

ISSN 2309-1339



ВЕСТНИК БАРГУ

BARSU HERALD

СЕРИЯ
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

SERIES
ENGINEERING



№ 2 (12) 2022

Вестник БарГУ

Научно-практический журнал

Издаётся с марта 2013 года
Выходит 2 раза в год

№ 2 (12), ноябрь, 2022

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: vestnikbargu@gmail.com .

Подписные индексы: 00999 — для индивидуальных подписчиков; 009992 — 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 опубликования 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, белорусском и английском языках.
Распространяется на территории Республики Беларусь.

Заведующий редакционно-издательской группой А. Ю. Сидоренко
Технический редактор Л. Н. Щербук
Компьютерная вёрстка С. М. Глушак
Корректор Н. Н. Колодко

Подписано в печать 27.10.2022. Формат 60 × 84 1/8.
Бумага ксероксная. Печать цифровая.
Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 14,00. Уч.-изд. л. 9,00.
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, заслуженный работник образования Республики Беларусь, профессор кафедры технического обеспечения сельскохозяйственного производства и агрономии (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Климук В. В. (зам. гл. ред. журн.), кандидат экономических наук, доцент, первый проректор (учреждение 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 (государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», Минск, Республика Беларусь; учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Горбач Ю. Е. (отв. секретарь сер.) (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

Зубрицкая Л. С. (ред. текстов на англ. яз.) (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь).

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

Анискович Г. И., кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», Минск, Республика Беларусь);

Белый А. В., академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор (государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», Минск, Республика Беларусь); **Девойно О. Г.**, доктор технических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской инновационной лабораторией плазменных и лазерных технологий (филиал Белорусского национального технического университета «Научно-исследовательская часть», Минск, Республика Беларусь);

Дремук В. А., кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь); **Жигалов А. Н.**, доктор технических наук, доцент (учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь; государственное научное учреждение «Институт технологии металлов Национальной академии наук Беларуси», Могилев, Республика Беларусь); **Калугин Ю. К.**, кандидат технических наук, доцент (учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», Гродно, Республика Беларусь); **Карташевич А. Н.**, доктор технических наук, профессор (учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», Горки, Республика Беларусь);

Клочков А. В., доктор технических наук, профессор (учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», Горки, Республика Беларусь); **Клубович В. В.**, академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор (государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», Минск, Республика Беларусь); **Сиваченко Л. А.**, доктор технических наук, профессор (межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», Могилев, Республика Беларусь); **Томило В. А.**, доктор технических наук, профессор (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь); **Шелег В. К.**, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь).

Promoter: Educational Institution
"Baranovichi State University".

Editorial address:

21 Voykova Str., 225404 Baranovichi.
Phone: +375 (163) 64 34 77.
E-mail: vestnikbargu@gmail.com .

Subscription indices: 00999 — for individual subscribers;
009992 — 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, Belorussian and English. The journal is
distributed on the territory of the Republic of Belarus.

Managing editor A. Y. Sidorenko
Technical editor L. N. Scherbuk
Desktop Publishing S. M. Glushak
Proofreader N. N. Kolodko

Signed print 27.10.2022. Format 60 × 84 1/8. Paper xerox.
Digital printing. Headset Times. Conv. pr. s. l. 14,00.
Acc.-pub. s. l. 9,00. 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 Str., 231800 Slonim,
Grodno region.

EDITORIAL BOARD

Kochurko V. I. (*editor-in-chief*), DSc in Agriculture, Professor, Academician of the Belarusian Academy of Engineering, Academician of the International Academy of Technical Education, academician of the International Academy of Pedagogical Education, Academician of the Academy of Economic Sciences of Ukraine, Honored Worker of Education of the Republic of Belarus, Professor of Department of Technical Support of Agricultural Production Processes and Agronomic Sciences (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Klimuk V. V. (*deputy editor-in-chief*), PhD in Economics, Associate Professor, first vice-rector (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Alifanov A. V. (*the series editor-in-chief*), Laureate of the State Prize of the Republic of Belarus in the field of science and technology, DSc in Technical Sciences, Professor (State Scientific Institution "Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus", Minsk, the Republic of Belarus; Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Gorbach Yu. E. (*responsible for the topic area "Engineering Sciences"*) (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Zubritskaya L. S. (*ed. of texts in English*) (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Bogdanovich I. A. (*responsible for the area "Mechanical Engineering and Machine Science"*), PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus); **Duben I. V.** (*responsible for the area "Processes and Machines of Agro engineering Systems"*), PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus).

