



УДК 621.762

Поступила 27.10.2016

ДИФФУЗИОННО-ЛЕГИРОВАННЫЕ СПЛАВЫ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА С ПОНИЖЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ ПЛАВЛЕНИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКОЙ ТОКАМИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

DIFFUSIVELY ALLOYED COMPOUNDS MADE OF METAL DISCARD WITH A REDUCED MELTING TEMPERATURE FOR OBTAINING WEAR RESISTANT COATINGS USING INDUCTION HARD-FACING TECHNOLOGIES

В. Г. ЩЕРБАКОВ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: slava1212@tut.by, vg.stcherbakov@bntu.by, www.besto.by

V. G. SHCHERBAKOU, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: slava1212@tut.by, vg.stcherbakov@bntu.by, www.besto.by

В работе рассмотрена технология получения диффузионно-легированных сплавов из металлических отходов производства и исследовано влияние предварительной кратковременной высокотемпературной обработки концентрированными источниками энергии на структурообразование при последующей индукционной наплавке токами высокой частоты. Предложен и описан механизм контактного эвтектического плавления в диффузионно-легированных сплавах при кратковременной высокотемпературной обработке. Установлена целесообразность данной обработки для диффузионно-легированных сплавов при формировании износостойких покрытий индукционной наплавкой токами высокой частоты. Предложена комплексная ресурсо- и энергосберегающая технология получения износостойких покрытий из диффузионно-легированных металлических отходов производства индукционной наплавкой токами высокой частоты.

The technology of obtaining diffusion doped alloys made from metal scrap is reviewed in the article. The influence of short term preprocessing at high temperature on structure formation by concentrated energy sources within the further induction deposit is reviewed. A mechanism of a contact eutectic melting in diffusion doped alloys at short term high temperature treatment is described and suggested in this work. It was shown that such kind of processing of diffusion doped alloys is a perspective way of treatment when using induction hard-facing technologies for obtaining wear resistant coatings. A resource and energy saving technology was developed for obtaining wear resistant coatings based on diffusion doped alloys from metal scrap treated using induction hard-facing process.

Ключевые слова. Диффузионно-легированные сплавы, индукционная наплавка, температура плавления, металлические отходы производства.

Keywords. Diffusion doped alloys, induction depositing, melting temperature, metal scrap.

Введение

Более чем за 25 лет научно-исследовательской работы авторами [1–8] исследована и реализована на практике технология получения сплавов для наплавки и напыления из диффузионно-легированных металлических порошков и металлоотходов. Изготовлены лабораторные и промышленные образцы диффузионно-легированных наплавочных сплавов и внедрены технологии и оборудование для формирования защитных покрытий на различных деталях. Разработанная гамма диффузионно-легированных сплавов из металлических отходов производства в основном используется при формировании защитных покрытий с помощью таких высокоэнергетических процессов, как напыление, электродуговая, газопламенная и лазерная наплавка. Диффузионно-легированные сплавы для индукционной наплавки токами высокой частоты (ТВЧ) являются перспективными материалами для замены таких сплавов, как сормайт (У30Х28Н4С4) или ФБХ-6-2 (У45Х35ГЗР2С). Несмотря на то что индукционная наплавка – одна из самых низкокзатратных по удельной мощности процесса технологий упрочнения и восстановления деталей

машин, диффузионно-легированные сплавы из металлических отходов производства широкого распространения не получили. Как и ранее, при упрочнении и восстановлении деталей машин, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания, применяют наплавочные сплавы, разработанные более 50 лет назад. Эксплуатационные свойства получаемых покрытий из данных сплавов часто завышены и влекут за собой существенный рост как стоимости самой обработки, так и окончательной стоимости готового изделия. Использование взамен дорогостоящих наплавочных сплавов на железной и никелевой основах для индукционной наплавки ТВЧ диффузионно-легированных сплавов из металлических отходов производства является экономически целесообразным.

Цель данной работы заключалась в разработке диффузионно-легированных сплавов из металлических отходов производства с пониженной температурой плавления для формирования износостойких покрытий индукционной наплавкой токами высокой частоты.

