

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ
ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКОЙ**

© 2024 г. **В. А. Шахов¹**, доктор технических наук, **П. Г. Учкин¹**, кандидат технических наук,
И. М. Затин¹, кандидат технических наук, **М. И. Голубев²**, кандидат технических наук

¹Оренбургский государственный аграрный университет,
460014, Оренбург, ул. Челюскинцев, 14

²Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,
Мытищинский филиал,

141005, Московская обл., Мытищи, ул. 1-я Институтская, 1
E-mail: shahov-v@yandex.ru

В связи с изменениями размеров и геометрической формы рабочих органов почвообрабатывающих машин, эксплуатируемых в условиях абразивной среды, возникает необходимость разработки технологий восстановления и упрочнения их деталей. Цель исследования – определение рациональных режимных параметров лазерной наплавки для формирования оптимальной микроструктуры износостойких покрытий. Лазерные слои, нанесенные наплавкой, исследовали на предмет формирующейся структуры и получившейся твердости. Всего был рассмотрен 121 образец, с использованием которых были проведены эксперименты со следующими комбинациями параметров: мощность лазерного излучения – 2100... 2900 Вт с шагом 200 Вт; скорость перемещения оптической головки (скорость наплавки) – 5...11 мм/с с шагом 2 мм/с; содержание карбида вольфрама в смеси – 45...55 % с шагом 2 %. В качестве износостойкого материала использовали смесь порошков, включающую 43...53 % железной основы, в виде порошка ПГ-С27 «Сормайт», с частицами размером 80 мкм, 45...55 % упрочняющей фазы в виде карбида вольфрама с частицами размером 15 мкм и 2 % нанопорошка оксида алюминия Al_2O_3 с частицами размером 70 нм. Для формирования необходимой дендритно-ячеистой структуры наплавленного износостойкого покрытия ледебуритного типа необходимо соблюдать следующие параметры: мощность лазерного излучения – 2500...2700 Вт, скорость наплавки – 7...9 мм/с, содержание карбида вольфрама – 49...53 % от объема смеси порошков. Рациональные режимные параметры для получения покрытий с повышенной твердостью: скорость наплавки – 7 мм/с; содержание карбида вольфрама в порошковой смеси – 51 %; мощность лазерного излучения – 2700 Вт.

**DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR RESTORATION AND HARDENING OF WORKING
BODIES OF TILLAGE MACHINES BY LASER SURFACING**

V. A. Shakhov¹, P. G. Uchkin¹, I. M. Zatin¹, M. I. Goloubev²

¹Orenburg State Agrarian University,
460014, Orenburg, ul. Chelyuskintsev, 14

²Bauman Moscow State Technical University, Mytishchi branch,
141005, Moskovskaya obl., Mytishchi, ul. 1-ya Institutskaya, 1
E-mail: shahov-v@yandex.ru

The article proposes a technology for restoring and strengthening the working bodies of tillage machines, including laser surfacing with a mixture of powders containing tungsten carbide to obtain a wear-resistant work surface. The purpose of the study is to determine the rational operating parameters of laser surfacing for the formation of the microstructure of wear-resistant coatings. The laser layers deposited by surfacing were examined for the resulting structure and the resulting hardness to match the modes of laser surfacing and the indicators of abrasive wear resistance. A total of 121 samples were deposited. A mixture of powders is used as a wear-resistant material, including 43...53 % of the iron base in powder form PG-C27 «Sormayt», with particle sizes of 80 microns, 45...55 % of the hardening phase in the form of tungsten carbide with particle sizes of 15 microns and 2 % aluminum oxide Al_2O_3 nanopowder with particle sizes of 70 nm. During the study of the microstructure, the parameters of the surfacing mode were determined, allowing to achieve the necessary dendritic-cellular structure deposited wear-resistant coating of the ledeburite type: laser radiation power 2500...2700 W, the surfacing speed is 7...9 mm/s, the content of tungsten carbide is 49...53 % of the volume powder mixtures. Theoretical studies of the laser surfacing process aimed at obtaining coatings with increased hardness have made it possible to determine the rational operating parameters for surfacing wear-resistant coatings: the deposition rate is 7 mm/s; the content of tungsten carbide in the powder mixture is 51 %; the laser radiation power is 2700 watts.