Aniskovich G. I., PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational Institution "Belarusian State Agrarian Technical University", Minsk, the Republic of Belarus); **Bely A. V.**, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc in Technical Sciences, Professor (State Scientific Institution "Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences of Belarus", Minsk, the Republic of Belarus); **Devoino O. G.**, DSc in Technical Sciences, Professor, Head of the Innovative Research Laboratory of Plasma and Laser Technologies (branch of the Belarusian National Technical University "Research Unit", Minsk, the Republic of Belarus); **Dremuk V. A.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus); **Zhigalov A. N.**, DSc in Technical Sciences, Associate Professor (Educational Institution "Baranovichi State University", Baranovichi, the Republic of Belarus; State scientific institution "Institute of Metal Technology of the National Academy of Sciences of Belarus", Mogilev, the Republic of Belarus); **Kalugin Yu. K.**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor (Educational Institution "Yanka Kupala Grodno State University", Grodno, the Republic of Belarus); **Kartashevich A. N.**, DSc in Technical Sciences, Professor (Educational Institution "Belarusian State of the Orders of the October Revolution and Labor Red Banner Agricultural Academy", Gorki, the Republic of Belarus); **Klochkov A. V.**, DSc in Technical Sciences, Professor (Educational Institution "Belarusian State of the Orders of the October Revolution and Labor Red Banner Agricultural Academy", Gorki, the Republic of Belarus); **Klubovich V. V.**, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc in Technical Sciences, Professor (State Scientific Institution "Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences of Belarus", Minsk, the Republic of Belarus); **Sivachenko L. A.**, DSc in Technical Sciences, Professor (Interstate Educational Institution of Higher Education "Belarusian-Russian University", Mogilev, the Republic of Belarus); **Tomilo V. A.**, DSc in Technical Sciences, Professor (Belarusian National Technical University, Minsk, the Republic of Belarus); **Sheleg V. K.**, A. M. of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc in Technical Sciences, Professor (Belarusian National Technical University, Minsk, the Republic of Belarus).

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Горавский И. А., Жигалов А. Н., Винничек К. С. Технология и режимы аэродинамического звукового воздействия на осевой фрезерный инструмент из быстрорежущих сталей

Кебез А. В., Кривонос Ю. И., Бучик Т. Ю., Паранин С. Н., Спирин А. В. Исследование модельных индукторных систем на основе волокнистого нанокompозита мелкодисперсного сплава медь-ниобий

Малеронюк В. В., Алифанов А. В., Милюкова А. М., Богданович И. А. Моделирование процесса магнитно-импульсной обработки с предварительным нагревом осевого режущего инструмента

Милюкова А. М., Алифанов А. В., Матяс А. Н., Толкачева О. А. Исследование физико-механических свойств ножей из стали 30X13 после магнитно-импульсной обработки

Патапаў У. А., Русан С. І., Сівачэнка Л. А. Камбінаваны метады сілавага аналізу прываднага механізма ланцужнага аграгата

Пивоварчик А. А., Гавриленя А. К., Корольков А. С. Исследование влияния величины пробега легкового транспортного средства на плотность и температуру вспышки в открытом тигле моторных масел «Лукойл Люкс 5W-40» и «Нафтан Премьер 5W-40»

Шматов А. А. Многомерная оптимизация термогидрохимической обработки твердого сплава в гидрозолье оксидов цинка и молибдена

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

Голубев В. С., Вегера И. И., Ходюш В. Е., Дробышевский П. С. Наплавка износостойких слоев на рабочие кромки противорезущих брусьев кормоуборочных комбайнов

Груданов В. Я., Ткачева Л. Т., Белохвостов Г. И., Кунаш М. В. Новые направления в конструировании глушителей шума поршневых двигателей внутреннего сгорания

Китун А. В., Швед И. М., Бондарев С. Н., Скорб И. И. Оптимизация выбора оборудования для удаления навоза механическими стационарными средствами на животноводческих фермах и комплексах

Крупенин П. Ю., Крупенин Ю. А. Диагностирование доильной установки в переходных режимах работы

Михайлов К. М., Михайлов М. И. Влияние расположения ножей режущего барабана кормоуборочного комбайна на параметры его образующей

MACHINE BUILDING AND ENGINEERING SCIENCE

4 Goravskii I. A., Jigalov A. N., Vinnichak K. S. Technology and modes of aerodynamic sound impact on axial milling tools made of high-speed steels

16 Kebets A. V., Krivonos Y. I., Buchik T. Y., Paraniin S. N., Spirin A. V. Study of model inductor systems based on a fibrous nanocomposite of a finely dispersed copper-niobium alloy

24 Maleronok V. V., Alifanov A. V., Miliukova A. M., Bogdanovich I. A. Magnetic-pulsed process modeling with the axial cutting tool preheating

30 Miliukova A. M., Alifanov A. V., Matsias A. N., Tolkachova O. A. Study of physical and mechanical properties of knives made of 30X13 steel after magnetic pulse treatment

36 Potapov V. A., Rusan S. I., Sivachenko L. A. Combined method of force analysis of the chain unit drive mechanism

47 Pivovarchyk A. A., Haurylenia A. K., Korolkov A. S. The study of the influence of the mileage of a passenger vehicle on the density and flash point in an open crucible of Lukoil Lux 5W-40 and Naphthan Premier 5W-40 motor oils

53 Shmatov A. A. Multidimensional optimization of hard alloy thermo-hydrochemical treatment in zinc and molybdenum oxides hydrosol

PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

65 Golubev V. S., Vegera I. I., Khodziush U. E., Drobyshevsky P. S. Surfacing of wear-resistant layers on the working edges of anti-cutting bars of forage harvesters

74 Grudanov V. Ya., Tkacheva L. T., Belokhvostov G. I., Kunash M. V. New directions in the noise mufflers design of reciprocating internal combustion engines

85 Kitun A. V., Shved I. M., Bondarev S. N., Skorb I. I. Optimization of the equipment selection for manure removal by mechanical stationary means on livestock farms and complexes

94 Krupenin P. Y., Krupenin Y. A. Diagnosis of the milking machine in transient operation modes

100 Mikhailov K. M., Mikhailov M. I. Influence of the cutting drum knives position of a forage harvester on the parameters of its generator

