

Вестник БарГУ

Ежеквартальный научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 года
Выходит 2 раза в год

№ 1 (9), июнь, 2021

Серия «Технические науки»

Учредитель: учреждение образования
«Барановичский государственный университет».

Адрес редакции:
ул. Войкова, 21, 225404 г. Барановичи.
Телефон: +375 (163) 64 34 77.
E-mail: vestnik@barsu.by .

Подписные индексы: 00993 — для индивидуальных
подписчиков; 009932 — для организаций.
Свидетельство о регистрации средств массовой
информации № 1533 от 30.07.2012, выданное
Министерством информации Республики Беларусь.

В соответствии с приказом Высшей аттестационной
комиссии Республики Беларусь от 21 января 2015 г.
№ 16 научно-практический журнал «Вестник БарГУ»
серия «Технические науки» включён в Перечень
научных изданий Республики Беларусь для опублико-
вания результатов диссертационных исследований
по техническим наукам.

Научно-практический журнал «Вестник БарГУ»
включен в РИНЦ (Российский индекс научного
цитирования), лицензионный договор № 06-01/2016.

Выходит на русском и английском языках.
Распространяется на территории
Республики Беларусь.

Исполняющий обязанности заведующего
редакционно-издательской группой Н. Н. Колодко
Технический редактор Л. Н. Щербук
Компьютерная вёрстка С. М. Глушак
Корректор Н. Н. Колодко

Подписано в печать 31.05.2021. Формат 60 × 84 1/8.
Бумага ксероксная. Печать цифровая.
Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 10,75. Уч.-изд. л. 6,60.
Тираж 100 экз. Заказ . Цена свободная.

Полиграфическое исполнение: Гродненское
областное унитарное полиграфическое предприятие
«Слонимская типография». Свидетельство
о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/203 от 07.03.2014, № 2 от 25.02.2014.
Адрес: ул. Хлюпина, 16, 231800 г. Слоним,
Гродненская обл.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Кочурко В. И. (*гл. ред. журн.*), доктор сельскохозяйственных наук, профессор,
академик Белорусской инженерной академии, академик Международной
академии технического образования, академик Международной академии наук
педагогического образования, академик Академии экономических наук Украины,
ректор учреждения образования «Барановичский государственный университет»
(Барановичи, Республика Беларусь).

Климук В. В. (*зам. гл. ред. журн.*), кандидат экономических наук, доцент,
проректор по научной работе учреждения образования «Барановичский
государственный университет» (Барановичи, Республика Беларусь).

Алифанов А. В. (*гл. ред. сер.*), лауреат Государственной премии Республики
Беларусь в области науки и техники, доктор технических наук, профессор
(Барановичи, Республика Беларусь); Горбач Ю. Е. (*отв. секретарь сер.*)
(Барановичи, Республика Беларусь).

Леон О. В. (*ред. текстов на англ. яз.*), кандидат филологических наук
(Барановичи, Республика Беларусь).

Богданович И. А. (*отв. за направление «Машиностроение и машиноведение»*),
кандидат технических наук, доцент (Барановичи, Республика Беларусь);
Дубень И. В. (*отв. за направление «Процессы и машины агроинженерных
систем»*), кандидат технических наук (Барановичи, Республика Беларусь).

Анискович Г. И., кандидат технических наук, доцент (Минск, Республика
Беларусь); Белый А. В., член-корреспондент Национальной академии наук
Беларуси, доктор технических наук, профессор (Минск, Республика Бела-
русь); Гавриленя А. К., кандидат технических наук, доцент (Барановичи,
Республика Беларусь); Девойно О. Г., доктор технических наук, профессор
(Минск, Республика Беларусь); Дремук В. А., кандидат технических наук
(Барановичи, Республика Беларусь); Ивашко В. С., доктор технических наук,
профессор (Минск, Республика Беларусь); Калугин Ю. К., кандидат
технических наук, доцент (Гродно, Республика Беларусь); Карташевич А. Н.,
доктор технических наук, профессор (Горки, Республика Беларусь);
Клочков А. В., доктор технических наук, профессор (Горки, Республика
Беларусь); Клубович В. В., доктор технических наук, академик
Национальной академии наук Беларуси, профессор (Минск, Республика
Беларусь); Сиваченко Л. А., доктор технических наук, профессор (Могилев,
Республика Беларусь); Томило В. А., доктор технических наук, профессор
(Минск, Республика Беларусь); Шелег В. К., член-корреспондент
Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук,
профессор (Минск, Республика Беларусь).

BarSU Herald

A quarterly scientific and practical journal

Published since March 2013
It is published 2 times a year

1 (9), March, 2021

Engineering Series

Promoter: educational institution "Baranovichy State University".

Editorial address:
21 Voykova Str., 225404 Baranovichy.
Phone: +375 (163) 45 46 28.
E-mail: vestnik@barsu.by .

Subscription indices: 00993 — for individual subscribers;
009932 — for companies.
The certificate of the registration of mass media № 1533
of 30.07.2012 issued by the Ministry of Information
of Belarus.

In compliance with the order of the Higher Attestation
Commission of the Republic of Belarus from January 21,
2015 № 16 the scientific and practical journal "BarSU
Herald. Engineering Series" is included into the List of
scientific publications of the Republic of Belarus for
publishing the results of theses research on engineering
sciences (mechanical engineering and machines,
processes and machines of agroengineering systems).

Scientific-and-practical journal "BarSU Herald"
is included into RSCI (Russian Science Citation Index),
license agreement № 06-01/2016.

Issued in Russian and English. The journal is distributed
on the territory of the Republic of Belarus.

Interim managing editor N. N. Kolodko
Technical editor L. N. Scherbuk
Desktop Publishing S. M. Glushak
Proofreader N. N. Kolodko

Signed print 31.05.2021. Format 60 × 84 1/8. Paper xerox.
Digital printing. Headset Times. Conv. pr. s. l. 10,75.
Acc.-pub. s. l. 6,60. Circulation of 100 copies.
Order Free price.