Ключевые слова: лазерная наплавка, рабочие органы, износостойкость, твердость, упрочнение, восстановление, карбид вольфрама.

Keywords: laser surfacing, working bodies, wear resistance, hardness, hardening, restoration, tungsten carbide.

Рабочие органы почвообрабатывающих машин эксплуатируются в условиях абразивной среды, что вызывает изменения их размеров и геометрической формы. Исходя из этого, возникает необходимость разработки технологий восстановления и упрочнения деталей с целью повышения долговечности, поскольку ресурс новых рабочих органов не всегда оказывается значительным. Таким образом, разработка технологий

восстановления с одновременным упрочнением рабочих органов почвообрабатывающих машин – актуальная и востребованная задача.

Лазерная наплавка – один из современных методов восстановления изношенных деталей, который становится все более популярным благодаря улучшению доступности оборудования и материалов для его реализации. Среди положительных аспектов лазерной

наплавки можно выделить низкое температурное воздействие на деталь и высокую адгезию наплавленного слоя к основе [1, 2, 3].

Возможности лазерной наплавки позволяют наносить тугоплавкие материалы, тем самым осуществлять упрочнение с использованием порошков, содержащих карбиды металлов, включая карбид вольфрама, который применяют при упрочнении режущего инструмента [4]. Восстановление рабочих органов почвообрабатывающих машин таким методом повышает твердость наплавленного слоя рабочей поверхности детали, по сравнению с традиционными способами восстановления, в среднем на 40...45 %. При этом износостойкость покрытий рабочих органов почвообрабатывающих машин в условиях интенсивного абразивного изнашивания возрастает на 40...50 %. К традиционным способам восстановления относятся наплавка порошка «Сормайт» газовой горелкой и ручная электродуговая наплавка электродами Т-590 и Т-620. При их использовании наблюдается малая глубина проплавления основного металла и небольшая зона термического влияния, так как эти методы реализуются вручную, что позволяет регулировать скорость наплавки и температуру рабочей среды. Однако твердость покрытия при восстановлении традиционными методами составляет порядка 45...50 HRC, тогда как при лазерной наплавке она достигает 65...70 HRC. Благодаря этому долговечность восстановленных и упрочненных рабочих органов почвообрабатывающих машин при обработке почв с высокой изнашивающей способностью увеличивается в среднем в 1,8...2,1 раза [5, 6].

Цель исследования – определение рациональных режимных параметров лазерной наплавки для формирования оптимальной микроструктуры износостойких покрытий.

Методика. В качестве восстанавливаемой детали возьмем лемех плуга и будем рассматривать процесс восстановления лазерной наплавкой путем придания ему исходной геометрической формы последовательным нанесением слоев.

Восстановление изношенной части лемеха осуществляли следующим образом. Деталь закрепляли на поверхности рабочего стола роботизированной системы, например, TST-LFR 3000 (рис. 1), которая представляет собой компактную и мобильную систему лазерной наплавки на различные поверхности. Основные ее компо-

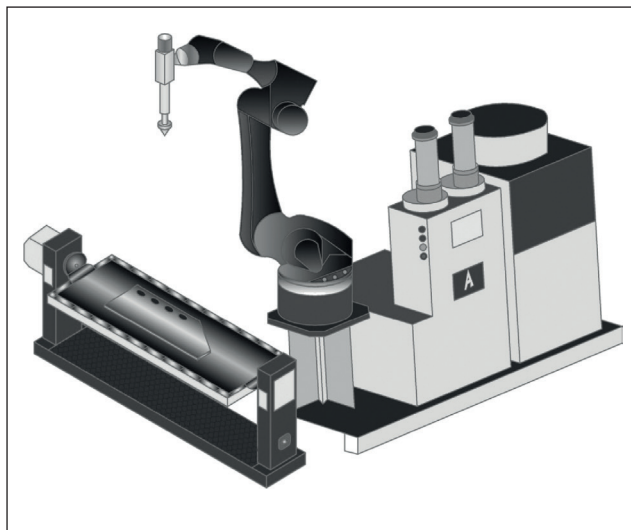


Рис. 1. Роботизированная система наплавки и упрочнения TST-LFR3000.

