

кий отвод стружки, а также предотвращает ее налипание на режущие кромки и образование лунок износа, что дает возможность увеличить подачу и скорость резания. Упрочнение наладок дало повышение микротвердости поверхности инструмента и увеличение ресурса работы, замедлив развитие разгарных трещин, изнашивание и смятие поверхности пуансона и матрицы.

На основании данных, полученных в ходе производственных испытаний, следует, что в результате диффузионного упрочнения улучшаются эксплуатационные свойства инструмента, что обеспечивает повышение его стойкости в 2–3,5 раза.

*УДК 621.762*

**В.Г. ЩЕРБАКОВ (БНТУ)**

**ЭФФЕКТ КОНТАКТНОГО ЭВТЕКТИЧЕСКОГО  
ПЛАВЛЕНИЯ В ДИФфуЗИОННО-ЛЕГИРОВАННЫХ  
СПЛАВАХ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОТХОДОВ  
ПРОИЗВОДСТВА ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОЙ  
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ОБРАБОТКЕ  
КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ**

**Введение.** Технология получения диффузионно-легированных сплавов из металлических отходов производства для упрочнения и восстановления деталей машин получила широкое распространение благодаря работам авторов [1–20]. Диффузионно-легированные сплавы стали альтернативной заменой дорогостоящих наплавочных сплавов на никелевой основе, разработанных более 50 лет назад. Данные сплавы применяют для формирования износостойких покрытий на деталях, работающих в условиях различных видов изнашивания.

Основной проблемой при формировании износостойких покрытий из диффузионно-легированных сплавов индукционной наплавкой токами высокой частоты является относительно высокая температура плавления данных сплавов. Наличие тугоплавкой боридной оболочки  $Fe_2B$  и  $FeB$  с температурами плавления 1389 °С и 1540 °С [21] соответственно ухудшает технологические свойства

наплавочного сплава. Автором ранее исследованы некоторые пути снижения температуры плавления диффузионно-легированных сплавов из металлических отходов производства [22–26]. Следует учитывать, что диффузионно-легированный сплав является готовым биметаллическим материалом с металлическим ядром и тугоплавкой боридной оболочкой на поверхности.

Рассмотрим некоторые особенности взаимодействия железа, углерода и бора в сплавах. Оба элемента (углерод и бор) образуют с железом диаграмму с эвтектикой [21]. Эвтектика железо – бор имеет температуру плавления 1149 °С [27] (по другим данным, например, [21] – 1174 °С) и содержит 3,8 % В. Еще более низкую температуру (1100 °С) имеет тройная эвтектика – «железо – бор – углерод», содержащая 2,8 % В и 1,5 % С [15, 27].

Известно [27–29], что при контакте двух кристаллов, имеющих диаграмму состояния с минимумом на линии ликвидуса, в зоне соприкосновения возможно появление жидкой фазы при температурах, значительно меньших, чем температура плавления контактирующих веществ. Это явление получило название контактно-реактивного плавления [27]. В других источниках можно встретить название контактного эвтектического плавления [28] либо контактного плавления [29].

Характерной особенностью эвтектики является наиболее низкая температура плавления в системе. Считается, что эвтектика образуется из жидкого сплава при одновременной кристаллизации двух или более фаз. Для получения эвтектического сплава необходимо растворить более тугоплавкую фазу в жидкой легкоплавкой фазе, обеспечив эвтектическую концентрацию компонентов системы. Однако, в действительности для образования эвтектики в ряде случаев важно лишь наличие контакта между различными фазами, образующими эвтектический сплав при нагревании [28]. Особого внимания заслуживают опыты по контактному плавлению в системах, в которых в твердом состоянии в равновесных условиях существует промежуточная фаза (химическое соединение) [29].

Отдельно следует обратить внимание на исследования, результаты которых приводятся в работе [13]. Автор впервые описал особенности растворения боромарганцированной проволоки 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 и происходит контактное эвтектическое плавление. Сплав на этом участке находится некоторое время в таком состоянии, которое способствует протеканию активной диффузии легирующих элементов между твердой и жидкой фазами. По результатам анализа микроструктуры участков переходной зоны (зоны жидкофазного растворения) после охлаждения отмечены следующие особенности плавления [13]: при плавлении боромарганцированной поверхностно-легированной проволоки область жидкофазного растворения при одних и тех же условиях больше чем для других поверхностно-легированных проволок; образование мелкодисперсных включений боридов в заэвтектической зоне характерно для боромарганцированной поверхностно-легированной проволоки, для борохромированной преимущественно идет эвтектическое превращение, к тому же наблюдается образование бороцементитной оторочки, которая, видимо, снижает скорость плавления диффузионного слоя.