Printing performance: Grodno Regional Printing Unitary
Enterprise "Slonim printing establishment". The state
registration certificate of the publisher, manufacturer and
publications distributor № 1/203 of 07.03.2014, № 2
of 25.02.2014. Address: 16 Hlyupin St., 231800 Slonim,
Grodno region.

EDITORIAL BOARD

Kochurko V. I. (*Editor-in-Chief*), Doctor of Agriculture, Professor, Member of the Belarusian Academy of Engineering, Member of the International Academy of Technical Education, Member of the International Academy of Pedagogical Education, Member of the Academy of Economic Sciences of Ukraine, Distinguished educator of the Republic of Belarus (Baranovichy, the Republic of Belarus).

Klimuk V. V. (*Deputy Editor-in-Chief*), Ph. D. in Economic Sciences, Associate Professor, (Baranovichy, the Republic of Belarus).

Alifanov A. V. (*Executive Editor of the Issue*), State-Prize Winner of the Republic of Belarus in Science and Technology, Doctor of Technical Sciences, Professor (Baranovichy, the Republic of Belarus).

Leon O. V., Ph. D in Philological Science (Baranovichy, the Republic of Belarus).

Bogdanovich I. A. (*in charge of the heading "Machine Building and Engineering Science"*), Ph. D of Technical Science, Associate Professor (Baranovichy, the Republic of Belarus); Duben I. V. (*in charge of the heading "Processes and Machines of Agro-engineering Systems"*), Ph. D. in Technical Sciences (Baranovichy, the Republic of Belarus).

Aniskovich G. I., Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Belarusian State Agrarian Technical University (Minsk, the Republic of Belarus); Bely A. V., A. M. of the National Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus); Gavrilena A. K., Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor (Baranovichy, the Republic of Belarus); Devoino O. G., Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus); Dremuk V. A., Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor (Baranovichy, the Republic of Belarus); Ivashko V. S., Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus); Kalugin Y. K., Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor (Grodno, the Republic of Belarus); Kartashevich A. N., Doctor of Technical Sciences, Professor (Gorki, the Republic of Belarus); Klochkov A. V., Doctor of Technical Sciences, Professor (Gorki, the Republic of Belarus); Klubovich V. V., Doctor of Technical Sciences, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Professor (Minsk, the Republic of Belarus); Sivachenko L. A., Doctor of Technical Sciences, Professor (Mogilev, the Republic of Belarus); Tomilo V. A., Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus); Sheleh V. K., A. M. of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Technical Sciences, Professor (Minsk, the Republic of Belarus).

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

- Дударев В. А., Михальков А. Д., Михальков В. С., Сиваченко Л. А.** Исследование работы вертикальной вибрационной мельницы для измельчения строительных материалов
- Клочков А. В., Емельяненко А. А., Федосов К. С.** Параметры индукции при объемном расположении магнитов
- Милюкова А. М., Матяс А. Н., Лях А. А., Горчанин А. И., Толкачева О. А., Хан Цзинь.** Исследование физико-механических свойств титанового сплава после магнитно-импульсной обработки
- Попок Н. Н., Портянко С. А., Тихон Е. М., Анисимов В. С.** Моделирование и регулирование стружкообразования и потоков смазочно-охлаждающей технологической среды при фрезеровании
- Потапов В. А., Сиваченко Л. А., Дремук В. А.** Исследование влияния режимов работы цепного агрегата на показатели процесса измельчения мела в технологии производства извести
- Романчук И. А., Голубев В. С., Веера И. И.** Особенности формирования упрочняющих покрытий при комплексной лазерной и плазменно-порошковой наплавке

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

- Бурдейко В. А., Ловкис В. Б.** Расчет щеток машины для сбора колорадского жука
- Зяц П. В., Казакевич П. П.** Результаты экспериментальных исследований машины для сбора колорадского жука
- Пивоварчик А. А., Гавриленя А. К., Заболотный О. Д.** Исследование вязкостно-температурных показателей полусинтетических моторных масел, используемых в бензиновых двигателях механических транспортных средств
- Пивоварчик А. А., Гавриленя А. К., Заболотный О. Д.** Исследование эксплуатационных показателей полусинтетических моторных масел марки SAE 10W40, используемых в бензиновых двигателях

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

- 4 Dudarev V. A., Mikhalkov A. D., Mikhalkov V. S., Sivachenko L. A.** Investigation of the operation of a vertical vibration mill for grinding building materials
- 10 Klochkov A. V., Emelianenko A. A., Fedosov K. S.** Induction parameters by the three-dimensional arrangement of magnets
- 18 Milyukova A. M., Matyas A. N., Liakh A. A., Gorchanin A. I., Tolkacheva O. A., Han Jin.** Improvement of physical and mechanical properties of titanium alloy by magnetic-pulse treatment
- 27 Popok N. N., Partsianka S. A., Tikhon E. M., Anisimov V. S.** Modeling and regulation of chip formation and flows of the lubricating and cooling process medium during milling
- 37 Potapov V. A., Sivachenko L. A., Dremuk V. A.** Research of the influence of the operating modes of the chain unit on the indicators of the process of grinding chalk in the technology of lime production
- 44 Romanchuk I. A., Golubev V. S., Vegera I. I.** Features of forming of consolidating coverages at complex laser and plasma-powder surfacing

PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

- 53 Burdejko V. A., Lovkis V. B.** Calculation of the brushes of the colorado beetle harvesting machine
- 59 Zayats P. V., Kazakevich P. P.** Results of experimental studies colorado beetle harvesting machines
- 70 Pivovarchik A. A., Gavrilenia A. K., Zabolotny O. D.** Study of viscosity-temperature indices of semi-synthetic engine oils used in gasoline engines of power-driven vehicles
- 77 Pivovarchik A. A., Gavrilenia A. K., Zabolotny O. D.** Performance study of semi-synthetic SAE 10W40 engine oils used in gasoline engines