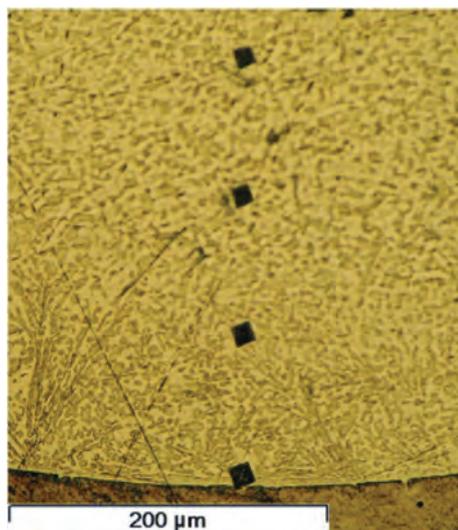
Материалы и методика исследований. Для исследований были выбраны отходы чугуна дробы ДЧЛ 08 и ИЧХ28Н2 фракцией 200 и 500–630 мкм. Диффузионное легирование (борирование) осуществлялось в специально разработанных электрических печах с вращающимся одним либо несколькими контейнерами из нержавеющей стали [9]. Температура процесса составляла 950 °С, время выдержки – 1 ч. Последующий рассев насыщающей смеси и насыщаемого материала осуществляли с помощью сит либо магнитного сепаратора. В качестве насыщающего компонента использовали карбид бора с добавкой 1% активатора. Смеси для наплавки состояли из диффузионно-легированного сплава и наплавочного сплава ФБХ-6–2 с добавкой плавкой буры. Индукционную наплавку ТВЧ осуществляли с помощью установок ВЧГ2–100/0,066 и установки ФТИ [10]. Температуры контролировали визуально и с помощью пирометра «Compart» CTLaser-2МН-CF4. Подготовку образцов из диффузионно-легированных сплавов и покрытий на их основе проводили согласно стандартным методам и методикам. Анализ микроструктуры проводили на микроскопах МИ-1 и Leica P2500P и VEGA II при различных увеличениях. Испытания на износ проводили на лабораторной установке в среде незакрепленных абразивных частиц. Кратковременную высокотемпературную обработку проводили на установке УПУ-3Д, установке для ручной дуговой сварки в среде аргона с вольфрамовым электродом и лабораторной экспериментальной установке с двумя графитовыми электродами [11].

Исследование сплавления сплавов из диффузионно-легированной дробы ДЧЛ 08 и ИЧХ28Н2. Шихту для наплавки изготавливали механическим перемешиванием диффузионно-легированного сплава с наплавочным сплавом ФБХ-6–2 и плавкой бурой в различных пропорциях. Установлено, что при увеличении в шихте для наплавки концентрации диффузионно-легированного сплава растет и продолжительность процесса формирования покрытия. Повышение температуры наплавки выше 1250 °С нецелесообразно, так как это приведет к перегреву и даже пережогу основного металла в процессе наплавки, что недопустимо. Увеличение продолжительности наплавки происходит за счет использования циклического нагрева и выдержки при высоких температурах для визуального фиксирования расплавления шихты с образованием жидкой ванны расплава. При циклическом нагреве с выдержкой происходит полное расплавление шихты и завершаются диффузионные процессы, обеспечивающие прочное соединение наплавленного слоя с поверхностью детали.

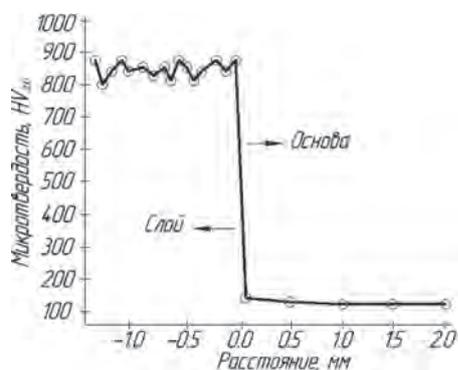
Выявлен существенный рост (60–70%) длительности индукционной наплавки с повышением концентрации в шихте диффузионно-легированного сплава из чугуна дробы ДЧЛ 08 [12]. Рост продолжительности времени формирования износостойкого покрытия с увеличением концентрации диффузионно-легированной чугуна дробы ДЧЛ 08 обуславливается повышением в наплавочной смеси низкобористой и высокобористой фаз, имеющих высокую (1389 °С – Fe₂B и 1540 °С – FeB) температуру плавления, образующихся на поверхности чугуна дробы вследствие предварительного диффузионного легирования. Увеличение продолжительности наплавки происходит за счет использования циклического нагрева и последующей выдержки при высоких температурах.