ненты – мобильный робот, источник лазера мощностью 3000 Вт, система подачи порошка, головка лазерной наплавки, система управления и рабочий стол. Режим наплавки задается системой управления, которая регулирует скорость наплавки, подачу порошка и мощность светового пучка в зависимости от количества подаваемого наплавленного материала. Луч, генерируемый роботизированной системой (лазерным источником), на поверхности изделия создает ванну расплава. В эту зону при помощи транспортирующего газа, который одновременно выступает как защитный, подают порошок.

Луч, температура которого на выходе из сопла достигает 2700 °С, генерируемый лазерным источником, соприкасается со смесью тугоплавких порошков в среде защитного газа. Под действием высокой температуры смесь расплавляется и под высоким давлением равномерно наносится на изношенную поверхность лемеха [7, 8, 9].

Наплавка может осуществляться на следующих режимах: мощность лазерного излучения – 2100...2900 Вт, скорость перемещения оптической головки (скорость наплавки) – 5...11 мм/с, массовый расход порошка – 20 г/мин, расход защитного газа – 14 л/мин. Толщина наплавленного слоя составляет 2±0,1 мм.

Процесс нанесения расплавленного порошка осуществляется пошовно, встык ранее наплавленного шва, с его перекрытием до 25 %. Это необходимо для формирования равномерно восстановленной поверхности лемеха плуга. При нанесении слоев наплавочная головка управляется роботизированной системой, в управляющее устройство которой предварительно закладывается 3D-модель лемеха плуга. Процесс нанесения расплавленного порошка происходит до формирования заданной 3D-модели.

Далее процесс повторяется. При этом расплавленный порошок наносится на ранее сформированный слой металла. Для наплавления, например, 6 мм металла необходимо нанесение трех слоев.

В качестве износостойкого материала используется смесь порошков, включающая 43...53 % железной основы, например, ПГ-С27 «Сормайт», с частицами размером 80 мкм, 45...55 % упрочняющей фазы в виде карбида вольфрама с частицами 15 мкм и 2 % нанопорошка оксида алюминия Al_2O_3 с частицами 70 нм.

Известно, что наиболее эффективно ударно-абразивному трению противостоит слой с ледебуритной структурой дендритно-ячеистого типа [7]. В связи с этим в качестве матрицы наплавленной смеси порошков был выбран ПГ-С27 «Сормайт» с высоким содержанием углерода (4 %), который способствует формированию такой структуры.

Восстановленные лемеха характеризуются высокой твердостью и износостойкостью, что связано с образованием мелкозернистой ледебуритной структуры дендритно-ячеистого типа с включениями твердого карбида вольфрама, обладающей наилучшей сопротивляемостью при абразивном износе. Оксид алюминия в этом случае служит модификатором, благодаря которому образуются дополнительные центры кристаллизации, которые измельчают образующуюся структуру наносимого слоя [10, 11, 12].

Завершающий этап технологии восстановления рабочих органов почвообрабатывающих машин – контроль геометрических параметров. При необходимости проводится механическая обработка углошлифовальной машинкой. Далее выполняется ультразвуковой контроль качества швов и измерение твердости нанесенного слоя металла.

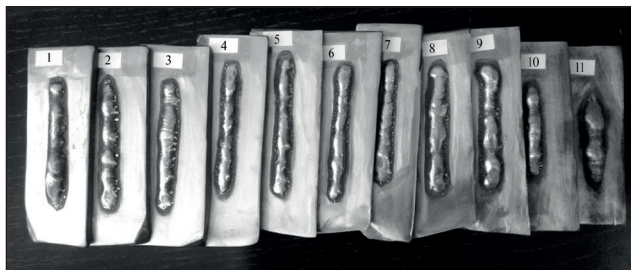


Рис. 2. Швы, полученные лазерной наплавкой при различных режимах.