УДК 621.9.048.7+621.9.047/048

И. А. Романчук, В. С. Голубев, И. И. Вегера

Государственное научное учреждение «Физико-технический институт
Национальной академии наук Беларуси», ул. Академика В. Ф. Купревича, 10, 220141 Минск,
Республика Беларусь, +375 (17) 369 31 24, gvs_fti@mail.ru

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ ПРИ КОМПЛЕКСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ И ПЛАЗМЕННО-ПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКЕ

В данной работе проведены исследования микроструктуры, качества и ряда физико-механических характеристик сформированных слоев, создаваемых на рабочих поверхностях образцов из конструкционных сталей методами плазменно-порошковой и лазерной наплавки, в том числе при их комбинации. Лазерная наплавка выполнялась с использованием газового CO₂-лазера «Комета-2». Основной целью использования в экспериментах плазменно-порошкового метода являлось исследование процесса плазменной наплавки порошковых материалов на стальные, в том числе клиновидные или тонкостенные, изделия с использованием постоянной и постоянно-импульсной плазмы. С использованием лазерной наплавки на основе никелевых самофлюсующихся порошков по предварительно сформированному плазменному подслою показана возможность получения двухслойной композиции необходимой твердости с качественной зоной сплавления. Наличие промежуточного плазменного подслоя ~0,3 мм при лазерной наплавке не приводит к существенному изменению поверхностной твердости всей композиции «покрытие — основной металл» по сравнению с твердостью только одного лазерного слоя той же толщины.

Ключевые слова: лазерная наплавка; плазменно-порошковая наплавка; поверхностный слой; микроструктура.

Рис. 3. Библиогр.: 10 назв.

I. A. Romanchuk, V. S. Golubev, I. I. Vegera

State Scientific Institution “Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus”,
10 Akademika V. F. Kuprevich Str., 220141 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (17) 369 31 24, gvs_fti@mail.ru

FEATURES OF FORMING OF CONSOLIDATING COVERAGES AT COMPLEX LASER AND PLASMA-POWDER SURFACING

In this work studies of the microstructure, quality and a number of physical and mechanical characteristics of the formed layers, created on the working surfaces of samples from structural steels by plasma-powder and laser surfacing, including their combination, have been carried out. Laser surfacing was carried out using a gas CO₂-laser “Kometa-2”. The main purpose of using the plasma-powder method in experiments was to study the process of plasma surfacing of powder materials on steel, including wedge-shaped or thin-walled, products using constant and constant-pulse plasma. Using laser cladding based on self-fluxing nickel powders over a pre-formed plasma sublayer, the possibility of obtaining a two-layer composition of the required hardness with a high-quality fusion zone is shown. The presence of an intermediate plasma sublayer of ~0.3 mm during laser cladding does not lead to a significant change in the surface hardness of the entire “coating — base metal” composition in comparison with the hardness of only one laser layer of the same thickness.

Key words: laser cladding; plasma-powder cladding; surface layer, microstructure.

Fig. 3. Ref.: 10 titles.

Введение. Технология наплавки является весьма эффективным способом как поверхностного упрочнения новых деталей, так и восстановления изношенных всевозможного функционального назначения. Эта технология позволяет в нужных местах на рабочих поверхностях формировать достаточно толстые покрытия с толщиной до ~10 мм. Для этого

метода характерна металлургическая связь покрытия с основой, при этом может обеспечиваться высокая производительность обработки до 10 кг и более наплавляемого материала в час. В зависимости от используемого метода наплавки в качестве присадки могут применяться порошковые электроды с покрытиями, компактные прутки или проволоки, ленты и просто порошки [1—3].

В номенклатуру порошковых материалов входят как металлические, так и композиционные порошки, различные порошковые смеси, в том числе с тугоплавкими соединениями. Это дает возможность на их основе создавать высококачественные слои с необходимыми эксплуатационными характеристиками наплавленных деталей для различных условий износа, эрозии, коррозии и т. п. Применение в качестве энергетических источников наплавки лазера или плазмы с высокой (до 10^6 Вт / см²) плотностью мощности потока дает возможность формировать наплавленные слои с небольшим коэффициентом перемешивания металла основы и материала покрытия, обеспечивать при этом незначительные остаточные деформации.

Возможны различные схемы осуществления плазменной или лазерной порошковой наплавки:

1) присадочный порошок равномерным слоем насыпается на обрабатываемую поверхность или закрепляется на ней с помощью специального связующего, наносится на поверхность, например, в виде газотермических или гальванических покрытий. Достоинством данного способа является высокий коэффициент использования дорогостоящего порошкового материала;

2) наплавляемый присадочный порошок вводится непосредственно в зону расплава с помощью различных сопловых устройств.

В настоящее время в Физико-техническом институте НАН Беларуси научно-технические вопросы лазерного поверхностного модифицирования и наплавки изучены в достаточной степени, что позволило на этой основе разработать ряд технологических процессов упрочнения и восстановления быстроизнашивающихся деталей автомобильной и авиационной техники, сельскохозяйственных машин, оборудования энергетического машиностроения и др. [4].

Комбинированные технологии, при которых энергия различных источников вводится в зону обработки последовательно во времени [5], позволяют эффективно нивелировать недостатки отдельной монотехнологии и обусловлены снижением потерь времени за счёт исключения и сокращения количества промежуточных и вспомогательных операций. В частности, комбинированные лазерно-плазменные методы существенно расширяют использование технологий упрочнения, номенклатуру деталей и материалов покрытий, позволяют минимизировать затраты на обработку при приемлемом качестве обрабатываемых слоёв.

