters will be as follows: current – 180 A, deposition rate – 5 m/h, tungsten carbide content – 35 % Using these parameters, it is possible to obtain a layer with a hardness equal to 70 HRC and wear resistance up to 3 times higher than with a new part.

Key words: *plasma surfacing, parameters, current strength, microhardness, microstructure*