Твердость покрытий (рис. 1) из диффузионно-легированных отходов чугуна дробы ДЧЛ 08 и ИЧХ28Н2 составляет 850 и 950 HV. Толщина полученных слоев составляет 1,5–2,0 мм. Пористость незначительная и не превышает 1,0–1,5%, что также подтверждает полное расплавление шихты в процессе наплавки. Износостойкость защитных покрытий, полученных с помощью индукционной наплавки предварительно диффузионно-легированных металлических отходов чугуна дробы ДЧЛ 08 и ИЧХ28Н2, в 2,5–3,0 раза выше, чем у стали 45, подвергнутой закалке в воде с последующим низким отпускком.

Влияние предварительной кратковременной высокотемпературной обработки концентрированными источниками энергии на наплавляемость диффузионно-легированных сплавов из ме-



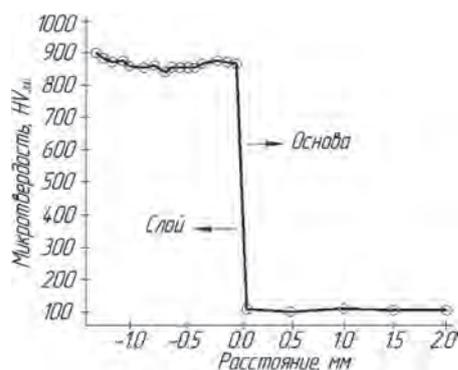
а



б



в



г

Рис. 1. Микроструктура и распределение твердости по сечению в покрытиях из диффузионно-легированной дроби ДЧЛ 08 (а, б) и ИЧХ28Н2 (в, г)

таллических отходов производства. Последующий микроанализ покрытий выявил наличие локальных областей в структуре с не расплавившимися в процессе индукционного нагрева частицами диффузионного сплава. Сохранившиеся в процессе наплавки частицы нарушают целостность покрытия и приводят к его скалыванию в процессе работы и резкому снижению эксплуатационных свойств упрочненной детали [12]. Был проведен анализ возможных путей снижения температуры плавления диффузионно-легированных сплавов для индукционной наплавки ТВЧ [13–15]. Для дальнейших исследований было выбрано направление по снижению температуры плавления диффузионно-легированных сплавов за счет контактного эвтектического плавления.

Известно [8, 16, 17], что при контакте двух кристаллов в зоне соприкосновения появляется жидкая фаза при температурах, значительно меньших, чем температура плавления контактирующих веществ. Это явление получило название контактно-реактивного плавления. Причиной плавления эвтектических сплавов надо считать не эвтектическую структуру, как таковую, а наличие контакта между двумя разнородными твердыми фазами в этой структуре. Эвтектическая структура, при которой кристаллы одного компонента находятся в тесном соприкосновении с кристаллами другого компонента, только обеспечивает этот контакт. Переходя к тройной эвтектике, надо отметить, что она имеет температуру плавления более низкую, чем эвтектика из любой пары компонентов, входящих в ее состав.

Отдельно следует обратить внимание на исследования контактного эвтектического плавления в работе В. Г. Дашкевича [6]. Автор впервые описал особенности растворения боромарганцированной про-

волокни в процессе наплавки. На границе раздела «диффузионный слой – основа» за счет растворения боридной оболочки с внутренней стороны слоя (со стороны ядра проволоки) образуется область легкоплавкой эвтектики. Зафиксирован процесс контактного эвтектического плавления.

Таким образом, предварительная кратковременная высокотемпературная обработка диффузионно-легированных сплавов концентрированными источниками энергии должна привести к оплавлению тугоплавкой боридной оболочки и образованию в сплаве эвтектических структур с более низкой температурой плавления, что повысит качество формируемого индукционной наплавкой покрытия.