УДК 621.791.927.5

В. С. Голубев¹, кандидат технических наук,
И. И. Вегера¹, кандидат технических наук,
В. Е. Ходюш¹, **П. С. Дробышевский**²

¹Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», ул. Академика Купревича, 10, 220141 Минск, Республика Беларусь, +375 (29) 638 19 50, gvs_fti@mail.ru

²Открытое акционерное общество «Гомсельмаш», ул. Шоссейная, 41, 246004 Гомель, Республика Беларусь

НАПЛАВКА ИЗНОСОСТОЙКИХ СЛОЕВ НА РАБОЧИЕ КРОМКИ ПРОТИВОРЕЖУЩИХ БРУСЬЕВ КОРМОУБОРОЧНЫХ КОМБАЙНОВ

В данной работе приведены результаты исследований микроструктуры, качества и ряда физико-механических характеристик износостойких слоев, создаваемых на рабочих кромках образцов противорежущих брусьев из стали 45 методами электродуговой и индукционной наплавки. Электродуговой наплавкой формировались упрочненные слои из износостойких сплавов трех различных составов на стальной и чугунной основах. Для индукционной наплавки использовались порошки износостойких сплавов на никелевой и кобальтовой основах. Проведенные полевые испытания показали, что разработанная технология электродуговой наплавки дает положительный эффект, ресурс работы упрочненных деталей повышается. Выполненные эксперименты по индукционной наплавке на рабочие кромки противорежущих брусьев с использованием самофлюсующихся порошков показали, что наплавленные слои являются достаточно гомогенными и имеют характерную мелкоячеистую и дендритную структуру. При этом наблюдается полное заполнение нужного профиля, отсутствуют поры, трещины, несплошности и другие дефекты.

Ключевые слова: электродуговая наплавка; индукционная наплавка; наплавленный слой; микроструктура; твердость.

Рис. 4. Библиогр.: 8 назв.

V. S. Golubev¹, PhD in Technical Sciences,
I. I. Vegera¹, PhD in Technical Sciences,
U. E. Khodziush¹, **P. S. Drobyshevsky**²

¹State Scientific Institution “Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus”, 10 Akademician Kuprevich Str., 220141 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (17) 369 31 24, gvs_fti@mail.ru

²Open Joint-Stock Company “Gomselmash”, 41 Shosseynaya Str., 246004 Gomel, the Republic of Belarus

SURFACING OF WEAR-RESISTANT LAYERS ON THE WORKING EDGES OF ANTI-CUTTING BARS OF FORAGE HARVESTERS

This paper presents the results of the microstructure studies, quality, and a number of physical and mechanical characteristics of wear-resistant layers created on the working edges of anti-cutting bars samples made of steel 45 by electric arc and induction surfacing methods. Hardened layers of wear-resistant alloys of three different compositions were formed by electric arc surfacing on steel and cast iron bases. Powders of wear-resistant alloys on nickel and cobalt bases were used for induction surfacing. Conducted field tests have shown that the developed technology of electric arc

surfacing has a positive effect, the service life of hardened parts increases. The performed experiments on induction surfacing on the working edges of anti-cutting bars using self-fluxing powders showed that the deposited layers are quite homogeneous and have a characteristic fine-meshed and dendritic structure. In this case, complete filling of the desired profile is observed, there are no pores, cracks, discontinuities and other defects.

Key words: arc welding; induction welding; deposited layer; microstructure; hardness.

Fig. 4. Ref.: 8 titles.

Введение. Основными причинами выхода из строя сменных деталей измельчающих узлов кормоуборочных комбайнов (ножей, противорежущих брусьев) являются износ, растрескивание рабочих кромок и поверхностей, выкрашивание, деформация и поломка. Все эти проявления требуют от используемого материала наличия определенных физико-механических свойств. Так, для повышения стойкости к абразивному износу необходимо наличие гетерофазной структуры с включениями повышенной твердости. Возрастание твердости в целом может вызывать повышение хрупкости, следовательно, повысится вероятность выкрашивания рабочих кромок и поверхностей, которое будет способствовать еще более интенсивному износу.

Уменьшить склонность к выкрашиванию и трещинообразованию возможно только увеличением его вязкости, повышая работу ударного разрушения. Потеря твердости чаще всего связана с изменением структурно-фазового состояния материала. Одним словом, решить проблему можно с использованием технологий создания слоистых материалов, формируя на поверхности рабочие слои с необходимыми эксплуатационными свойствами. Поскольку работоспособность некоторых деталей часто определяется свойствами работающих поверхностных слоев, технически и экономически целесообразно при изготовлении металлоемких изделий использовать материалы с резко различающимися свойствами для сердцевины, кромок или поверхности, применяя различные технологии и варианты при их изготовлении, а также составы износостойких материалов [1—7].

Так, например, увеличивая вязкость и трещиностойкость нанесенных на поверхность слоев, можно повысить стойкость всего изделия при воздействии на него динамических, циклических, механических и других нагрузок. Повышение износостойкости может быть достигнуто нанесением слоев, содержащих в структуре твердые растворы с легирующими элементами, которые образуют карбиды с высокой твердостью и термической стабильностью твердых растворов и карбидов.

