

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ОПЛАВЛЕНИЯ ДИФфуЗИОННО-ЛЕГИРОВАННЫХ НАПЛАВОЧНЫХ СПЛАВОВ НА ЖЕЛЕЗНОЙ ОСНОВЕ

<sup>1</sup>В.Г. Дашкевич, <sup>1</sup>В.Г. Щербаков

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Беларусь

*Изучены и систематизированы особенности плавления боридных диффузионных оболочек на стальных проволоках и чугунных порошках при обработке концентрированным источником энергии. Проанализирован механизм плавления чугунного борированного порошка и структурообразование эвтектического покрытия при индукционной наплавке порошков, подвергнутых предварительному оплавлению. Отмечена целесообразность и эффективность применения предварительного оплавления порошковых диффузионно легированных сплавов с боридными слоями имеющими железную основу для последующей ТВЧ наплавки.*

**Ключевые слова:** контактное эвтектическое плавление, индукционная наплавка, температура плавления, диффузионно-легированные порошки

## INVESTIGATION OF THE MECHANISM OF PREMELTING OF DIFFUSIONALLY ALLOYED ALLOYING ALLOYS ON THE IRON BASIS

<sup>1</sup>V.G. Dashkevish, <sup>1</sup>V.G. Shcherbakou

<sup>1</sup>Belarusian National Technical University,  
Minsk, Republic of Belarus

*Some aspects of boride diffusively-alloyed shells on steel wires and cast-iron powder materials as well as their treatment using concentrated energy sources are investigated and analyzed in the present article. The melting mechanism of boride cast-iron powder and the structure formation of eutectic coating when using induction hard-facing processes for preliminary fused powder mixtures are analyzed in the article. It is shown that it is available and efficient to use the technologies of preliminary fusion for diffusively-alloyed compounds with boride layers that have an iron base for further induction hard-facing.*

**Keywords:** a contact eutectic melting, induction hard-facing, melting point, diffusion alloying powders

**E-mail:** vm.konstantinov@bntu.by

Контактное эвтектическое плавление между различными материалами детально исследовано начиная с 1940-х годов Д.Д. Саратовкиным, П.А. Савинцевым, позже, В.М. Залкиным, Раджабалиевым Р., А.А. Ахкубековым [1–2]. Однако для систем многокомпонентных, имеющих переменный состав, в частности для диффузионных слоев полученных химико-термической обработкой углеродистых и легированных сталей и чугунов, имеются свои характерные особенности, которые в настоящее время полностью не изучены. Весьма интересным эффектом контактного эвтектического плавления представляется в разрезе снижения температуры плавления материалов, в частности для индукционной наплавки, из диффузионно-легированных сплавов на железной основе.

Индукционная наплавка токами высокой частоты (ТВЧ) является одним из распространенных методов упрочнения и восстановления деталей машин, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания [3]. По сравнению с другими методами упрочнения с использованием теплового воздействия (напыление, лазерное оплавление и др.), данный метод обладает рядом существенных преимуществ: низкие удельные энергозатраты, высокая производительность, и возможность использования в качестве упрочняющего материала металлические порошки различного размера и состава [4–5]. Ранее авторами [6–7] разработана и внедрена на производстве технология упрочнения и восстановления деталей машин с использованием диффузионно-легированных (ДЛ) сплавов. Однако ДЛ сплавы для упрочнения ТВЧ получили ограниченное распространение из-за специфики упрочнения по заданной технологии [3].

Как известно, при индукционной наплавке формирование защитного покрытия происходит за счет расплавления шихтового материала при нагреве от упрочняемой стальной основы [3]. Температура плавления наплавочного сплава должна быть ниже температуры плавления упрочняемой стали, поэтому наличие тугоплавких соединений в наплавляемом материале должно быть минимальным либо полностью отсутствовать (рис. 1 а). ДЛ сплавы из металлических отходов производства представляют собой композиционный порошок, состоящий из чугунного или стального ядра и тугоплавкой боридной оболочки (рис.1 б), сформировавшейся при борировании. Наличие данной тугоплавкой оболочки, в отличие от традиционных наплавочных сплавов, имеющих эвтектическое строение, отрицательно влияет на кинетику формирования защитного покрытия при наплавке ТВЧ. Выполненные ранее работы свидетельствуют, что для полного расплавления борированного чугунного порошка возникает необходимо