Таким образом, проанализировав литературные данные [13, 15, 27–29] и на основании собственных исследований, проведенных автором ранее [20, 22–26], предложен механизм контактного эвтектического плавления в диффузионно-легированных сплавах на железной основе при кратковременной высокотемпературной обработке концентрированными источниками энергии. Для описания данного эффекта автором были сделаны некоторые упрощения. Схематично процесс контактного эвтектического плавления между тугоплавкой боридной оболочкой и металлическим ядром, приводящий к образованию эвтектических структур, представлен на рисунке 1. В исходном состоянии диффузионно-легированный сплав из металлических отходов производства представляет биметаллический материал (рисунок 1, а), состоящий из тугоплавкой боридной оболочки ( $Fe_xB_y$ ) и металлического ядра (Fe) с более низкой, по сравнению с оболочкой, температурой плавления.

При попадании частицы диффузионно-легированного сплава в зону с высокой температурой происходит ее разогрев и на границе между ядром и боридной оболочкой, за счет реализации эффекта контактного эвтектического плавления, образуются области с жидким сплавом (рисунок 1, б). При снижении теплового воздействия происходит последующая кристаллизация данных областей с образованием эвтектических структур. При повышении степени влияния

концентрированного источника теплоты либо времени нахождения в зоне теплового воздействия, в диффузионно-легированном сплаве образуется сплошная область жидкого сплава между металлическим ядром и тугоплавкой боридной оболочкой (рисунок 1, в). Последующее охлаждение сплава приводит к образованию эвтектической прослойки между металлическим ядром и боридной оболочкой.

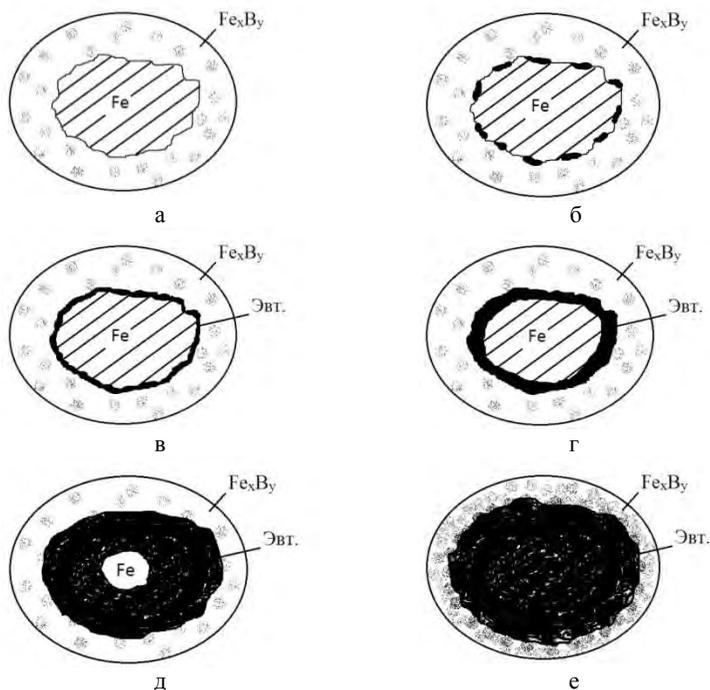


Рисунок 1 – Схема механизма контактного эвтектического плавления в диффузионно-легированных сплавах при кратковременной обработке концентрированными источниками энергии

Дальнейшее увеличение интенсивности теплового воздействия либо продолжительности выдержки в зоне термического влияния приводит к росту толщины эвтектической прослойки между слоем и ядром (рисунок 1, г). Стоит отметить, что преимущественно рост прослойки жидкого сплава происходит вглубь материала, так как

температуры плавления ядра и оболочки отличаются. Однако рост в сторону поверхности материала также происходит, хоть и не столь явно выражено (рисунок 1, д). При высокой степени теплового воздействия концентрированными источниками энергии либо продолжительной выдержке в зоне термического влияния в диффузионно-легированном сплаве образуется эвтектическая структура без металлического ядра и сохранившейся фрагментарно боридной оболочкой (рисунок 1, е). Ряд факторов указывает на возможность разрыва боридной оболочки в частице при наличии значительного градиента температур.