В настоящее время существует большое количество технологий и методов для получения слоев необходимой глубины с заданными свойствами. В частности, наплавка — нанесение слоя расплавленного металла на оплавленную металлическую поверхность (основу) посредством плавления присадочного материала теплотой газового пламени (кислородно-ацетиленового или пропанового), лазерным излучением, электрической или плазменной дугой, индукционным нагревом и др. Каждый из методов имеет в определенной степени общие недостатки и достоинства, связанные с выбором соответствующих материалов и оборудования и технологическими особенностями процесса наплавки [1—7].

Материалы и методы исследования. В данной работе проведены исследования микроструктуры, качества и ряда физико-механических характеристик износостойких слоев, создаваемых на рабочих кромках образцов из стали 45 методами электродуговой и индукционной наплавки. Для отработки технологии наплавки, пригодности выбранного метода и выбора оптимальных составов наплавочных материалов были изготовлены образцы длиной 250 мм, сечением 60 × 30 мм, на ребрах которых выфрезировывались соответствующие открытые или закрытые пазы с размерами ~10 × 10 мм. Размеры наплавленных нами опытных образцов противорежущих брусьев и аналогичных готовых изделий для конкретных сельскохозяйственных машин были одинаковы. Это позволяло получать данные об изменении возникающих изгибающих моментов и короблений по длине образцов в целях учёта этих факторов

в дальнейшем при разработке технологии изготовления, а также для дальнейшей оптимизации выбранных методов наплавки, составов наплавочных материалов и режимов термической обработки в технологическом цикле изготовления такого рода длинно-размерных изделий.

Далее методом электродуговой наплавки формировали упрочненные валики (рисунок 1, а) наплавленного металла из трех различных составов износостойких сплавов. Для этих целей использовали электроды со специальным защитным покрытием: состав 1 — высоколегированный хромосодержащий сплав (С-4,75 %, Si-1,37 %, Cr-23,7 %...), состав 2 — легированная сталь (С-0,65 %, Si-0,7 %, Cr-4 %...), состав 3 — легированный чугун (С-3 %, Si-2 %, Cr-8 %...). Слои формировались при наплавке электродов за несколько проходов. При этом ток дуги экспериментально выбирался в диапазоне 120...200 А. Наплавку на рабочие грани образцов проводили при комнатной температуре (холодная подложка) и при предварительном нагреве их в печи до различных температур. Исходная структура образцов была феррито-перлитной. Микротвердость феррита при этом составляла 2 250...2 400 МПа (20...23 HRC), твердость перлита — 2 560...2 690 МПа (25...27 HRC).

Индукционный нагрев (см. рисунок 1, б) в целях наплавки осуществляли непрерывно-последовательным методом, используя для этого установки нагрева токами высокой частоты ФТИ 3.148.1, ФТИ 3.148.2. Оборудование комплектовалось высокочастотными преобразователями в различных диапазонах частот и специальными индукторами, спроектированными и изготовленными в лаборатории скоростных методов термообработки ФТИ НАН Беларуси. Основными параметрами при нагреве с использованием воздействия токами высокой частоты является частота используемого источника и его мощность. При этом для наплавки применялись индуктора с воздействием как внутреннего, так и внешнего поля. В первом случае при использовании для нагрева внутреннего поля индуктор имел исполнение в виде замкнутой водоохлаждаемой плоской и широкой трубки, между витками которой располагалась нагреваемая деталь. При наплавке внешним полем в качестве дополнительных элементов применялись ферритные вставки, цель которых — «выдавливает» электромагнитное поле наружу витка.

Для наплавки использовались порошки износостойких сплавов на никелевой (Т-Термо 55, ПГ-10Н-01 и Т-Термо 650 (ПГ-10Н-01 + 50 % WC)) и кобальтовой (ПГ-10К-01) основах. Изучение структурных и фазовых превращений проводилось с применением металлографического, электронно-микроскопического и рентгеноструктурного анализов. Исследования физико-механических свойств проводились по стандартным методикам.



а)



б)

Рисунок 1. — Образец противорежущего бруса с наплавленной кромкой:
а — электродуговая наплавка; б — индукционная наплавка

Результаты исследования и их обсуждение. Выполненный нами анализ структуры образцов, вырезанных из противорежущих брусьев, производства ведущих зарубежных фирм, поставляемых в нашу республику, показал, что этими фирмами используются конструкционные недорогие стали типа Ст45 или 65Г с наплавкой на рабочие грани слоя легированного белого износостойкого чугуна толщиной ~4...5 мм. В частности, противорежущие брусья кормоуборочных комбайнов немецких фирм Claas, John Deere изготавливаются из сталей, не подвергнутых термической обработке с наплавкой рабочих кромок износостойким чугуном, легированным хромом, ванадием, вольфрамом и др. Как известно [1—2], износостойкие сплавы на основе высокохромистых белых чугунов широко применяются для поверхностного упрочнения электродуговой наплавкой деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания в сочетании с ударными нагрузками умеренной интенсивности. Для таких материалов оптимальное сочетание эксплуатационных характеристик по износостойкости и ударной вязкости достигается при полностью эвтектической структуре. Присутствие в их структуре дендритов твердого раствора приводит к снижению твердости и, соответственно, сопротивляемости абразивному изнашиванию.