Так, применение отдельной технологии (монотехнологии — лазерной или плазменной) для упрочнения ряда деталей, например, с неоднородным поперечным сечением, таких как ножи кормо- и зерноуборочных сельскохозяйственных машин и др., не всегда может обеспечить приемлемое качество наплавленных слоёв и необходимые эксплуатационные параметры по отношению к себестоимости самого процесса обработки. Для упрочнения подобных деталей технологически возможно и, по-видимому, экономически целесообразно применять комбинированный лазерно-плазменный метод: острые режущие кромки обработать лазерным излучением, а оставшуюся часть — с помощью плазменного воздействия. При этом в зоне стыковки технологий наблюдается комплексная наплавка, например, лазерная наплавка накладывается на предварительно наплавленную плазменно-порошковым методом поверхность. Возникающие при плазменной обработке нежелательные дефекты (деформации, трещины, поры и т. д.) обычно минимизируют за счёт соблюдения оптимального температурного режима на стадиях подготовки поверхности и нанесения покрытия (наплавки), формирования промежуточных слоёв специального состава и определённой толщины на границе «основной металл — покрытие», различных методов и приёмов наплавки [6]. Осаждение промежуточных слоёв в ряде случаев более целесообразно осуществлять лазерно-

порошковой наплавкой, что позволяет обеспечивать высокое их качество при необходимой толщине и минимальном проплавлении основного металла. Исследование и разработка комбинированных лазерно-плазменных процессов формирования упрочняющих покрытий предполагает учёт особенностей концентрированных потоков энергии для каждого из этих методов в отдельности [7; 8].

Материалы и методы исследования. В данной работе проведены исследования микроструктуры, качества и ряда физико-механических характеристик (геометрические размеры, твёрдость, микротвёрдость и др.) сформированных слоев (износостойкое покрытие, переходной слой, основной металл), создаваемых на рабочих поверхностях образцов из конструкционных сталей типа 65Г, 40Х методами плазменно-порошковой и лазерной наплавки, в том числе при их комбинации. Лазерная наплавка (порошки ПГ-10Н-01, ПГ-12Н-01, ПС-12НВК-01 и Т-Термо 650) выполнялась с использованием газового СО₂-лазера «Комета-2» при мощности излучения ~0,6 кВт. Технологические режимы лазерной наплавки выбирались в зависимости от энергетической плотности потока лазерного излучения, линейных скоростей сканирования лазерного луча, диаметра пятна фокусировки и шага между лазерными дорожками.

В настоящее время в технологических комплексах для осуществления как лазерной, так и плазменной наплавки перспективно использование многоструйной коаксиальной подачи присадочного порошкового материала (ППМ) в зону обработки. В этой связи для проведения экспериментов нами было изготовлено соответствующее сопло [7]. Сопло состояло из 24 выфрезерованных каналов протяжённостью 40 мм с сечением $0,7 \times 0,7 \text{ мм}^2$, которые располагались симметрично относительно оси лазерного пучка под углом 50°. Подаваемый газом порошок вытекал из выходных отверстий этих транспортных каналов и сходил в виде конуса, достигая наплавляемой поверхности в окрестности фокусировки лазерного луча. Таким образом, вне зависимости от направления перемещения подложки относительно источника поверхностного нагрева это дает возможность формировать равномерные слои и минимизировать потери наплавочного порошка [9].

Основной целью использования в данной работе плазменно-порошкового метода являлось исследование процесса плазменной наплавки также высокопрочных самофлюсующихся порошковых материалов на стальные, в том числе клиновидные или тонкостенные, изделия с использованием постоянной и постоянно-импульсной плазмы. Для плазменной наплавки применялись те же порошки ПГ-10Н-01 и ПГ-12Н-01. Указанный режим работы плазматрона позволяет уменьшить опасность проплавления тонкостенной поверхности, повысить качество наплавляемого слоя, снизить термические поводки. Для решения поставленной задачи была проведена доработка конструкции непосредственно самого плазматрона с катодом из вольфрама диаметром 4 мм, легированного лантаном. Используемый для реализации процесса наплавки сварочный плазматрон повышенной надежности PLP 200 Aut стандартно укомплектован специальным соплом для подачи порошка с максимальной фракцией до 0,25 мм и с необходимым расходом 4...35 г / мин. Расход транспортирующего газа при этом мог составлять 2...4 л / мин. Источник питания дежурной и основной дуг дает возможность формировать на выходе постоянное и постоянно-импульсное напряжения. Для обеспечения подачи в зону плазменной струи наплавляемого порошка в постоянном и импульсном режимах была разработана и изготовлена специальная конструкция порошкового питателя. В конструкции были использованы эффект кипящего слоя и вибрирующий дозирующий электрод.

При необходимости перемещений наплавочной головки «челночного» типа была предусмотрена возможность с определённым шагом выполнять возвратно-поступательные движения перпендикулярно направлению наплавки. При этом могла задаваться амплитуда A колебаний головки. Для осуществления таких колебаний лазерной или плазменной головки в экспериментах использовался автоматизированный портал с числовым программным уп-

равлением, позволяющий в соответствии с компьютерными программами выполнять передвижение соответствующего источника нагрева по заданной траектории наплавки [4]. Следует отметить, что при постоянном токе основной дуги скорость движения плазмотрона практически полностью определяет погонную энергию, которая является одной из наиболее важных характеристик процесса плазменной порошковой наплавки. В конечном результате такая величина погонной энергии оказывает решающее влияние на физико-механические свойства и геометрические размеры наплавленного слоя.

Анализ микроструктуры проводился на травленых шлифах в сечениях перпендикулярно поверхности с использованием оптического микроскопа Neophot-2, измерения микротвердости — на микротвердомере ПМТ-3, элементный анализ — на электронном микроскопе SEM 515, укомплектованном приставкой EDAX.