Образование в структуре диффузионно-легированных сплавов (после теплового воздействия) между тугоплавкой оболочкой и металлическим ядром локальных участков либо сплошной области с эвтектическими структурами будет способствовать ускоренному расплавлению диффузионно-легированного сплава при формировании износостойких покрытий индукционной наплавкой токами высокой частоты. Для начала плавления диффузионно-легированного сплава достаточно наличие в структуре сплава локально расположенных участков с эвтектической структурой. Данные эвтектические участки, имея более низкую температуру плавления, являются «центрами» начала плавления сплава при формировании защитных покрытий индукционной наплавкой токами высокой частоты. На основании анализа микроструктур, микротвердости и распределения химических элементов до и после кратковременной высокотемпературной обработки концентрированными источниками энергии, а также в зависимости от интенсивности термического воздействия и продолжительности выдержки, после комплексной обработки в структуре диффузионно-легированных сплавов могут присутствовать:

1. Локальные участки с эвтектической структурой между тугоплавкой оболочкой и металлическим ядром (рисунок 1, б).

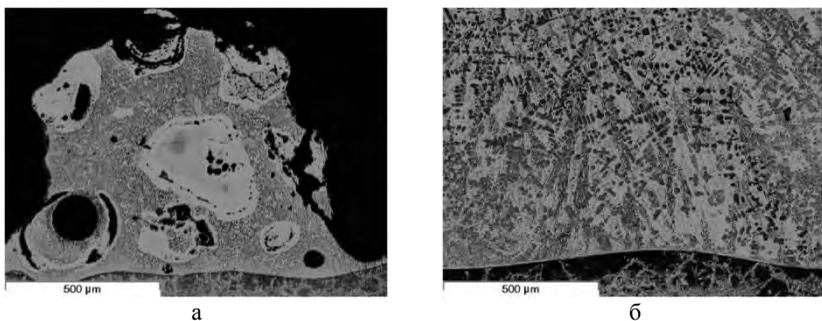
2. Прослойки с эвтектической структурой различной толщины между тугоплавкой оболочкой и металлическим ядром (рисунок 1, в–д).

3. Ядро с эвтектической структурой со сплошными либо фрагментарными участками тугоплавкой оболочки на поверхности (рисунок 1, е).

Изменяя температурно-временные параметры обработки, можно получать диффузионно-легированные сплавы с различной концентрацией эвтектических составляющих в структуре.

Таким образом, предварительная кратковременная обработка диффузионно-легированных сплавов концентрированными источниками энергии является одним из перспективных способов снижения температуры плавления сплавов при формировании износостойких покрытий индукционной наплавкой.

Предложенный механизм структурообразования в диффузионно-легированных сплавах из металлических отходов производства при кратковременной высокотемпературной обработке, приводящий к образованию эвтектических структур в сплаве, был подтвержден экспериментально (рисунок 2).



а – покрытие из исходного сплава;  
б – покрытие из сплава после предварительного оплавления

Рисунок 2 – Микроструктуры покрытий из диффузионно-легированного сплава на основе отходов чугуна ИЧХ28Н2

Наплавляемость диффузионно-легированного сплава из металлических отходов производства на основе чугуна ИЧХ28Н2 до и после кратковременной высокотемпературной обработки концентрированными источниками энергии индукционной наплавкой токами высокой частоты повышается [30]. Наплавка диффузионно-легированного сплава 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. Микротвердость диффузионного слоя на нерасплавившихся частицах сплава составляет 10000–11000 МПа, что подтверждает незавершенность диффузионных процессов во время изотермической выдержки. 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 токами высокой частоты предварительно оплавленного диффузионно-легированного сплава фиксируется полное расплавление шихтового материала.

**Выводы.** Исследовано влияние на структурообразование в диффузионно-легированных сплавах кратковременной высокотемпературной обработки концентрированными источниками энергии. Предложен механизм контактного эвтектического плавления в диффузионно-легированных сплавах на основе металлических отходов производства при кратковременной высокотемпературной обработке концентрированными источниками энергии. Предварительное оплавление концентрированными источниками энергии является одним из перспективных способов снижения температуры плавления диффузионно-легированных сплавов из металлических отходов производства при формировании износостойких покрытий индукционной наплавкой токами высокой частоты. Установлено повышение наплавляемости диффузионно-легированного сплава на основе чугунной дроби ИЧХ28Н2 после кратковременной высокотемпературной обработки концентрированными источниками энергии индукционной наплавкой токами высокой частоты.

## Литература

**1. Пашечко, М.И.** Разработка износостойких эвтектических покрытий большой толщины на основе системы Fe–Mn–C–B : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.01 / М.И. Пашечко ; Физ.-мех. ин-т им. Г.В. Карпенко. – Львов, 1985. – 25 с.

**2. Егоров, М.И.** Исследование структуры и свойств борсодержащих (1–5 %) сталей и разработка экономнолегированного безникелевого порошка для напыления и наплавки : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.01 / М.Д. Егоров; Лен. гос. ун-т. – Ленинград, 1990. – 17 с.