В качестве источников тепла при кратковременной высокотемпературной обработке использовали установку УПУ-3Д, установку для ручной дуговой сварки в среде аргона с вольфрамовым электродом и лабораторную установку для обработки металлического порошка [11]. При оплавлении ДЛ сплавов на каждой установке проводили оценку некоторых параметров:

1. *Размерный параметр* учитывает диапазон допустимых размеров обрабатываемого материала.
2. *Параметр энергоёмкости процесса* учитывает потребляемую мощность оборудования при обработке материала.
3. *Параметр температурного воздействия* учитывает влияние температуры на формирование эвтектических структур в материале.
4. *Параметр стабильности источника* учитывает стабильность работы концентрированного источника энергии при обработке.
5. *Параметр локализации материала* учитывает расположение обрабатываемого материала в пространстве относительно концентрированного источника энергии.
6. *Параметр симметричности нагрева* учитывает влияние симметричности нагрева обрабатываемого материала при кратковременной обработке концентрированными источниками энергии.

Оценка выбранных параметров при кратковременной высокотемпературной обработке концентрированными источниками энергии диффузионно-легированных сплавов из отходов чугунной дроби ДЧЛ 08 и ИЧХ28Н2 подтверждает целесообразность применения данной установки [11] для оплавления сплавов.

Анализ литературных данных, микроструктуры, микротвердости и химического состава в оплавленных сплавах из чугунной дроби ДЧЛ 08 и ИЧХ28Н2 позволил предложить схему контактного эвтектического плавления в диффузионно-легированных сплавах на основе металлических отходов производства при кратковременной высокотемпературной обработке концентрированными источниками энергии [12]. Для описания данного эффекта автором были сделаны некоторые упрощения. В исходном состоянии диффузионно-легированный сплав из металлических отходов производства представляет собой биметаллический материал, состоящий из тугоплавкой боридной оболочки и металлического ядра с более низкой по сравнению с оболочкой температурой плавления.

После оплавления концентрированными источниками энергии в структуре диффузионно-легированных сплавов могут присутствовать локальные участки с эвтектической структурой между тугоплавкой оболочкой и металлическим ядром; прослойки с эвтектической структурой различной толщины между тугоплавкой оболочкой и металлическим ядром; ядро с эвтектической структурой со сплошными либо фрагментарными участками тугоплавкой оболочки на поверхности.

Регулируя интенсивность влияния (температуру) и продолжительность нахождения в зоне обработки диффузионно-легированных металлических материалов, можно получать диффузионно-легированные сплавы с различной концентрацией эвтектических составляющих в структуре.

Наплавка ТВЧ диффузионно-легированного сплава из чугунной дроби ИЧХ28Н2 (рис. 2) без предварительного оплавления, визуально и с помощью микроанализа подтверждает отсутствие полного сплавления наплавочного сплава с основой. Зафиксированы локальные области, в которых начинается процесс частичного сплавления шихты и основного металла. ДюрOMETрический анализ нерасплавившихся частиц диффузионно-легированного сплава выявил высокую твердость сохранившегося диффузионного слоя (10000–11000 МПа), что подтверждает незавершенность диффузионных процессов во время изотермической выдержки при наплавке. За счет отсутствия сплавления при изотермической выдержке в покрытии присутствует значительная пористость ($\approx 50\%$), что также влияет на скорость формирования покрытия. Визуально и с помощью микроанализа при наплавке ТВЧ предварительно оплавленного диффузионно-легированного сплава фиксируется полное расплавление шихтового материала.

Технико-экономическая целесообразность проведения процесса предварительной кратковременной высокотемпературной обработки концентрированными источниками энергии диффузионно-легирован-