Выполненные далее исследования показали следующее. Микроструктура наплавленного нами слоя, полученного с использованием хромсодержащего сплава (состав 1), состояла из первичных частиц карбидов с геометрической формой огранки (шестигранной, ромбической, треугольной и др.), характерной для карбидов хрома, образующихся в системе Fe—C—Cr с микротвердостью порядка 10 700...12 000 МПа, дендритов твердого раствора и эвтектики из карбидной фазы и твердого раствора. При этом размеры ячеек твердого раствора в дендритных ветвях наплавки изменялись, укрупняясь к границе сплавления с материалом подложки, их твердость составляла 5 300...5 400 МПа (49...50 HRC), твердость эвтектики была на уровне 6 000...6 300 МПа (54...55 HRC).

Металл подложки, граничащий с наплавленным слоем, претерпевает закалку. Непосредственно на границе располагается мартенситный слой в смеси с остаточным аустенитом глубиной приблизительно 0,3...0,35 мм. Твердость этого слоя составляла 6 200...6 500 МПа (55...56 HRC). В слоях ниже мартенсит испытывает отпуск, в структуре присутствует отпущенный мартенсит в смеси с трооститом и остаточным аустенитом, причем мартенсит, располагающийся ближе к наплавленному слою, претерпевает отпуск в большей степени, чем мартенсит, расположенный глубже. Таким образом, степень протекания релаксационных процессов в мартенсите уменьшается по мере удаления от наплавленного слоя [6]. В этой связи твердость непосредственно под наплавленным слоем меньше, чем на некотором удалении от границы сплавления. В итоге вначале твердость ниже, а затем по мере удаления повышается. Следует отметить, что при наплавке на холодный образец в наплавленном слое могло наблюдаться возникновение трещин.

Характер изменения микроструктуры в образцах с наплавкой на предварительно подогретые подложки аналогичен. В наплавленных слоях и подложке структурные составляющие те же, но в структуре материала образцов при наплавке на подогретые образцы изменялась протяженность областей существования фаз. Происходило сужение размеров зон, наблюдался более быстрый переход к области, где фиксируется обособление зерен перлита с приграничными разреженными участками с дальнейшим переходом их в феррит с мелкими карбидами. Таким образом, под слоем наплавки вначале наблюдается образование структур неполной закалки.

Было опробовано также наплавление кромок брусьев стальными (состав 2) и чугунными электродами другого состава по такой же технологии наплавки (состав 3). Микроструктура слоя, наплавленного электродуговым методом с использованием стального электрода, состояла из дендритов твердого первичного раствора, закаленного на мартенсит в смеси с остаточным аустенитом. При этом твердость слоя, наплавленного на холодную подложку, составляла 6 670...7 450 МПа (57...60 HRC). На границе сплавления твердость была ~4 750 МПа (46 HRC). Непосредственно под наплавленным слоем в подложке наблюдалась

смесь из перлита, небольшого количества феррита и отпущенного мартенсита. Твердость здесь составляла $\sim 3\ 200$ МПа (33 HRC), т. е. основу приграничного слоя образца составляют структуры неполной закалки в виде претерпевшего отпуск мартенсита в смеси с трооститом и остаточный аустенит. Под этим слоем располагается такая же структура, но твердость этой смеси несколько выше — $\sim 4\ 200\ \dots\ 4\ 350$ МПа (42...43 HRC) — вследствие количественного изменения состава фаз и величины отпуска мартенситной фазы [6].

При применении этого состава стали на подогретые образцы в структуре дендритов наплавленного слоя наблюдается так же, как и при наплавке на холодную основу, распад пересыщенных легирующими элементами приграничных зон первичного твердого раствора, при этом происходит выделение смеси карбидной фазы и, по-видимому, аустенита на стыках ветвей и по границам зёрен (рисунок 2).

Следует отметить, что непосредственно на самой поверхности слоя этот распад был не столь значительным и происходил с образованием небольшого количества продуктов распада. В то же время по мере приближения к границе сплавления с материалом подложки количество распавшегося твердого раствора увеличивалось (см. рисунок 2, а). При этом в центральных объемах ветвей дендритов твердого раствора происходило превращение в мартенсит игольчатой морфологии. В этих случаях степень перенасыщенности твердого раствора падает, что сопровождается уменьшением искаженности кристаллической решетки как в твердом растворе, так и в образованном из него мартенсите. По этой причине твердость по сечению наплавленного слоя в твердом растворе снижается от $\sim 7\ 750\ \dots\ 7\ 450$ МПа (60...61 HRC) на поверхности до $\sim 3\ 450$ МПа (38 HRC) вблизи слоя наплавки. С ростом температуры образцов снижение твердости вблизи границы с подложкой интенсифицируется.

На всех образцах границы сплавления с подложкой были сплошными, а слои без наличия трещин. Однако необходимо отметить, что у этого состава сплава относительно низкая жидкотекучесть расплава, вследствие чего возможно образование такого дефекта, как неполное заполнение расплавом угла в выборке по ребру образца. Данный состав материала наплавки уступал предыдущему по твердости, но при его применении в наплавленном слое не возникало трещин.