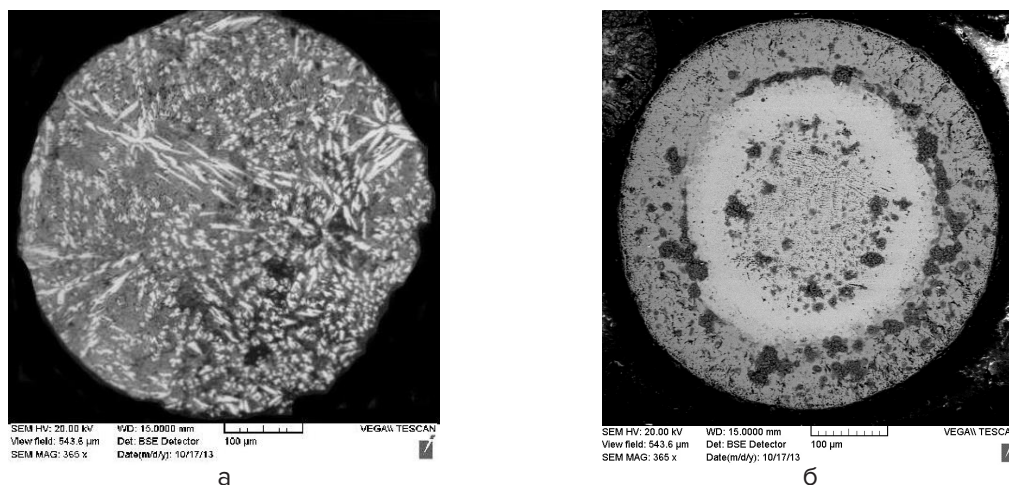


Рис. 1 Микроструктуры порошковых сплавов для наплавки  
 а — эвтектический наплавочный сплав ПР–Х4Г2Р4С2Ф; б — ДЛ-сплав  
 на основе чугунной дроби с боридной оболочкой 60...90 мкм

применять легкоплавкие составляющие в сплаве либо использовать многократный циклический нагрев [8].

Все это снижает эффективность индукционной наплавки борированных порошков. Одним из способов снижения температуры плавления диффузионно-легированных сплавов является предварительная кратковременная обработка концентрированными источниками энергии. Авторами выдвинута гипотеза о том, что при данной обработке в диффузионно-легированных сплавах на границе тугоплавкой боридной оболочки и металлического ядра за счет эффекта контактного эвтектического плавления происходит частичное оплавление боридного слоя в системе Fe-FeB-Fe<sub>2</sub>B и образование локальных областей легкоплавких боридных эвтектик ледебуритного типа. Данные разных авторов говорят о температуре плавления таких эвтектик в диапазоне 1150...1250 °C [9–10].

Ранее проведенными работами был исследован и описан один из возможных методов понижения температуры плавления ДЛ сплавов предварительной кратковременной высокотемпературной обработкой (электрическая дуга) [11–13]. Предложен вариант структурообразования в ДЛ сплавах при предварительной кратковременной высокотемпературной обработке. Рассмотрен механизм образования локальных жидкометаллических эвтектических участков на границе металлическое ядро – диффузионный слой и дальнейший их рост за счет растворения приграничных участков, как металлического ядра, так и тугоплавкой боридной оболочки. Были изучены некоторые аспекты формирования наплавленного слоя из предварительно опрарвленных борированных чугуновых порошков.