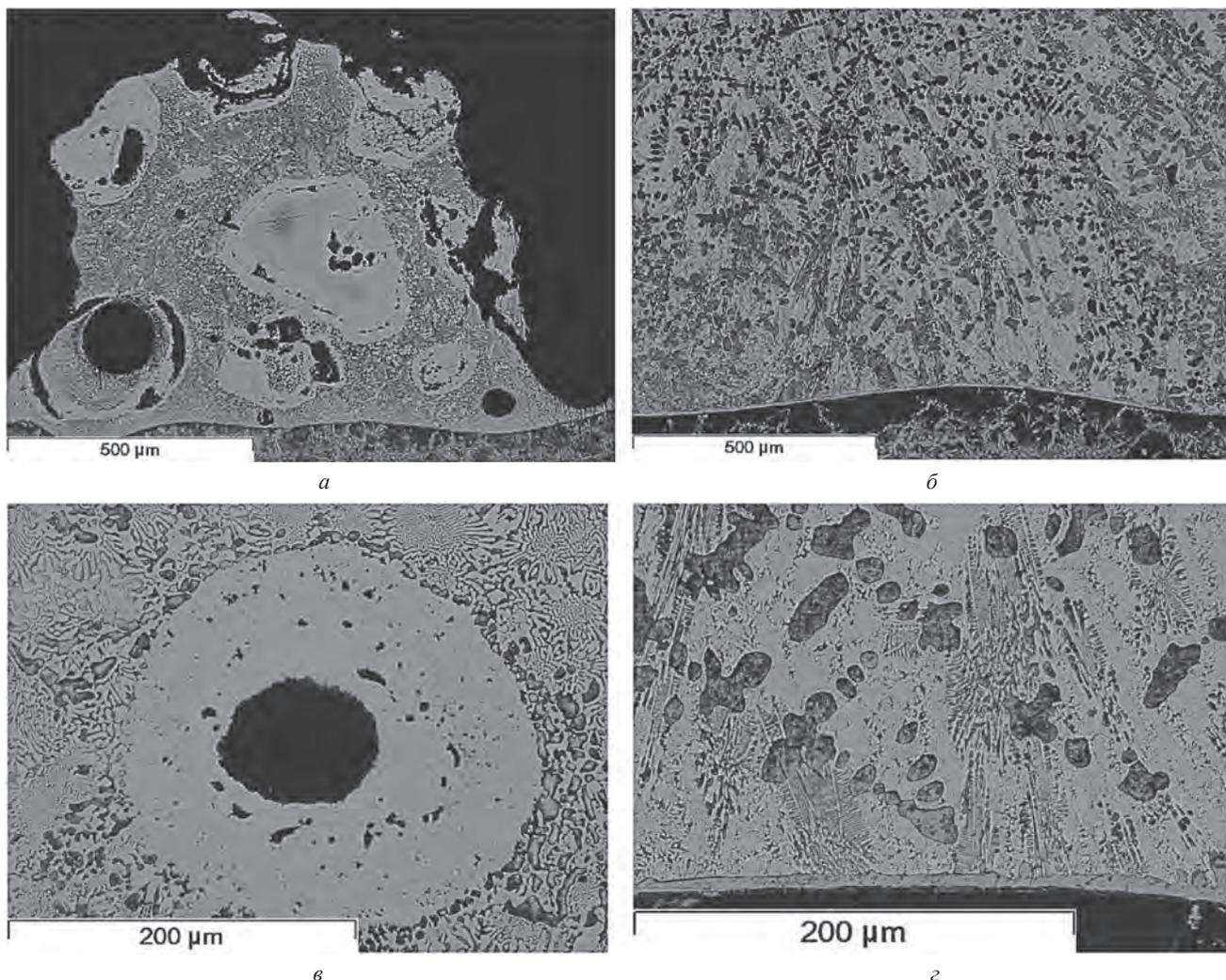


Рис. 2. Микроструктуры защитных покрытий из диффузионно-легированной дроби ИЧХ28Н2 до (а, в) и после (б, г) кратковременной высокотемпературной обработки концентрированными источниками энергии

ных сплавов перед индукционной наплавкой ТВЧ подтверждена расчетами [18]. Установлено, что суммарное значение затраченной энергии при получении защитного покрытия из 1 кг диффузионно-легированных сплавов на основе дроби ДЧЛ 08 и ИЧХ28Н2 без предварительного оплавления составляет 16,67 кВт, а с предварительным оплавлением – 15,46–15,92 кВт, что на 4,5–7,2% ниже. Таким образом, энергозатраты, использованные для предварительного оплавления диффузионно-легированных сплавов из отходов дроби ДЧЛ 08 и ИЧХ28Н2, снижают общие энергозатраты при получении защитного покрытия индукционной наплавкой токами высокой частоты.