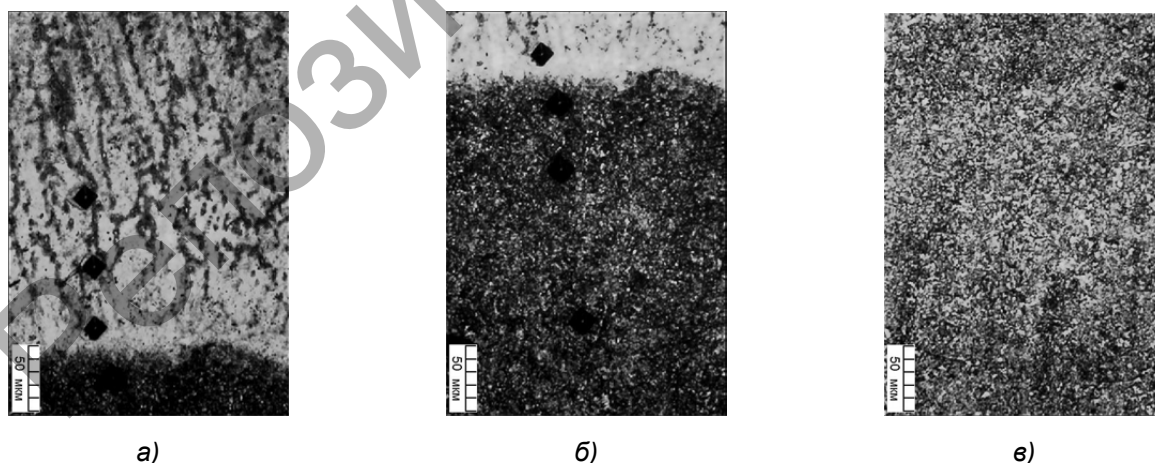


Рисунок 2. — Изменение микроструктуры после наплавки стальным электродом на подогретую до $300\ ^\circ\text{C}$ основу подложки, $\times 400$: а — структура наплавленного слоя (дендриты первичного твердого раствора, закаленного на мартенсит в смеси с остаточным аустенитом и частичным распадом твердого раствора по границам дендритных ветвей с выделением карбидной фазы и троостита); б — микроструктура границы сплавления и подложки, прилегающей к границе (смесь из мартенсита игольчатой морфологии, остаточного аустенита и троостита); в — микроструктура подложки по мере углубления от сплавления (смесь из мартенсита, остаточного аустенита, троостита и цепочек цементита по границам бывших аустенитных зерен)

В экспериментах по наплавке электродом из чугуна (состав 3) с содержанием более 3 % углерода и других элементов в структуре наплавленного слоя наблюдались первичные выделения карбидных фаз, небольшое количество мелких участков эвтектики из твердого раствора аустенита и карбидов и областей твердого раствора аустенита. При этом центральные зоны твердого раствора также претерпевали распад на аустенит и карбиды. В результате закалки твердый раствор трансформируется в мартенсит игольчатой морфологии и содержит остаточный аустенит, а наружные области, по всей вероятности, содержат меньшее количество легирующих элементов, обладают меньшей травимостью и имеют вид светлых гребней, которые окантовывают зерна бывших дендритных ветвей. Твердость таких светлых гребней: ободков — ~6 670 МПа (57 HRC), внутренних, претерпевших распад и более темных — ~7 250 МПа (59 HRC). В слое находится незначительное количество эвтектики, и она вырожденная. Твердость наплавленного слоя ближе к границе сплавления составляет ~7 750 МПа (61 HRC). На границе сплавления в структуре наблюдается мартенсит с остаточным аустенитом при твердости ~6 000...5 800 МПа (57...58 HRC). Под слоем непосредственно в структуре основы располагается смесь мартенсита с некоторым количеством троостита и остаточного аустенита.

При наплавке этого состава на подогретые образцы твердость в слое остается на достаточно высоком уровне вплоть до температуры предварительного нагрева 600 °С: ~10 080...7 740 МПа (68...61 HRC) с включениями карбидов и зонами вырожденной карбидной эвтектики, где микротвердость составляет, соответственно, ~28 000 и 11 000 МПа. На рисунке 3 приведены характерные микроструктуры при наплавке подогретого до 400 °С образца чугуном электродом. Наблюдается такой же характер изменения структуры, как и при наплавке на холодную основу. Изменения были следующими: наблюдается более полный распад твердого раствора, растет количество и размеры карбидной фазы в наплавленном слое, на границе сплавления имеет место смесь мартенсита, остаточного аустенита и троостита, а сразу в приграничной области образца (см. рисунок 3) проявляются троостит с остаточным аустенитом. По сравнению с наплавкой на холодную подложку протяженность всех лежащих ниже аналогичных областей структур меньше, такая закономерность сохраняется с ростом температуры образцов [6].