Аналогичные работы были выполнены для диффузионно-легированной стальной проволоки [14]. Отмечены некоторые особенности влияния структуры и фазового состава диффузионного слоя на растворение при формировании защитных покрытий электродуговой наплавкой боромарганцированной проволоки. Установлено, что процесс растворения начинается с фазы (Fe, Me)<sub>2</sub>B по причине более низкой температуры плавления и направления теплового потока. На границе раздела «диффузионный слой – основа» за счет растворения боридной оболочки с внутренней стороны слоя образуется область легкоплавкой эвтектики. Происходит контактное эвтектическое плавление. Происходит активная диффузия легирующих элементов между твердой и жидкой фазами. Далее бор постепенно растворяясь, способствует повышению твердости и образованию пересыщенного твердого раствора, который после охлаждения формирует закалочные структуры на торце проволоки [14]. Также отмечено, что временной интервал плавления диффузионно-легированной проволоки и время существования жидкой фазы на границе раздела «диффузионный слой – стальная сердцевина» составляет примерно 0,02...0,05 с. Следовательно, скорость, с которой протекает процесс плавления диффузионно-легированной проволоки, достаточна для активного растворения диффузионного слоя. Переходная зона, которая имеет форму «клина», расширяющегося при приближении к капле, обогащается включениями избыточных фаз в виде боридов (Fe, Me)<sub>2</sub>B правильной геометрической формы, которые отделившись от диффузионного слоя постепенно растворяются. В зоне «клина» бор, постепенно растворяясь, способствует образованию пересыщенного твердого раствора, который после охлаждения формирует закалочные структуры на проволоке. Таким образом, предполагается, что плавление диффузионно-легированной проволоки, характеризуется твердофазной диффузией элементов из диффузионного слоя в железную сердцевину, образованием жидкой фазы за счет контактного эвтектического плавления и ускоренного растворения диффузионного слоя, а также дополнительной жидкофазной гомогенизацией расплава (рис. 2).

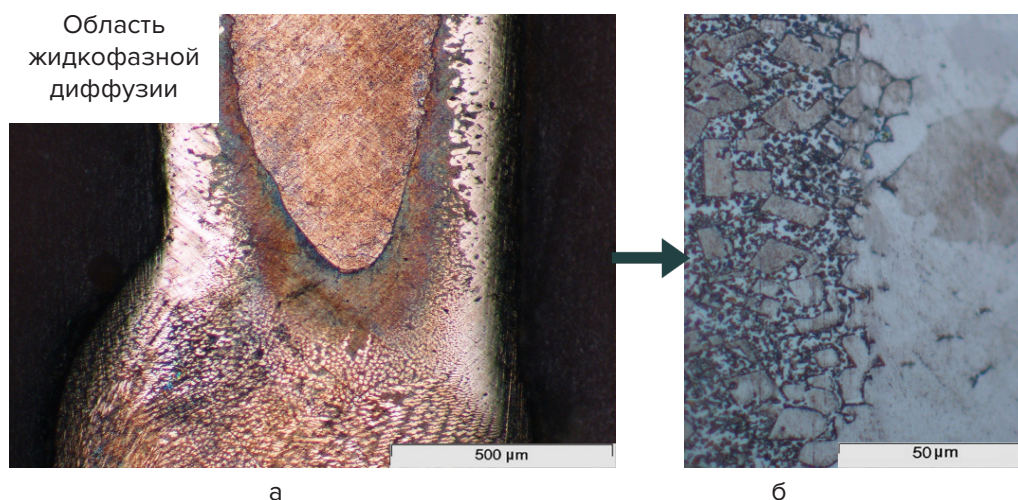


Рис. 2 Микроструктура борохромированной углеродистой проволоки  
 а — фрагмент проволоки, охлажденный в момент оплавления;  
 б — участок диффузионного слоя при контактном эвтектическом плавлении

Накопленный авторами за последние годы экспериментальный материал потребовал систематизации и обобщения.

Механизм оплавления ДЛ порошка имеет общие черты с оплавлением борохромированной проволоки, однако есть некоторые существенные особенности. В исходном состоянии сплав представляет собой композиционный порошок с металлическим ядром и боридной оболочкой (рис. 3 а). При кратковременной обработке концентрированными источниками энергии, за счет эффекта контактного эвтектического плавления, на границе между тугоплавкой боридной оболочкой и металлическим ядром формируется эвтектическая структура (рис. 3 б).

Известно, что эффект контактного эвтектического плавления проявляется при соответствующем соотношении масс соприкасающихся кристаллов, в нашем случае кристаллов  $Fe_2B$  и кристаллов твердого раствора на основе железе. Однако при борохромации высокоуглеродистых сталей и чугунов неизбежно образование фазы в виде бороцементита  $Fe_3(B,C)$  как результат оттеснения углерода растущими боридными иглами. Возникшая прослойка разделяет поверхности кристаллитов этой системы, в результате эвтектическое плавление может уже проходить в системах  $Fe_2B-Fe_3(B,C)$  или  $Fe_3(B,C)-Fe$ . При практически одинаковых температурах плавления эвтектики в обеих системах установить систему, инициирующую плавление, экспериментально не представляется возможным.