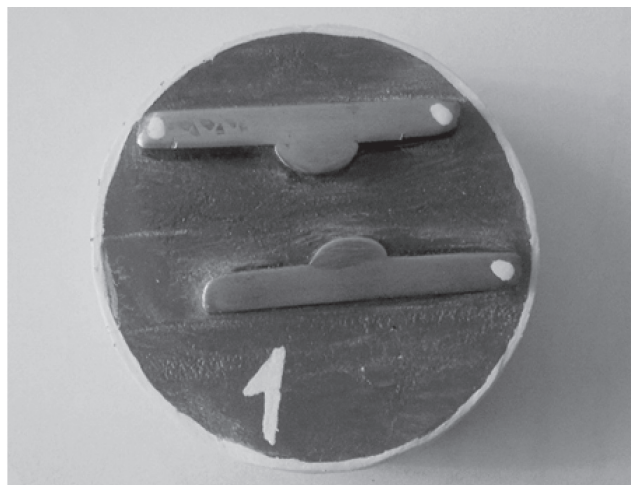


Рис. 3. Микрошлифы, наплавленные лазерной наплавкой при различных режимах и с разным содержанием карбида вольфрама, залитые эпоксидной смолой.

Прежде чем применять технологию непосредственно на лемехах, необходимо провести исследования слоев, формируемых при лазерной наплавке, с целью определения рациональных режимов для получения слоев с наилучшими противозносными свойствами. Для

этого были изготовлены образцы размером 100×40 мм (рис. 2) из стали марки 65Г, из которой чаще всего делают рабочие органы почвообрабатывающих машин. Всего был проведен 121 опыт. Такое количество позволяет провести эксперименты со всеми комбинациями параметров: мощность лазерного излучения – 2100... 2900 Вт с шагом 200 Вт; скорость перемещения оптической головки (скорость наплавки) – 5...11 мм/с с шагом 2 мм/с; содержание карбида вольфрама в смеси – 45...55 % с шагом 2 %.

Микроструктуру полученного шва исследовали с использованием инвертированного металлографического микроскопа МИКРОМЕД МЕТ на подготовленных микрошлифах (рис. 3). Замеры твердости проводили прибором «ТЕМП-2», согласно ГОСТ 22975-78.

Результаты и обсуждение. В ходе опытов было установлено, что оптимальное содержание карбида вольфрама в смеси составляет 50 %. Превышение этой доли приводит к перенасыщению, что в дальнейшем вызывает разрушение слоя в процессе эксплуатации – вместо естественного износа происходит его выкрашивание.

В зависимости от содержания карбида вольфрама нанесенные слои имеют определенную микроструктуру наплавленного износостойкого покрытия. Покрытия, образованные при низких скоростях охлаждения, характеризуются хорошо выраженной дендритной структурой (рис. 4, а, б). При этом они различаются по количеству центров кристаллизации, что, в свою очередь, влияет на формирование макроструктуры наплавленного металла.

Как и ожидалось, нанесенный слой имел типичную эвтектическую ледебуритную структуру, обладающую высокой микротвердостью. Это свидетельствует об отсутствии мартенситных превращений, что еще раз характеризует малую скорость охлаждения и значительный градиент температуры, обусловленные содержанием большого количества цементита. Формирование такой структуры происходит при следующих режимах наплавки: мощность лазерного излучения – 2100...2300 Вт, скорость наплавки – 5...7 мм/с, содержание карбида вольфрама – 45...47 % от объема смеси порошков.