Результаты исследования и их обсуждение. Как при плазменной, так и лазерной наплавке порошковый питатель и сопловые устройства должны обеспечить стабильную подачу необходимого количества ППМ в сварочную ванну и равномерное его распределение по объёму наплаваемого покрытия. Размеры зоны ввода ППМ не должны превышать размеров зеркала сварочной ванны (зоны жидкого металла), так как в противном случае будут возникать большие непроизводительные потери порошка.

Промежуточные слои должны обеспечивать плавное изменение свойств (твёрдости, пластичности, коэффициента термического расширения и др.) между основным и наплавленным металлами. Основными критериальными факторами при этом являются твёрдость H_{μ} , состав и структура наплавленного слоя и основного металла, необходимость последующей термической обработки и др. Микроструктура выбранного в качестве буферного сплава на никелевой основе системы Ni-Cr-B-Si с твёрдостью, промежуточной между твёрдостью стальной основы и наплавленного композиционного покрытия состоит из твёрдого раствора на основе никеля ($\gamma - Ni$), карбидов и боридов хрома и др. Структурная чувствительность к условиям термообработки и высокое сродство сплава к стальной подложке позволяют изменять свойства промежуточного слоя в нужном направлении. Сплавы на основе никеля показывают очень хорошую стойкость к абразивному износу, высокотемпературную и коррозионную стойкость.

В результате выполненных нами экспериментов подтвердилась правильность выбранных технических и конструкторских подходов и решений при модернизации плазмотрона для наплавки. В целях восстановления и упрочнения различных быстроизнашивающихся деталей из конструкционных материалов проведена подготовка комплекса всего оборудования для плазменно-порошковой наплавки [9]. Созданный комплект оборудования для поверхностной наплавки открывает возможность реализовать плазменную наплавку коррозионно- и износостойкого порошкового материала на тонкостенные и/или клиновидные детали типа дисков и ножей различной сельскохозяйственной техники, например, измельчающих ножей кормоуборочного комбайна.

На основании проведенных экспериментов установлено, что хорошее качество наплавленных слоев наблюдалось для всех использованных самофлюсующихся порошков обоими способами. При оптимальных условиях микротвердость слоя наплавки для порошков ПГ-12Н-01, ПГ-10Н-01, ПС-12НВК-01 и Т-Термо 650 составляла, соответственно, $\sim 550 HV_{0,1}$, $830 HV_{0,1}$, $(700 \dots 860) HV_{0,1}$, $(900 \dots 1300) HV_{0,1}$. Отмечено, что при глубокой зоне подплавления происходит интенсивное перемешивание наплаваемого материала с материалом основы, что сказывается на свойствах наплавленного слоя. При этом для порошков с добавками карбида вольфрама с уменьшением скорости сканирования луча возрастает как глубина оплавленного слоя, так и его микротвердость. Это говорит о том, что, несмотря на перемешивание материала порошка и основы, в расплаве происходит растворение частиц карбида

вольфрама, что, в свою очередь, ведет к дополнительному упрочнению, причем из результатов микрорентгеноспектрального анализа следует, что весьма существенным фактором в этих случаях является газовая среда, в которой проводится лазерная наплавка [10]. Были также определены оптимальные скорости лазерной наплавки в режимах «челночного типа».

При их превышении ($v_n \geq 10$ мм / с) при установленных размахе ($2A = 6$ мм) колебаний, мощности ($W_n \sim 600$ Вт) лазерного излучения, расходе ($G_n \sim 4$ г / мин) используемого присадочного порошка на никелевой основе формировались наплавленные валики седлообразного типа с наибольшим проплавлением металла основы в месте поворота лазерной головки. Показано, что при такой лазерной наплавке только за один проход можно создавать покрытия с достаточно стабильными шириной (8...13 мм) и толщиной (до 1 мм), с приемлемой глубиной подплавления металла основы ($\sim 0,1 \dots 0,15$ мм) и регламентированной для используемого порошкового материала твердостью.

Изучение особенностей использования процессов лазерного воздействия в сочетании с плазменной обработкой поверхности позволило выявить следующее. На рисунке 1 показан внешний вид поверхности, наплавленной с использованием порошка ПГ-10Н-01 последовательно во времени: на исходную подложку плазмотроном 2, а затем лазером 1. Шлиф вырезался по линии $a-b$ перпендикулярно поверхности подложки и в зависимости от выявления определённой структуры протравливался в растворах марбле или нитале (рисунок 2). В обоих случаях наплавка производилась при колебаниях источника нагрева челночного типа.

Размах колебаний плазмотрона $2A = 25$ мм с шагом $\delta = 2$ мм, максимальной скоростью $v_n = 300$ мм / мин и, соответственно, для лазерной наплавки: $2A = 6$ мм, $\delta = 1$ мм, $v_n = 300$ мм / мин. Из рисунков 1 и 2 можно определить геометрические размеры наплавленных слоёв: максимальная толщина покрытия — 1,2 мм, в том числе плазменного (промежуточного) — $\sim 0,3$ мм.