Выводы

1. Создан новый тип диффузионно-легированных сплавов из металлических отходов производства с пониженной температурой плавления, состоящий из металлического ядра и диффузионной эвтектической оболочки. Технология получения данного сплава включает предварительное диффузионное легирование металлических отходов производства в подвижной порошковой насыщающей смеси и последующую кратковременную обработку концентрированными источниками энергии. Наличие эвтектических структур в диффузионно-легированных сплавах после кратковременной обработки концентрированными источниками энергии объясняется образованием локальных жидкометаллических эвтектических участков на границе металлическое ядро – диффузионный слой за счет эффекта контактного эвтектического плавления.

2. Описана схема образования эвтектических структур в диффузионно-легированных сплавах после кратковременной высокотемпературной обработки концентрированными источниками энергии. Предварительная кратковременная высокотемпературная обработка концентрированными источниками энер-

гии в виде электрической дуги между графитовыми электродами позволяет получить в диффузионно-легированных сплавах за счет эффекта контактного эвтектического плавления локальные участки с эвтектической структурой либо сплошную эвтектическую прослойку между металлическим ядром и тугоплавкой боридной оболочкой. Наличие эвтектических структур в сплаве приводит к снижению температуры плавления, а, следовательно, и времени формирования износостойкого покрытия индукционной наплавкой токами высокой частоты.

3. Уточнена и усовершенствована технология получения диффузионно-легированных сплавов для индукционной наплавки из металлических отходов производства. Разработано и запатентовано оборудование для диффузионного легирования металлических отходов производства в подвижной порошковой насыщающей среде и для кратковременной обработки концентрированными источниками энергии. Данная технология позволяет формировать износостойкие покрытия толщиной 1,5–2,0 мм с минимальной (1–1,5%) пористостью и твердостью 850–950 HV из диффузионно-легированных металлических отходов производства индукционной наплавкой токами высокой частоты. Установлено, что суммарное снижение энергозатрат при формировании износостойких покрытий, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания, индукционной наплавкой токами высокой частоты из диффузионно-легированных металлических отходов производства после комплексной обработки, составит более 7%.

Литература

1. **Пантелеенко Ф. И.** Самофлюсующиеся диффузионно-легированные порошки на железной основе и защитные покрытия на них. Мн.: УП «Технопринт», 2001. 300 с.
2. **Ворошнин Л. Г.** Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО / Л. Г. Ворошнин, Ф. И. Пантелеенко, В. М. Константинов. 2-е изд., перераб. и доп. Минск: ФТИ; Новополоцк: ПГУ, 2001. 148 с.
3. **Константинов В. М.** Диффузионно-легированные сплавы для защитных покрытий: дис. ... д-ра техн. наук. Минск, 2008. 474 с.
4. **Девойно О. Г.** Лазерная обработка износостойких газотермических композиционных покрытий / О. Г. Девойно, А. С. Калинин, М. А. Кардопалова. Минск: БНТУ, 2011. 161 с.
5. **Пантелеенко Е. Ф.** Самофлюсующиеся композиционные порошки из борированных отходов стальной и чугунной дроби для магнитно-электрического упрочнения и восстановления деталей машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Минск, 2009. 22 с.
6. **Дашкевич В. Г.** Поверхностно-легированная стальная проволока для наплавки деталей машин, работающих в условиях абразивного изнашивания: автореф. канд. техн. наук. Минск, 2009. 23 с.
7. **Пантелеенко Ф. И.** Восстановление деталей машин: Справ. / Ф. И. Пантелеенко [и др.]; под общ. ред. В. П. Иванова. М.: Машиностроение, 2003. 672 с.
8. **Ткачев В. Н.** Индукционная наплавка твердых сплавов / В. Н. Ткачев [и др.]; под общ. ред. В. Н. Ткачева. М.: Машиностроение, 1970. 183 с.
9. **Вращающаяся** электрическая печь для химико-термической обработки сыпучего материала: пат. 15412 Респ. Беларусь, МПК7 F27B 7/14 / В. М. Константинов, О. П. Штемпель, В. Г. Щербаков; заявитель Белорусский национальный технический университет. № а 20091415; заявл. 05.10.09; опубл. 28.02.12 // Афіцыйны бюл. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. 2012. № 1. С. 143.
10. **Константинов В. М.** Многофункциональная научно-исследовательская установка индукционного нагрева сталей и сплавов / В. М. Константинов и [др.] // *Металлургия: республ. межвед. сб. науч. тр.* Минск: БНТУ, 2015. Вып. 36. С. 255–262.
11. **Установка** для обработки металлического порошка: пат. 10051 Респ. Беларусь, МПК В 22F 1/00 / В. М. Константинов, В. Г. Дашкевич, В. Г. Щербаков; заявитель Белорусский национальный технический университет. № u 20130804; заявл. 08.10.2013; опубл. 30.04.2014 // Афіцыйны бюл. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. 2014. № 2. С. 136.
12. **Щербаков В. Г.** Некоторые особенности формирования износостойких покрытий индукционной наплавкой диффузионно-легированными сплавами из металлических отходов производства // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: Сб. науч. тр. В 3-х кн. Кн. 1. Материаловедение.* Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2016. С. 278–286.
13. **Щербаков В. Г.** Получение диффузионно-легированных сплавов в подвижных порошковых средах из металлических отходов производства для индукционной наплавки и пути повышения их технологических свойств // *Литейные процессы.* 2014. № 13. С. 90–98.
14. **Щербаков В. Г.** Снижение температуры плавления диффузионно-легированных сплавов для индукционной наплавки // *Литье и металлургия.* 2014. № 1 (74). С. 97–100.
15. **Щербаков В. Г.** Оплавление диффузионно-легированных сплавов из металлических дискретных металлоотходов для получения защитных покрытий ТВЧ // *Литейные процессы.* 2015. № 14. С. 15–23.
16. **Сараговкин Д. Д.** Дендритная кристаллизация // *ГНТИЛ по черной и цветной металлургии,* 1957. 129 с.
17. **Залкин В. М.** Природа эвтектических сплавов и эффект контактного плавления // М.: *Металлургия,* 1987. 152 с.
18. **Щербаков В. Г.** Предварительная высокотемпературная обработка диффузионно-легированных сплавов для индукционной наплавки // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: Сб. науч. тр. В 3-х кн. Кн. 2. Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки.* Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2015. С. 341–348.