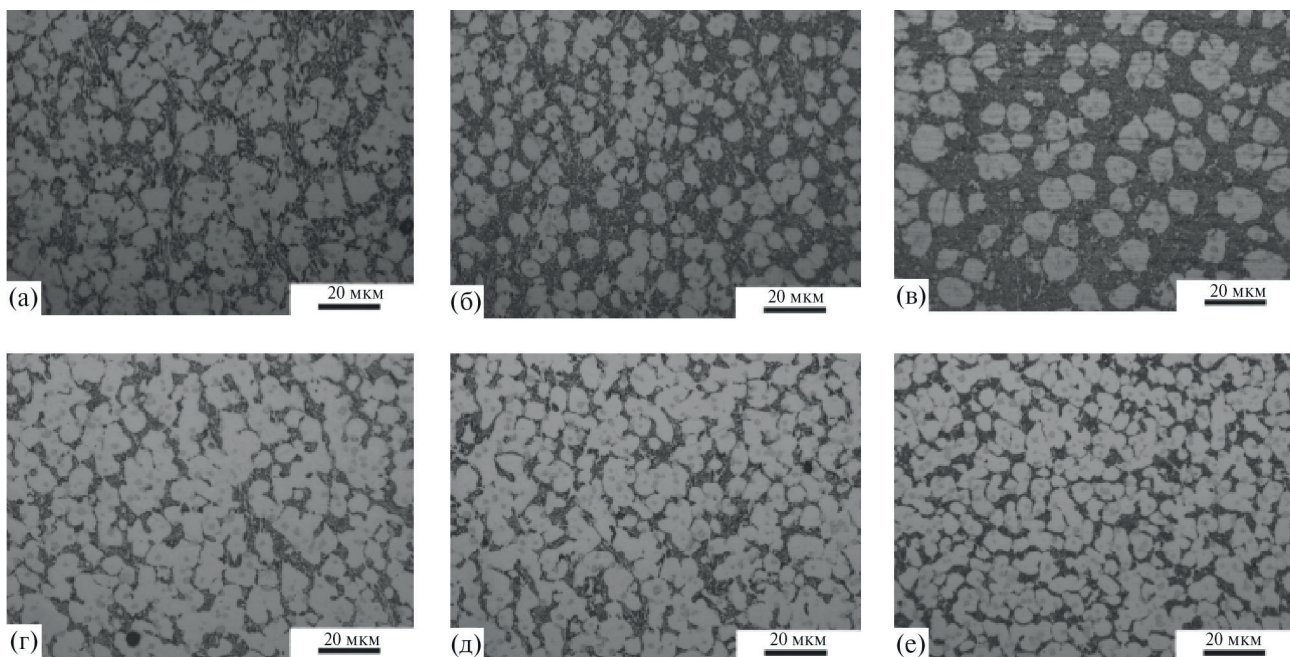


Рис. 4. Микроструктура наплавленного слоя при разном содержании карбида вольфрама в смеси: а) 45 %; б) 47 %; в) 49 %; г) 51 %; д) 53 %; е) 55 %.