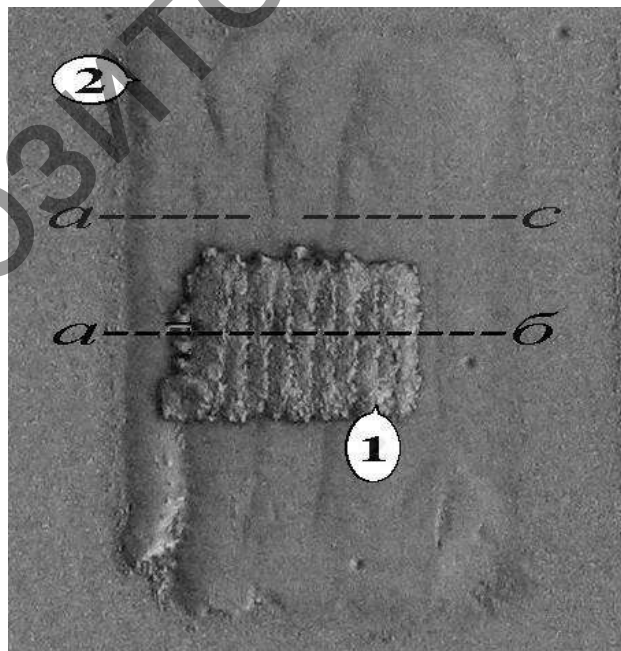
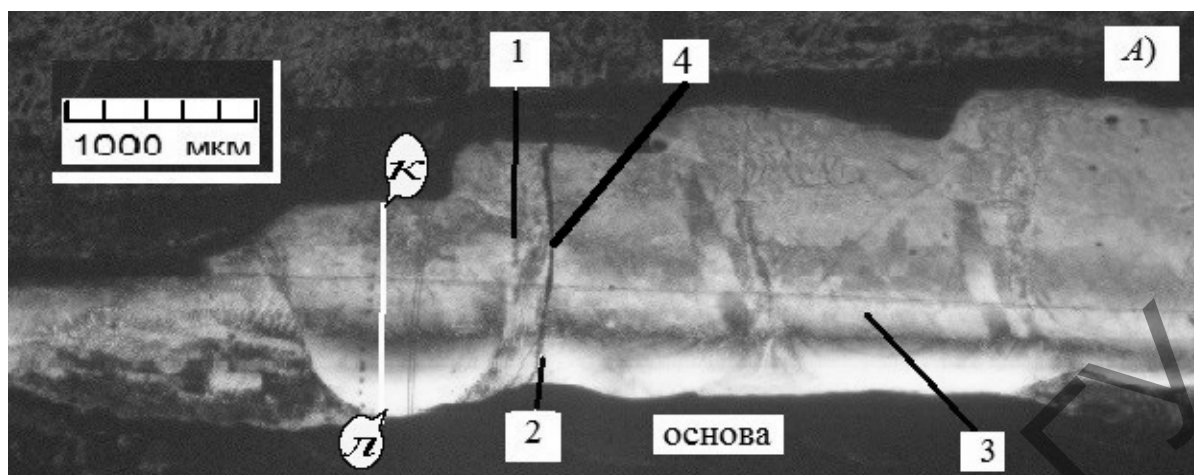
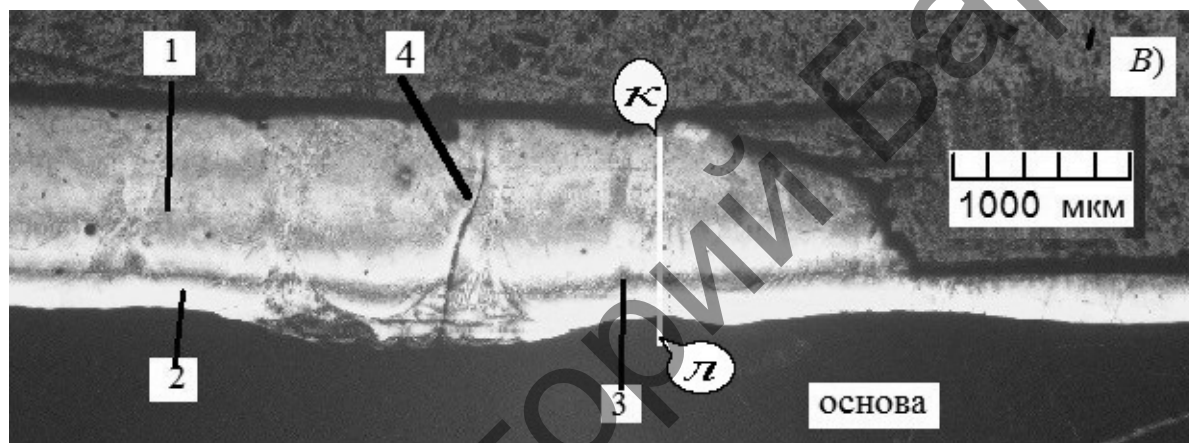


Рисунок 1. — Вид наплавленной поверхности плазмотроном 2 и лазером 1 × 3,5; $a-b$, $a-c$ — линии разреза

Примечания. 1. Направления наплавки \leftarrow и движения лазерного луча $\uparrow \downarrow \uparrow$.
2. Направления наплавки \rightarrow и движения плазмотрона $\uparrow \downarrow \uparrow$.



а)



б)

1 — лазерная наплавка; 2 — плазменная наплавка; 3 — зона (линия) сплавления лазерного и плазменного слоя; 4 — трещина

Рисунок 2. — Макрошлиф комбинированной наплавки: а — начало наплавки; б — конец наплавки, (к—л) — зона измерения микротвёрдости

Примечание. Направления наплавки → и движения луча лазера ⊗ ⊙ ⊗.

Поверхностная твёрдость, измеренная прибором ТК-2М, составила 44...46 HRC при твёрдости основы ~30 HRC, а ультразвуковым твёрдомером МЕТ-У1А — 49...54 HRC. Кроме упоминавшейся выше предполагаемой причины несоответствия результатов измерений (тонкое покрытие на относительно «мягкой» подложке) возможно также влияние пористости покрытий, их пространственной (локальной) неоднородности и других факторов. Поэтому в данных условиях, по-видимому, не может быть полного соответствия между измеренными значениями твёрдости тонкого приповерхностного слоя (МЕТ-У1А) и твёрдости композиции «покрытие—основа» (ТК-2М).

Микротвёрдость измерялась в поперечных шлифах по линии к—л в начале и конце наплавки (см. рисунок 2) и в средней части образца, не показанной на рисунке 2. Результаты измерений микротвёрдости в указанных зонах приведены на рисунке 3.