Анализ экспериментальных результатов позволяет утверждать, что, регулируя толщину диффузионного слоя, температурно-временные параметры диффузионного легирования и интенсивность оплавления при кратковременной обработке концентрированными источниками энергии, можно влиять на структурообразование в каждой гранулометрически самостоятельной частице сплава. Время образования эвтектики на границе раздела фаз по нашей оценке составляет доли секунды, разность температур плавления низкобористой фазы  $Fe_2B$  и эвтектики в системе  $Fe_2B-Fe$  составляет около 300...450 °С. В таких условиях целесообразным является именно кратковременная высокотемпературная обработка, которая позволяет обеспечить лишь частичное оплавление боридной оболочки. В структуре диффузионно-легированного сплава после обработки могут присутствовать локальные области с эвтектической структурой либо сплошная область с эвтектической структурой и частично сохранившейся тугоплавкой оболочкой (рис. 3 в). Установлено изменение распреде-



ления микротвердости по сечению оплавленного сплава: на поверхности частицы она снизилась с 14 000...16 0000 МПа до 8 000...9 000 МПа, а микротвердость ядра незначительно возросла с 4 000...6 000 до 6500...7500МПа [11, 13].

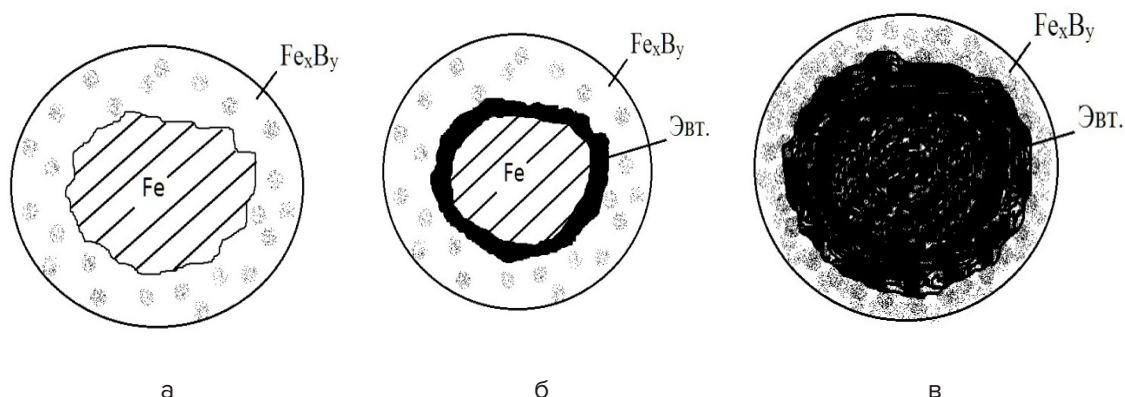


Рис. 3 Концептуальная схема механизма контактного эвтектического плавления в ДЛ сплавах при кратковременной обработке концентрированными источниками энергии  
 а — исходный борированный порошок; б — частичное оплавление, формирование в переходной зоне ледебуритной эвтектики; в — эвтектическое растворение ядра стальной или чугунной частицы

Как известно, сложный комплекс явлений, происходящих при индукционной наплавке, можно разделить на следующие этапы [3]: 1 — нагрев основного металла до температуры плавления шихты, 2 — расплавление флюсов, 3 — взаимодействие основного металла, флюсов и твердого сплава между собой и атмосферой, 4 — нагрев и расплавление металлической части шихты, 5 — формирование наплавленного слоя в период кристаллизации, 6 — охлаждение в верхнем интервале температур, сопровождаемое диффузионными процессами, 7 — охлаждение в нижнем интервале температур, когда диффузионные процессы практически не происходят.