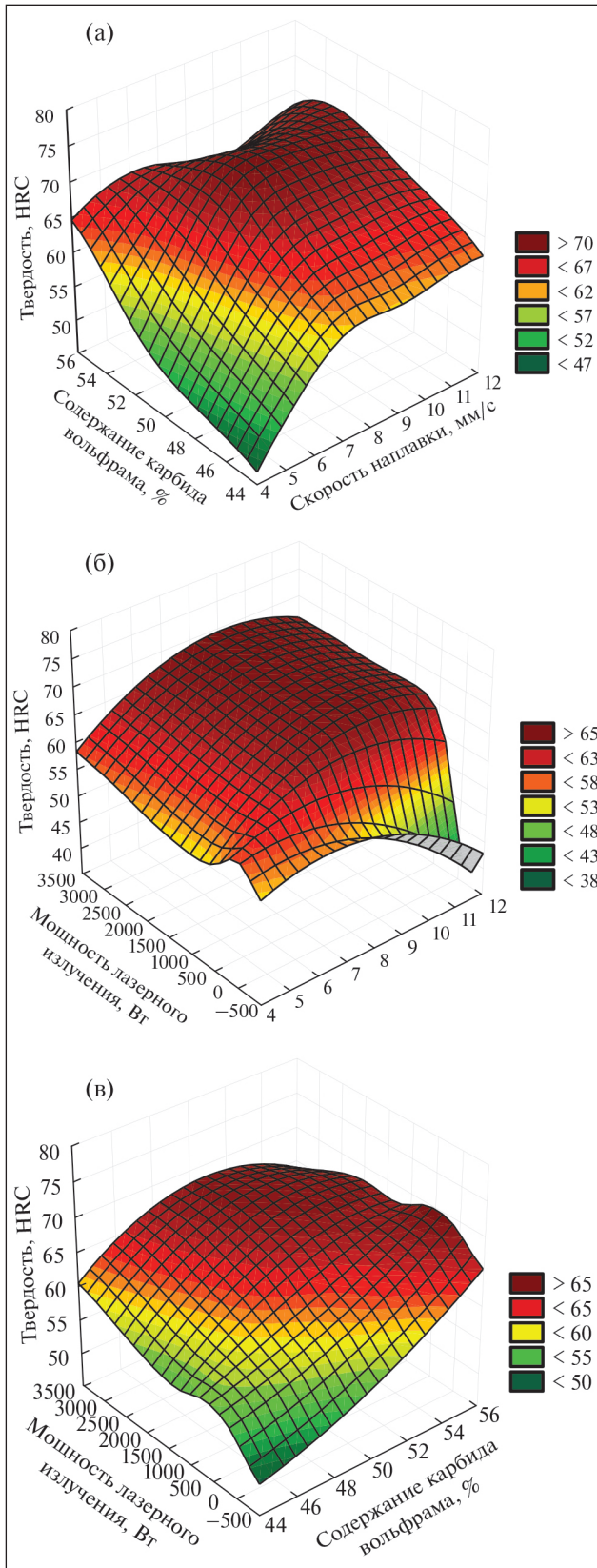


Рис. 5. Зависимость твердости наплавленного слоя:
а) от содержания карбида вольфрама в порошковой смеси и скорости наплавки;
б) от мощности лазерного излучения и скорости наплавки;
в) от мощности лазерного излучения и содержания карбида вольфрама в порошковой смеси.

С увеличением количества карбида вольфрама в смеси происходят изменения структуры наплавленного металла (рис. 4, в, г, д), что связано с ростом количества энергии, необходимой для более полного оплавления всех его частиц. Это способствует образованию ячеек в микроструктуре наплавленного металла из-за увеличения скорости охлаждения нанесенного слоя материала, которую определяет сумма скоростей охлаждения матрицы порошка и карбида. Карбид вольфрама обладает высокой теплопроводностью, что позволяет избежать задержек тепла. Скорость охлаждения нанесенного слоя материала, в свою очередь, будет зависеть от скорости охлаждения ПГ-С27 «Сормайта», доля которого в смеси будет уменьшаться по мере увеличения количества вольфрама. В результате структура наплавленного металла принимает необходимую дендритно-ячеистую форму. Для ее достижения режимы наплавки должны находиться в следующих пределах: мощность лазерного излучения – 2500...2700 Вт, скорость наплавки – 7...9 мм/с, содержание карбида вольфрама – 49...53 % от объема.

Дальнейшее увеличение содержания карбида способствует повышению скорости охлаждения и снижению температурного градиента, что приводит к формированию ячеистой структуры (рис. 4е). Для получения данной структуры режим наплавки имеет следующие значения: мощность лазерного излучения – 2900 Вт, скорость наплавки – 11 мм/с, содержание карбида вольфрама – 55 % от объема.

По результатам измерения твердости наплавленного слоя, которая варьировала в интервале 52,7...78,2 HRC, были построены поверхности отклика для определения рационального режима наплавки при восстановлении лемехов плугов. При варьировании содержания карбида вольфрама в порошковой смеси и скорости наплавки (рис. 5а) наибольшая твердость наплавленной поверхности отмечена при величинах этих показателей соответственно 51...53 % и 7...9 мм/с.

Результаты анализа поверхности отклика, характеризующей зависимость твердости наплавленной поверхности от мощности лазерного излучения и скорости наплавки (рис. 5б), свидетельствуют, что наибольшая твердость достигается при следующих значениях: мощность лазерного излучения – 2300...2500 Вт, а скорость наплавки – 7...9 мм/с.

При варьировании мощности лазерного излучения и содержания карбида вольфрама в порошковой смеси (рис. 5в) наилучшие результаты отмечены при величинах этих параметрах соответственно 2300...2500 Вт и 51...53 %.

В целом рациональными режимными параметрами плазменной наплавки износостойких наплавленных покрытий следует считать скорость наплавки – 7 мм/с; содержание карбида вольфрама в порошковой смеси – 51 %; мощность лазерного излучения – 2700 Вт.

Выводы. Формирование необходимой дендритно-ячеистой структуры ледебуритного типа износостойких наплавленных покрытий возможно при следующих параметрах режима наплавки: мощность лазерного излучения – 2500...2700 Вт, скорость наплавки – 7...9 мм/с, доля карбида вольфрама в смеси порошков – 49...53 % от объема.