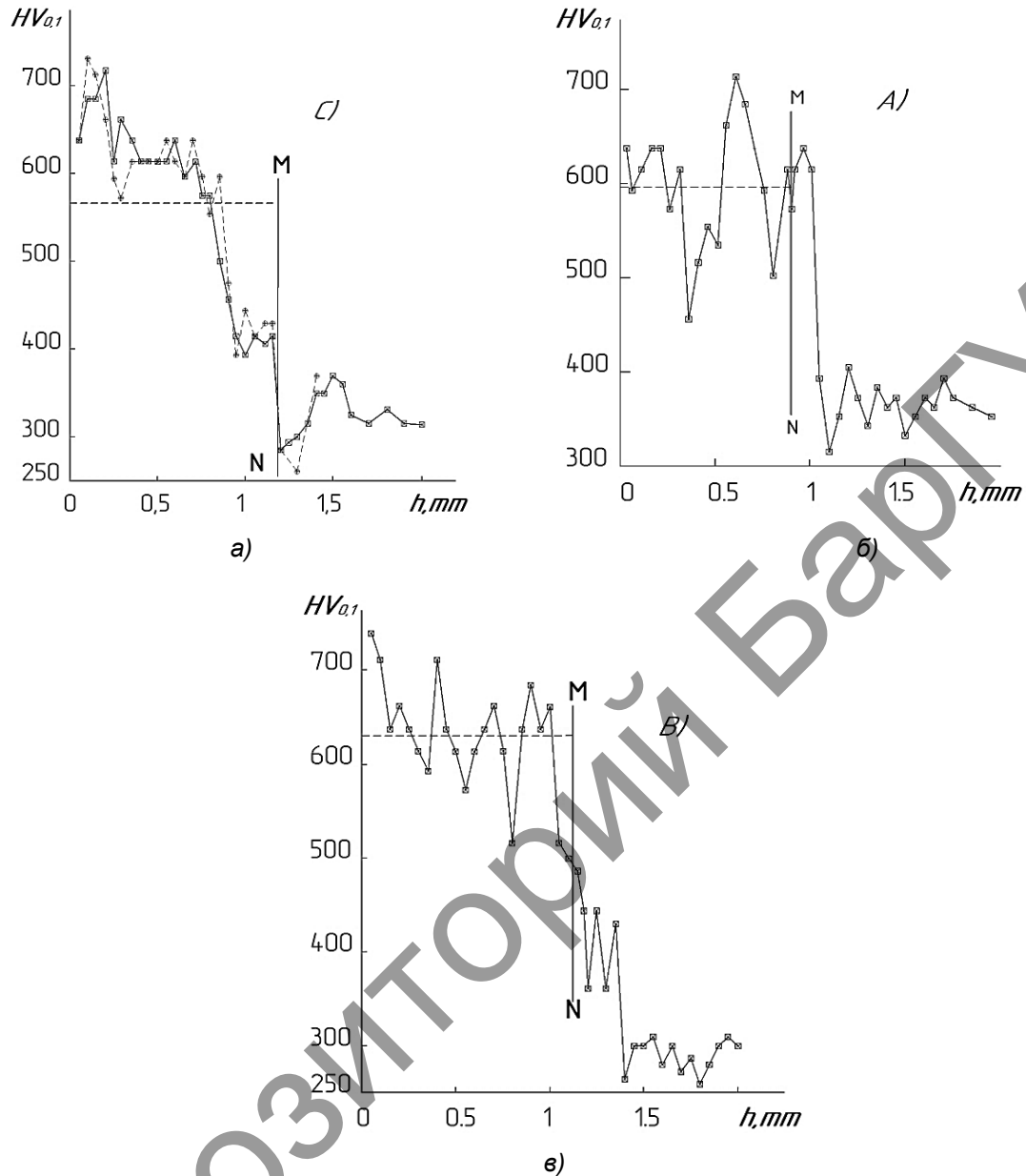


Рисунок 3. — Распределение микротвёрдости от поверхности по глубине наплавленного слоя: а — начало наплавки; б — середина; в — конец наплавки

Особенностью полученных распределений является сильная неоднородность (изрезанность) микротвёрдости не только наплавленных слоёв, но и прилегающих областей основного металла в зоне термического влияния с достаточно малым пространственным масштабом, достигающим до $6 \cdot 10^3 HV_{0,1} / \text{мм}$ (см. рисунок 3, а), и обусловленная не только погрешностями измерений. С учётом сказанного и трудностями в оценке погрешностей измерений кривые строились посредством соединения экспериментальных точек прямыми, что преимущественно используется в других работах. На рисунке 3 штриховой горизонтальной линией отмечена средняя микротвёрдость наплавленных слоёв при аппроксимации её реального распределения ступенчатым с одинаковым шагом, равным 0,05 мм по толщине покрытия. Средняя микротвёрдость в начале (см. рисунок 3, а), середине (см. рисунок 3, б) и в конце (см. рисунок 3, в) лазерной наплавки по предварительно сформированному плазменно-порошковому подслою (см. рисунок 1) в пределах суммарной толщины покрытия (до

линии MN), составляла, соответственно, 598 $HV_{0,1}$, 576 $HV_{0,1}$ и 606 $HV_{0,1}$. Наблюдаемая сильная неоднородность покрытий связана с наличием в наплавляемом композиционном порошковом сплаве компонентов с различной, в том числе достаточно высокой, твёрдостью (карбиды, бориды хрома и т. п.), не полностью растворившихся или вновь образовавшихся в процессе наплавки новых твёрдых соединений, неравномерно распределённых в объёме покрытия. По этой причине возникают определённые трудности при интерпретации распределений микротвёрдости по толщине покрытий. В середине лазерной наплавки (см. рисунок 3, б) достаточно надёжно зафиксировано падение измеренной величины микротвёрдости в направлении границы «покрытие—основа» (линия MN) и менее заметное уменьшение в конце наплавки (см. рисунок 3, в). В обоих случаях на границе, в основном металле микротвёрдость падает до уровня $\sim 270 HV_{0,1}$. Основное влияние на характер представленных распределений оказывает, по-видимому, положение сечения измерения микротвёрдости относительно дорожек наплавки (см. рисунок 2): в центре дорожки, между дорожками или в зоне их перекрытия.