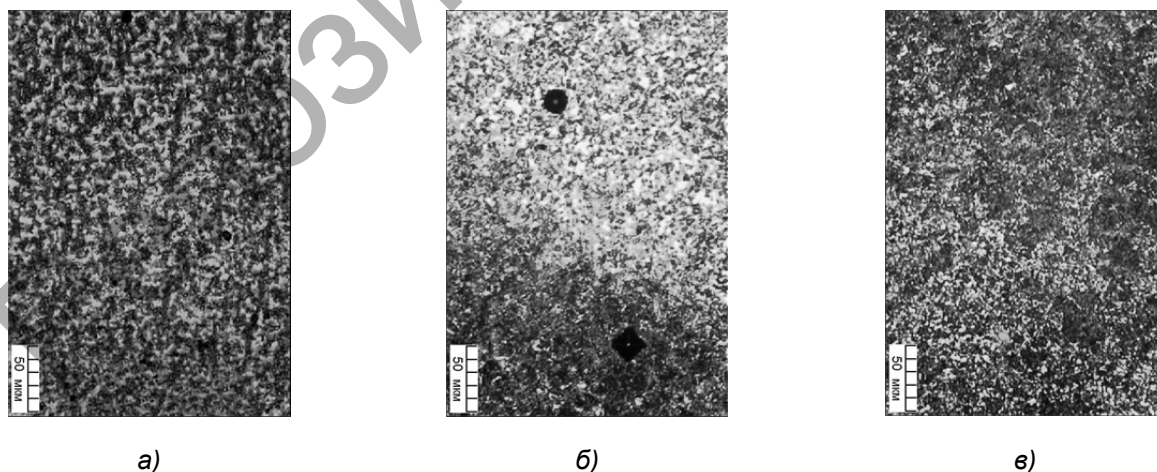


Рисунок 3. — Изменение микроструктуры при наплавке электродом из чугуна на подогретую до 400 °С основу по мере углубления от поверхности, $\times 400$: а — наплавленный слой (первичные карбиды, дендриты твердого раствора и эвтектика из карбидов и твердого раствора аустенита); б — наплавленный слой и переходная зона (в переходной зоне — мартенсит, остаточный аустенит, троостит); в — микроструктура подложки вблизи переходной зоны (троостит, перлит, аустенит)

Следует отметить, что переходная зона на границе наплавленного слоя и подложки является плавной, со взаимным проникновением твердых растворов друг в друга, без расслоений, трещин и других дефектов, что способствует постепенному распределению физико-механических свойств по сечению. Как правило, жидкотекучесть расплава износостойкого чугуна более высокая, чем при наплавлении с использованием стальных электродов. Этот фактор будет гарантировать лучшее заполнение пазов, предварительно подготовленных в целях формирования кромок противорежущего бруса при предложенной технологии его изготовления с использованием электродуговой наплавки ребер легированными сплавами с высокой износостойкостью.

На основании проведенных исследований при оптимальном выборе состава наплавляемого материала, режимов и схемы электродуговой наплавки, с учетом условий проведения процесса в целях получения максимального качества наплавленного слоя и минимизации проблем при шлифовке были изготовлены несколько образцов реальных противорежущих брусьев для полевых испытаний. Анализ результатов испытаний показал, что разработанная технология дает положительный эффект, ресурс работы упрочненных деталей повышается. Так, интенсивность износа по ширине рабочих зон противорежущих брусьев в смешанном цикле работы (сенаж—кукуруза) составил не выше 0,11 мм / 1 000 т. Это дает основание предполагать, что прогнозные ресурсы работы упрочненных деталей будут составлять значения не менее указанных в СТБ 1616-2011.

Далее, проанализировав предыдущий опыт и учитывая желание со стороны ведущих отечественных специалистов в области сельхозмашиностроения, например ОАО «Гомсельмаш», максимально использовать возможности автоматизации разрабатываемых процессов, было принято решение апробировать метод наплавки на основе индукционного нагрева с использованием порошков самофлюсующихся сплавов износостойких составов.

Проведенный подбор режимов показал, что выбранная технология наплавки может быть весьма перспективной для такого рода деталей. На рисунке 1, б, показан противорежущий брус с наплавленным участком рабочей кромки. На рисунке 4 приведена фотография заполнения паза расплавом на противорежущем брусике при однократном проходе в процесса наплавки.

Следует отметить, что такое формирование наплавленного слоя в пазу связано с усадкой материала при расплавлении порошка, которое может достигать 50 % и более. Но при определенных условиях уже одного прохода оказывается в принципе достаточным, чтобы после окончательной шлифовки получить необходимые толщины наплавленного слоя ~4...5 мм. Наплавленный слой (см. рисунок 4) является достаточно гомогенным и имеет характерную мелкоячеистую и дендритную структуру. При этом наблюдается полное заполнение нужного профиля паза, отсутствуют поры, трещины, несплошности и другие дефекты. Твердость наплавки, например, порошка Т-Термо 55 варьировалась от 35 HRC до заявленной его производителем твердости. При выборе порошков с большей твердостью из линейки указанной марки порошков есть возможность получения и более твердых наплавленных слоев на рабочих кромках такого рода деталей.

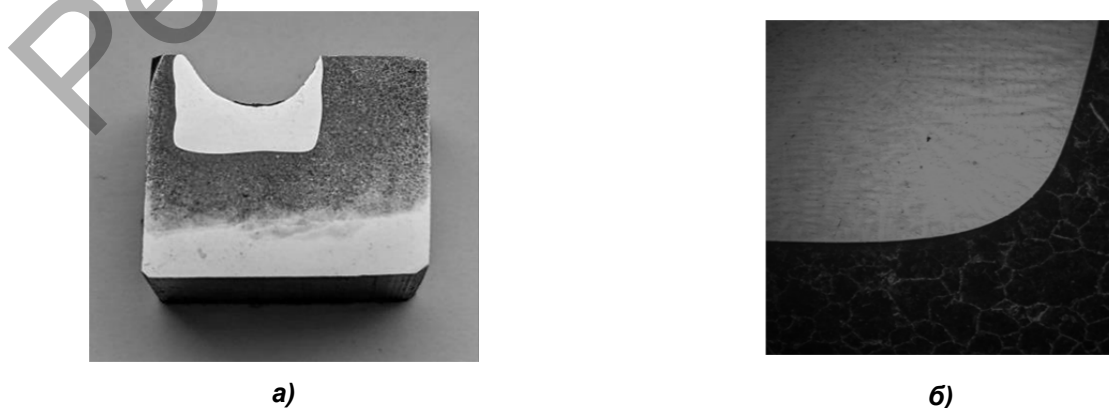


Рисунок 4. — Наплавка в паз при использовании технологии индукционного нагрева: а — общий вид наплавки при однократном проходе; б — микроструктура наплавленного слоя