При формировании защитных покрытий из диффузионно-легированных сплавов на основе стальной и чугунной дробы, подвергнутых предварительному оплавлению, будут протекать как процессы, характерные для индукционной наплавки, так и отдельные процессы структурообразования, возникшие из-за предварительной высокотемпературной обработки и приведшие к образованию эвтектических участков в сплаве с пониженной температурой плавления. Эксперименты показали, что при расплавлении предварительно оплавленных частиц наплавочного порошка в процессе индукционной наплавки наличие эвтектических участков способствует более быстрому формированию жидкого расплава. Это, в свою очередь, обеспечивает получение качественного наплавленного слоя (рис. 4).

Таким образом, влияние предварительной кратковременной высокотемпературной обработки концентрированными источниками энергии на структурообразование защитных покрытий индукционной наплавкой ТВЧ заключается в сокращении стадии расплавления металла шихты при формировании покрытия за счет образования из-за эффекта контактного эвтектического плавления, эвтектических структур с пониженной температурой плавления вместо тугоплавких слоев на основе боридов железа.

### Заключение

1. Изучены и систематизированы особенности плавления боридных диффузионных оболочек на стальных проволоках и чугунных порошках при обработке концен-

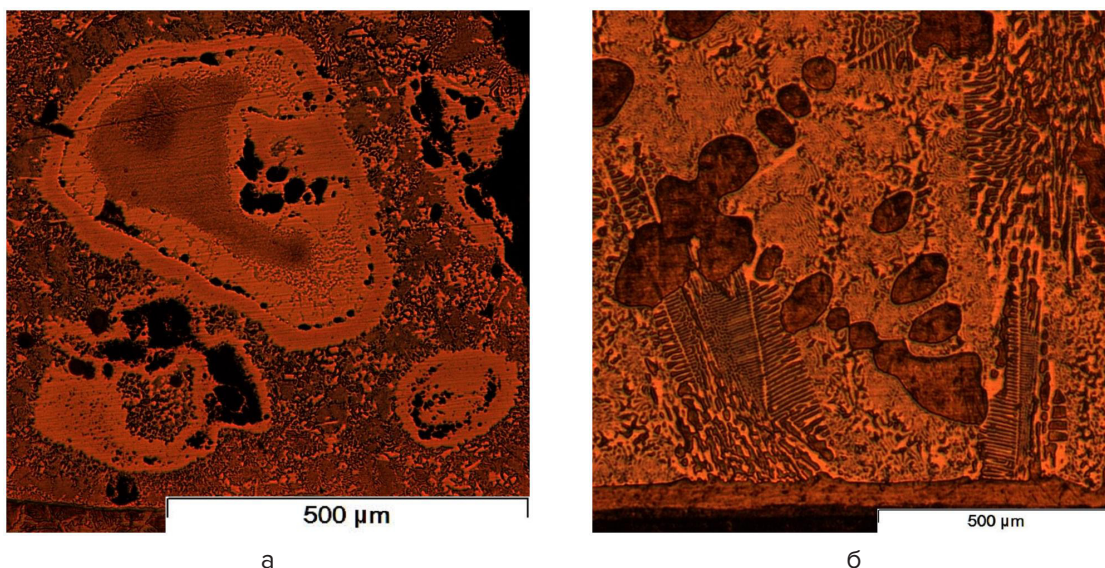


Рис. 4 Микроструктуры покрытий после наплавки ТВЧ борированной чугунной дроби  
 а — борированная дробь ИЧХ28Н2 без оплавления; б — борированная дробь ИЧХ28Н2 после кратковременной высокотемпературной обработки концентрированным источником энергии

трированным источником энергии. Выявлено подобие механизма оплавления с образованием эвтектических ледебуритных структур в переходной зоне между боридным слоем и стальным ядром для стальной проволоки и чугунного порошка. Определяющим для реализации механизма оплавления является существующая разница температур плавления боридной оболочки в целом или боридов  $Fe_2B$  и температуры образования боридной эвтектики, которая составляет порядка 300...400 °С. Существенное значение играет наличие бороцементита в чугунном порошке. Характер и интенсивность теплового воздействия в процессе оплавления, при прочих равных условиях, перестает доминировать и не играет определяющей роли. Установлено, что в первую очередь, происходит образование эвтектических структур в переходной зоне.