References

1. **Panteleenko F. I.** *Samoflujusujushhiesja diffuzionno-legirovannye poroshki na zheleznoj osnove i zashhitnye pokrytija na nih* [Self-fluxing diffusion-alloyed iron-based powders and the protective coating on them]. Minsk, Tehnoprnt Publ., 2001, 300 p.

2. **Voroshnin L. G., Panteleenko F. I., Konstantinov V. M.** *Teorija i praktika poluchenija zashhitnyh pokrytij s pomoshh'ju HTO* [Theory and practice of obtaining protective coatings via XTO]. Minsk, 2-e izd., pererab. i dop. Minsk, FTI; Novopolock, PGU, 2001, 148 p.
3. **Konstantinov V. M.** *Diffuzionno-legirovannye splavy dlja zashhitnyh pokrytij*. Diss. dokt. techn. nauk [Diffusion-alloyed alloys for protective coatings. Dr. techn. nauk]. Minsk, 2008, 474 p.
4. **Devojno O. G., Kalinichenko A. S., Kardopalova M. A.** *Lazernaja obrabotka iznosostojkih gazotermicheskikh kompozicionnyh pokrytij* [Laser treatment of hot-gas wear-resistant composite coatings]. Minsk, BNTU Publ., 2011, 161 p.
5. **Panteleenko E. F.** *Samofljusujushhiesja kompozicionnye poroshki iz borirovannyh othodov stal'noj i chugunnoj drobi dlja magnitno-jelektricheskogo uprochnenija i vosstanovlenija detalej mashin*. Autoref. Diss. kand. techn. nauk [Self-fluxing composite powders of the borated waste steel and iron fractions for magnetic-electric hardening and restoring of machine parts]. Minsk, BNTU Publ., 2009, 22 p.
6. **Dashkevich V. G.** *Poverhnostno-legirovannaja stal'naja provoloka dlja naplavki detalej mashin, rabotajushhih v uslovijah abrazivnogo iznashivaniya*. Autoref. Diss. kand. techn. nauk [Surface-alloyed steel wire for hardfacing machine parts, working in conditions of abrasive wear]. Minsk, BNTU Publ., 2009, 23 p.
7. **Panteleenko F. I.** *Vosstanovlenie detalej mashin* [Restoration of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003, 672 p.
8. **Tkachev V. N.** *Indukcionnaja naplavka tverdyh splavov* [Induction hardfacing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970, 183 p.
9. **Konstantinov V. M., Shtempel' O. P., Shherbakov V. G.** *Vrashhajushhajasja jelektricheskaja pech' dlja himiko-termicheskoj obrabotki sypučego materiala* [Rotating electric oven for chemical and thermal processing of bulk material]: pat. 15412 Resp. Belarus', MPK7 F27B 7/14 /; zajavitel' Belorusskij nacional'nyj tehničeskij universitet. – № a 20091415; zajavl. 05.10.09; opubl. 28.02.12. Aficyjny bjul. / Nac. centr intjelektual. ulasnasci. 2012. no. 1. S. 143.
10. **Konstantinov V. M.** *Mnogofunkcional'naja nauchno-issledovatel'skaja ustanovka indukcionnogo nagreva stalej i splavov* [Multifunctional research installation of induction heating of steels and alloys]. Minsk, BNTU Publ., 2015, pp. 255–262.