Анализ структур поверхностных слоев из, например, Ni—Cr—B—Si-сплавов, полученных с использованием различных источников, в том числе токов высокой частоты, показал, что при умеренных скоростях нагрева и охлаждения, свойственных индукционной наплавке, наплавляемые Ni—Cr—B—Si-сплавы имеют сложную многофазную структуру: первичные кристаллы γ — твердого раствора на основе никеля с микротвердостью 3 780...5 250 МПа, мелкодисперсная эвтектика [γ + Ni₃B] с микротвердостью 6 350...8 950 МПа, карбиды стерженьковой формы длиной до 110...120 мкм и карбиды сложной разветвленной формы. Исследования на микрорентгеновском анализаторе показали, что карбиды сложной ветвистой формы по стехиометрическому составу близки к Cr₇C₃, а стерженьковой формы — к Cr₃C₂. При этом отмечается, что при сравнении, например, лазерной наплавки с наплавкой токами высокой частоты твердый раствор более пересыщен легирующими элементами, в структуре наплавленных покрытий значительно меньше карбидов стерженьковой формы и больше крупных низших карбидов Cr₂₆C₆. Все это дает основание считать, что предложенная технология создания наплавленных слоев на рабочих кромках противорежущих брусьев вполне может обеспечить нужные эксплуатационные свойства этим изделиям, т. е. обеспечить им необходимые абразивную износостойкость и прочность при ударных нагрузках [8].

Основной задачей в этом случае является недопущение как недогрева, так и перегрева порошков при наплавке выше 1 050...1 100 °С, при этом важным фактором является также скорость осуществляемого нагрева. С этой целью было апробировано несколько типов индукторов с поперечным и продольным их расположением. Установлено, что при продольных схемах оплавления возростала вероятность проявления негативных тенденций по стабилизации температуры нагрева в оптимальном диапазоне, величине остаточных напряжений, приводящих к деформации детали и др.

Заключение. В соответствии с типом деталей «противорежущие брусья» и условиями их работы выбран путь повышения их работоспособности, определен выбор легирующих элементов и состав покрытия. Определены технологические параметры процесса и температурные интервалы нагрева подложки для наплавки и формирования режущих износостойких кромок изделий и температуры термической обработки для устранения поволоки и коробления. Проведенные полевые испытания показали, что разработанная технология электродуговой наплавки дает положительный эффект, ресурс работы упрочненных деталей повышается. Так, интенсивность износа по ширине рабочих зон противорежущих брусьев в смешанном цикле работы (сенаж—кукуруза) составил не выше 0,11 мм / 1 000 т.

Проведенные эксперименты по индукционной наплавке износостойких слоев на рабочие грани противорежущих брусьев с использованием самофлюсующихся порошков показали, что наплавленный слой является достаточно гомогенным и имеет характерную мелкоячеистую и дендритную структуру. При этом наблюдается полное заполнение нужного профиля, отсутствуют поры, трещины, несплошности и другие дефекты. Это все дает основание полагать, что предложенная технология создания наплавленных слоев вполне может обеспечить нужные эксплуатационные свойства такого рода изделиям, т. е. обеспечить им необходимые износостойкость и прочность при ударных нагрузках. Кроме того, процесс наплавки, основанный на индукционном нагреве, может быть в достаточной степени автоматизирован.

Список цитированных источников

1. Лившиц, Л. С. Основы легирования наплавленного металла / Л. С. Лившиц, Н. А. Гринберг, Э. Г. Куркумелли. — М. : Машиностроение, 1969. — 106 с.
2. Фрумлин, И. И. Современные типы наплавленного металла и их классификация // Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавленный металл : сборник. — Киев : Наук. думка, 1977. — С. 3—179.
3. Бабей, Ю. И. Поверхностное упрочнение металлов / Ю. И. Бабей, Б. И. Бутаков, В. Г. Сысоев. — Киев : Наук. думка, 1995. — 256 с.

4. *Рябцев, И. А.* Наплавка деталей машин и механизмов / И. А. Рябцев — Киев : Экотехнология, 2004. — 160 с.
5. *Шило, И. Н.* Повышение работоспособности деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин / И. Н. Шило, Г. Ф. Бетенья, В. С. Голубев. — Минск : БГАТУ, 2010. — 320 с.
6. Структурообразование в поверхностных слоях при электродуговой наплавке на детали сельхозтехники / В. И. Гуринович [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. — Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2015. — Кн. 2. — С. 117—122.
7. Обработка изделий машиностроения с применением индукционного нагрева / А. И. Гордиенко [и др.]. — Минск : Беларус. наука, 2009. — 287 с.
8. *Тарасова, Т. В.* Особенности формирования структуры наплавленных слоев при лазерной обработке / Т. В. Тарасова, С. Д. Кузьмин, В. С. Голубев // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2014. — № 9. — С. 26—30.

Поступила в редакцию 18.10.2022.

Репозиторий БарГУ