2. Проанализирован механизм плавления чугунного борированного порошка и структурообразование эвтектического покрытия при индукционной наплавке порошков подвергнутых предварительному оплавлению. Наличие локальных участков с эвтектической структурой, сформировавшейся при кратковременной высокотемпературной обработке концентрированным источником энергии, повышает скорость формирования жидкой фазы в процессе наплавки и стимулирует распространение процесса на всю толщину слоя шихты, что, в свою очередь, способствует сокращению расхода дорогих и дефицитных борсодержащих флюсов при наплавке.

3. Эффективность использования диффузионно легированных сплавов на железной основе с боридными слоями для индукционной наплавки может быть существенно повышена при условии реализации комплексной технологии упрочнения, включающей диффузионное легирование в порошковых насыщающих средах и последующее оплавление, например кратковременным высокотемпературным воздействием электрической дуги. В результате контактного эвтектического плавления в структуре диффузионно-легированных сплавов формируются локальные либо сплошные эвтектические зоны, имеющие меньшую, по сравнению с тугоплавким поверхностным слоем, температуру плавления. Наличие данных областей с эвтектической структурой интенсифицирует стадию расплавления наплавочного сплава и снижает энергозатраты при наплавке ТВЧ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Саратовкин, Д. Д. Дендритная кристаллизация / Д. Д. Саратовкин — М.: Metallurgizdat, 1957. — 128 с.
2. Залкин, В. М. Природа эвтектических сплавов и эффект контактного плавления / В. М. Залкин // М.: Metallurgiya, 1987. — 152 с.
3. Ткачев, В. Н. Индукционная наплавка твердых сплавов / В. Н. Ткачев [и др.]; под общ. ред. В. Н. Ткачева. М.: Машиностроение, 1970. — 183 с.
4. Пантелеенко, Ф. И. Восстановление деталей машин: Справ. / Ф. И. Пантелеенко [и др.]; под общ. ред. В. П. Иванова. М.: Машиностроение, 2003. — 672 с.
5. Пантелеенко, Ф. И. Самофлюсующиеся диффузионно-легированные порошки на железной основе и защитные покрытия на них. Мн.: УП «Технопринт», 2001. — 300 с.
6. 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.
7. Константинов, В. М. Теоретические и технологические аспекты создания экономно-легированных защитных слоев из диффузионно-легированных сплавов // Вестник БНТУ, 2007, №2. — С. 29–37.
8. Константинов, В. М. Повышение износостойкости при упрочнении плужных лемехов диффузионно-легированной чугушной стружкой / В. М. Константинов, Ф. И. Пантелеенко, С. Н. Жабуренок // Ремонт, восстановление, модернизация, 2003, №5. — С. 17–20.
9. Глухов, В.П. Боридные покрытия на железе и сталях / В.П. Глухов. — Киев: Наукова Думка, 1970. — 208 с.
10. Крукович, М. Г. Пластичность борированных слоев / М. Г. Крукович, Б. А. Прусаков, И. Г. Сизов. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. — 384 с.
11. Щербаков, В.Г. Предварительная высокотемпературная обработка диффузионно-легированных сплавов для индукционной наплавки / В.Г. Щербаков // 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.
12. Щербаков, В.Г. Некоторые особенности формирования износостойких покрытий индукционной наплавкой диффузионно-легированными сплавами из металлических отходов производства / В.Г. Щербаков // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: Сб. науч. тр. В 3 кн. Кн. 1. Материаловедение. — Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2016. — С. 278–286.
13. Щербаков, В. Г. Диффузионно-легированные сплавы из металлических отходов производства с пониженной температурой плавления для формирования износостойких покрытий индукционной наплавкой токами высокой частоты / В.Г. Щербаков // Литье и металлургия. 2016. №4 (85). — С. 89–95.
14. Дашкевич, В. Г. Материаловедческие и технологические аспекты получения термообрабатываемых наплавленных слоев из диффузионно-легированной проволоки / В. Г. Дашкевич // Литье и металлургия, 2009, №1. — С. 169–175.