11. **Konstantinov V. M., Dashkevich V. G., Shherbakov V. G.** *Ustanovka dlja obrabotki metallicheskogo poroshka* [Apparatus for processing a metal powder]: pat. № 10051 Resp. Belarus', MPK B 22F 1/00 /; zajavitel' Belorusskij nacional'nyj tehničeskij universitet. – № u 20130804; zajavl. 08.10.2013; opubl. 30.04.2014. Aficyjny bjul. Nac. centr intjelektual. ulasnasci. 2014. № 2. S. 136.
12. **Shherbakov V. G.** *Nekotorye osobennosti formirovanija iznosostojkih pokrytij indukcionnoj naplavkoj diffuzionno-legirovannymi splavami iz metallicheskih othodov proizvodstva. Sovremennye metody i tehnologii sozdaniya i obrabotki materialov = Some features of formation of wear-resistant coatings induction welding diffusion-alloyed alloys of metal waste. Modern methods and technologies of creation and processing of materials*. Minsk, FTI NAN Belarusi Publ., 2016, pp. 278–286.
13. **Shherbakov V. G.** *Poluchenie diffuzionno-legirovannyh splavov v podvizhnyh poroshkovyh sredah iz metallicheskih othodov proizvodstva dlja indukcionnoj naplavki i puti povyshenija ih tehnologicheskikh svojstv* [Obtaining diffusion-alloyed alloy powder in mobile environments from metal waste products for induction welding and ways to improve their processing properties]. *Litejnye processy = Foundry processes*, 2014, no. 13, pp. 90–98.
14. **Shherbakov V. G.** *Snizhenie temperatury plavljenija diffuzionno-legirovannyh splavov dlja indukcionnoj naplavki* [Reducing the melting point of the diffusion-alloyed alloys for induction welding]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2014, no. 1 (74), pp. 97–100.
15. **Shherbakov V. G.** *Oplavlenie diffuzionno-legirovannyh splavov iz metallicheskih diskretnyh metalloothodov dlja poluchenija zashhitnyh pokrytij TVCh* [Melting diffusion-alloyed alloys of metal of metal to produce discrete coatings HDTV]. *Litejnye processy = Foundry processes*, 2015, no. 14, pp. 15–23.
16. **Saratovkin D. D.** *Dendritnaja kristallizacija* [Dendritic crystallization]. GNTIL po chernoy i cvetnoy metallurgii, 1957, 129 p.
17. **Zalkin V. M.** *Priroda jevtekticheskikh splavov i jeffekt kontaktnogo plavljenija* [Nature of eutectic alloys and the effect of contact fusion]. Moscow, Metallurgija Publ., 1987, 152 p.
18. **Shherbakov V. G.** *Predvaritel'naja vysokotemperaturnaja obrabotka diffuzionno-legirovannyh splavov dlja indukcionnoj naplavki*. *Sovremennye metody i tehnologii sozdaniya i obrabotki materialov = Pre-treatment of high-diffusion-alloyed alloys for induction welding. Modern methods and technology of materials and processing*. Minsk, FTI NAN Belarusi Publ., 2015, pp. 341–348.