Рациональные режимные параметры для наплавки износостойких покрытий с наибольшей твердостью достигаются при скорости наплавки – 7 мм/с; содержании карбида вольфрама в порошковой смеси – 51 %; мощности лазерного излучения – 2700 Вт.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Данная работа финансировалась за счет средств федерального бюджета по теме научного исследования «Разработка новых технологий применения плазмы, 3D и аддитивных технологий для повышения долговечности сельскохозяйственной техники», регистрационный номер № 1022071200009–4–2.3.1. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. *Современные методы лазерной наплавки жаропрочных коррозионноустойчивых материалов* / Е. М. Биргер, Г. В. Москвитин, А. Н. Поляков и др. // *Сварочное производство*. 2018. № 7. С. 37–48.
2. *Shakhov V., Uchkin P., Aristanov M. Study of the Microstructure of Weld Metal Obtained by Plasma Surfacing // Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East (AFE-2022): Agricultural Cyber-Physical Systems. Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2023. Vol. 706–2. P. 238–246.*
3. *Структура и свойства поверхности валков прокатных станов, восстановленных способом лазерной наплавки* / А. М. Чирков, А. Ю. Прилуков, С. Д. Калошкин и др. // *Материаловедение*. 2014. № 8. С. 35–39.
4. *Влияние режимов лазерной наплавки порошка карбида вольфрама на характеристики поверхности стали 12Х18Н10Т* / И. В. Родионов, П. Н. Устинов, И. В. Перинская и др. // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2024. № 2 (285). С. 41–46. doi: 10.35211/1990-5297-2024-2-285-41-46.
5. *Сдвиженский П. А. Разработка метода непрерывного контроля химического состава композиционных покрытий в процессе коаксиальной лазерной наплавки: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М., 2022. 141 с.*
6. *Бирюков В. П. Повышение износостойкости деталей и почвообрабатывающих орудий в сельхозмашиностроении лазерной наплавкой* // *Фотоника*. 2021. Т. 15. № 2. С. 132–143. doi: 10.22184/1993-7296.FRos.2021.15.2.132.142.
7. *Еремина М. А. Ломаева С. Ф., Харанжевский Е. В. Структура и износостойкость покрытий, полученных высокоскоростной лазерной наплавкой механокомпозитов на основе карбогидрида титан* // *Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2021. Т. 15. № 4. С. 46–56. doi: 10.17073/1997-308X-2021-4-46-56.
8. *Исследование возможности повышения эксплуатационных характеристик штамповой стали Х12МФ методом газопорошковой лазерной наплавки* / Д. И. Гаврилов, В. В. Морозов, И. В. Беляев и др. // *Электротехнология*. 2024. № 2. С. 13–21. doi: 10.31044/1684-5781-2024-0-2-13-21.
9. *Влияние нанокарбидов тугоплавких металлов на трибологические свойства покрытий при лазерной наплавке* / В. П. Бирюков, В. Н. Петровский, М. А. Мурзаков и др. // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2015. № 6. С. 70–74.
10. *Шабурова Н. А., Пашикев К. Ю., Мясоедов В. А. Сравнительный анализ структуры и свойств хромокарбидового покрытия, полученного диффузионным насыщением и лазерной наплавкой* // *Материаловедение*. 2024. № 6. С. 12–20. doi: 10.31044/1684-579X-2024-0-6-12-20.
11. *Хоменко М. Д. Мирзаде Ф. Х., Низьев В. Г. Параметрическое исследование микроструктурных свойств при лазерной наплавке* // *Кристаллография*. 2019. Т. 64. № 4. С. 663–667. doi 10.1134/S0023476119040301.
12. *Shakhov V., Uchkin P., Ushakov Yu. Studies in coatings for working bodies of deep-rippers recovered by plasma surfacing // Engineering for Rural Development*. 2019. Vol. 18. P. 44–49. doi 10.22616/ERDev2019.18.N031.
13. *Абрамов А. Н. Эксплуатационная надежность технических систем. Теория. Расчеты. Примеры: учебное пособие / 2-е издание, исправленное и переработанное. М.: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, 2024. 174 с.*

Поступила в редакцию 16.07.2024
 После доработки 20.08.2024
 Принята к публикации 18.09.2024