## REFERENCES

1. Saratovkin D. D. Dendritnaya kristallizatsiya [Dendritic crystallization]. Moscow, Metallurgizdat, 1957, 129 p. (in Russian)
2. Zalkin V. M. Priroda evtekticheskikh splavov i effekt kontaktnogo plavleniya [Nature of eutectic alloys and the effect of contact melting]. Moscow, Metallurgiya, 1987, 152 p. (in Russian)
3. Tkachev V. N. Indukcionnaya naplavka tverdykh splavov [Induction hardfacing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970, 183 p. (in Russian)

4. Panteleenko F. I. Vosstanovlenie detalej mashin [Restoration of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003, 672 p. (in Russian)
5. Panteleenko F. I. Samofljusujushhiesja 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, Tehnoprint Publ., 2001, 300 p. (in Russian)
6. Voroshnin L. G., Panteleenko F. I., Konstantinov V. M. Teorija i praktika poluchenija zashhitnykh pokrytij s pomoshh'ju HTO [Theory and practice of obtaining protective coatings via HTT]. Minsk, 2-e izd., pererab. i dop. Minsk, FTI; Novopolock, PGU, 2001, 148 p. (in Russian)
7. Konstantinov V.M. Teoreticheskiye i tekhnologicheskiye aspekty sozdaniya ekonomno-legirovannykh zashchitnykh sloyev iz diffuzionno-legirovannykh splavov [Theoretical and technological aspects of creation of economically-doped protective layers from diffusion-alloyed alloys] Vestnik BNTU, 2007, no. 2, pp. 29–37. (in Russian)
8. Konstantinov V.M., Panteleenko F.I., Zhaburenok S.N. Povysheniye iznosostoykosti pri uprochnenii pluzhnykh lemekhov diffuzionno-legirovannoy chugunnoy struzhkoy [Increase of wear resistance in hardening of plowshares with diffusion-alloyed cast-iron shavings]. Remont, vosstanovleniye, modernizatsiya, 2003, no. 5, pp. 17–20. (in Russian)
9. Glukhov V.P. Boridnyye pokrytiya na zheleze i stalyakh [Boride coatings on iron and steel / V.P. Glukhov]. Kiev, Naukova Dumka, 1970, 208 p.
10. Krukovich MG, Prusakov IG, Sizov B.A. Plastichnost' borirovannykh sloyev [The plasticity of borated layers]. Moscow, FIZMATLIT, 2010, 384 p.
11. Shherbakov V. G. Predvaritel'naja vysokotemperaturnaja obrabotka diffuzionno-legirovannykh splavov dlja indukcionnoj naplavki [Pre-treatment of high-diffusion-alloyed alloys for induction welding]. Sovremennyye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov [Advanced Methods and Technologies of Materials Development and Processing]. collection of scientific papers, Minsk: FTI NAN Belarusi, 2015, pp. 341–348. (in Russian)
12. Shherbakov V. G. Nekotory'e osobennosti formirovaniia iznosostoikikh pokry'tii` indukcionnoi` naplavkoï` diffuzionno-legirovanny`mi splavami iz metallicheskikh othodov proizvodstva [Some features of the formation of wear-resistant coatings by induction welding of diffusion-alloyed alloys from metal waste products]. Sovremennyye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov [Advanced Methods and Technologies of Materials Development and Processing]. collection of scientific papers, Minsk: FTI NAN Belarusi, 2016, pp. 278–286. (in Russian)
13. Shherbakov V. G. Diffuzionno-legirovannyye splavy iz metallicheskikh otkhodov proizvodstva s ponizhennoi temperaturoi plavlenia dlja formirovaniia iznosostoikikh pokrytii indukcionnoi naplavkoï tokami vysokoi chastoty [Diffusively alloyed compounds made of metal discard with a reduced melting temperature for obtaining wear resistant coating using induction hard-facing technologies]. Lit'e i metallurgija [Foundry production and metallurgy], 2016, no. 4 (85), pp. 89–95. (in Russian)
14. Dashkevich, V.G. Materialovedcheskiye i tekhnologicheskiye aspekty polucheniya termoobratyvyvayemykh naplavlennykh sloyev iz diffuzionno-legirovannoy provoloki [Material and technological aspects of obtaining heat-treated welded layers from diffusion-alloyed wire] / Casting and Metallurgy, 2009, no. 1, pp. 169–175. (in Russian)

Статья поступила в редакцию 24.04.17