Наличие относительно тонкого промежуточного плазменного подслоя ($\sim 0,3$ мм) не приводит к существенному изменению поверхностной твёрдости всей композиции «покрытие — основной металл» (48...50 HRC) по сравнению с твёрдостью лазерного слоя, имеющего примерно ту же толщину и наплавленного при той же скорости на «чистую», т. е. без подслоя, подложку (46...51 HRC). В исследованных шлифах регистрировалось незначительное количество пор (до 10 %) и несколько поперечных трещин на изображённом на рисунке 2 фрагменте 4 наплавленного образца. Трещины начинались на поверхности покрытия и достигали основы в том числе через промежуточный плазменный подслоя (см. рисунок 2, в). При выборе в качестве материала промежуточного слоя порошка ПГ-12Н-01 и основного (верхнего) слоя порошка ПГ-10Н-01 также формировался качественный переходной участок между ними, который выявлялся при травлении образцов в растворе марбле. Это обстоятельство, незначительное количество дефектов в виде пор, тенденция к снижению трещинообразования при соответствующем подборе твёрдости промежуточного подслоя и относительно высокая твёрдость полученной композиции «покрытие — основной металл» показывают возможность формирования, по крайней мере, двухслойной структуры при использовании самофлюсующихся порошковых сплавов. На основании экспериментов в случае использования для верхнего наплавленного слоя порошков типа ПС-12НВК-01 или Т-Термо 650 с твёрдостью до 65 HRC следует рекомендовать в качестве промежуточных слоев использовать порошки с твёрдостью не выше, чем у порошков типа Т-Термо 20(24). При этом со снижением твёрдости промежуточного слоя может быть уменьшена и его толщина до уровня 50...100 мкм. С точки зрения трещинообразования такие рекомендации по выбору промежуточного и основного слоев, наплавленных с использованием лазерной и плазменно-порошковой наплавки или их комбинации, могут касаться также деталей, подвергаемых в дальнейшем термической закалке. В конечном итоге при такой комплексной обработке может быть значительно повышена производительность процесса наплавки. В этих целях вполне может быть использован разработанный в Физико-техническом институте НАН Беларуси комплекс лазерно-плазменного оборудования, когда эти два процесса реализуются на едином технологическом столе портального типа [4].

Заключение. С использованием лазерной наплавки на основе никелевых самофлюсующихся порошков по предварительно сформированному плазменному подслою показана возможность получения двухслойной композиции необходимой твёрдости с качественной зоной сплавления. Наличие промежуточного плазменного подслоя ($h_n \sim 0,3$ мм) при лазерной наплавке не приводит к существенному изменению поверхностной твёрдости всей композиции «покрытие — основной металл» (48...50 HRC) по сравнению с твёрдостью только одного лазерного слоя той же толщины (46...51 HRC). При использовании в качестве материала

промежуточного и основного слоя одного порошка (ПГ-10Н-01) формируется качественный переходной участок между ними с минимальным уровнем дефектов (пор, трещин) в наплавленных слоях, не распространяющихся в основной металл. С повышением твердости основного наплавленного слоя рекомендовано в качестве материала для промежуточного подслоя выбирать самофлюсующиеся порошки на никелевой основе с твердостью 25 HRC и ниже.

Список цитируемых источников

1. Плазменная наплавка металлов / А. Е. Вайнерман [и др.]. — Л. : Машиностроение, 1969. — 190 с.
2. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюрин ; под ред. А. Г. Григорьянца. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. — 664 с.
3. Рябцев, И. А. Наплавка деталей машин и механизмов / И. А. Рябцев. — Киев : ЭкоТехнология, 2004. — 160 с.
4. Астапчик, С. А. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке / С. А. Астапчик, В. С. Голубев, А. Г. Маклаков. — Минск : Беларус. наука, 2008. — 252 с.
5. Чирков, А. М. Техно-экономический анализ гибридной технологии наплавки лазерно-плазменным методом / А. М. Чирков, Ю. А. Хрусталёв // Технология ремонта, восстановления и упрочнения деталей : материалы 8-й Междунар. практ. конф. — СПб. : СППУ, 2008. — С. 318—327.
6. Бабей, Ю. И. Поверхностное упрочнение металлов / Ю. И. Бабей, Б. И. Бутаков, В. Г. Сысоев. — Киев : Наук. думка, 1995. — 256 с.
7. Романчук, И. А. Особенности формирования упрочняющих покрытий при лазерной порошковой наплавке / И. А. Романчук, В. С. Голубев, И. И. Вегера // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. — Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2020. — Кн. 2. — С. 43—52.
8. Романчук, И. А. Особенности формирования упрочняющих покрытий при плазменной порошковой наплавке / И. А. Романчук, В. С. Голубев, И. И. Вегера // Машиностроение и техносфера XXI века : сб. тр. XXVII Междунар. науч.-техн. конф. — Севастополь, 2020. — С. 342—345.
9. Плазменная наплавка износостойких порошковых материалов на рабочие поверхности стальных деталей / А. В. Алифанов [и др.] // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2018. — Вып. 6. — С. 39—44.
10. Лазерная обработка материалов с изменением химического состава поверхностного слоя / В. С. Голубев [и др.] // Вестник БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2019. — Вып. 7. — С. 34—42.

Поступила в редакцию 12.04.2021.