**3. Любецкий, С.Н.** Разработка технологии диффузионного легирования железных порошков и получение наплавленных износостойких покрытий: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.01 / С.Н. Любецкий; БПИ – Минск, 1991. – 20 с.

**4. Пантелеенко, Ф.И.** Теоретические и технологические основы получения самофлюсующихся порошков на железной основе диффузионным легированием и разработка износостойких композиционных покрытий из них. автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Минск, 1992. – 40 с.

**5. Константинов, В.М.** Разработка самофлюсующихся наплавочных материалов на железной основе и защитных покрытий из них специализированного назначения с использованием металлоотходов: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.01 / В.М. Константинов; БГПА – Минск, 1992. – 19 с.

**6. Лисовский, А.Л.** Повышение износостойкости пар трения скольжения лазерной обработкой: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.03.07 / А.Л. Лисовский; АН РБ ФТИ – Минск, 1996. – 19 с.

**7. Сороговец, В.И.** Получение износостойких покрытий плазменной наплавкой диффузионно-легированных самофлюсующихся порошков: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01 / В.И. Сороговец; ПГУ – Новополоцк, 2001. – 23 с.

**8. Штемпель, О.П.** Интенсификация диффузионного легирования металлических порошков для защитных покрытий в подвижных порошковых смесях: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01 / О.П. Штемпель; ПГУ – Новополоцк, 2003. – 23 с.

**9. Восстановление** деталей машин: Справочник / Ф.И. Пантелеенко, [и др.]; под ред. В.П. Иванова. – М.: Машиностроение, 2003. – 672 с., ил.

**10. Жабуренок, С.Н.** Повышение долговечности плужных лемехов наплавкой диффузионно-легированными сплавами из чугунной стружки и последующей термической обработкой: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01 / С.Н. Жабуренок; ПГУ – Новополоцк, 2004. – 20 с.

**11. Константинов, В.М.** Диффузионно-легированные сплавы для защитных покрытий : дис. ... докт. техн. наук : 05.02.01 / В.М. Константинов. – Минск, 2008. – 474 с.

**12. 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 : 05.16.06 / Е.Ф. Пантелеенко; ОПМ – Минск, 2009. – 20 с.

**13. Дашкевич, В.Г.** Поверхностно-легированная стальная проволока для наплавки деталей машин, работающих в условиях абразивного изнашивания: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01 / В.Г. Дашкевич; ФТИ – Минск, 2009. – 23 с.

**14. Пантелеенко, Ф.И.** Самофлюсующиеся диффузионно-легированные порошки на железной основе и защитные покрытия на них. – Минск: УП «Технопринт», 2001. – 300 с.

**15. 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; Новополюцк: ПГУ, 2001. – 148 с.

**16. Износостойкие** газотермические покрытия из диффузионно-легированных порошков на основе чугунной стружки / В.М. Константинов [и др.]; под ред. Ф.И. Пантелеенко – Мн.: Технопринт, 2005. – 146 с.

**17. Современные** перспективные материалы / Под редакцией В.В. Клубовича – Витебск: Изд-вл УО «ВГТУ», 2011. – 562 с.

**18. Современные** перспективные материалы / Под редакцией В.В. Клубовича – Витебск: Изд-вл УО «ВГТУ», 2013. – 655 с.

**19. Лисовский, Д.А.** Исследование и разработка экономно-легированных наплавочных слоев, стойких в условиях абразивного изнашивания: дис. ... маг. техн. наук : 05.02.01 / Д.А. Лисовский. – Новополюцк, 2001. – 71 с.

**20. Щербаков, В.Г.** Совершенствование технологий и оборудования для производства диффузионно-легированных наплавочных материалов: дис. ... маг. техн. наук : 1-48 80 01 / В.Г. Щербаков. – Минск, 2008. – 70 с.

**21. Крукович, М.Г.** Пластичность борированных слоев / М.Г. Крукович, Б.А. Прусаков, И.Г. Сизов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 384 с.

**22. Щербаков, В. Г.** Снижение температуры плавления диффузионно-легированных сплавов для индукционной наплавки / В.Г. Щербаков // Литье и металлургия. – 2014. – № 1 (74). – С. 97–100.

**23. Щербаков, В.Г.** Снижение температуры плавления диффузионно-легированных металлических отходов производства, используемых для получения износостойких покрытий с помощью индукционной наплавки / В. Г. Щербаков // *Металлургия : Республ. межведом. сб. науч. тр.* – Минск : БНТУ, 2014. – Вып. 35. – С. 207–215.

**24. Щербаков, В.Г.** Получение диффузионно-легированных сплавов в подвижных порошковых средах из металлических отходов производства для индукционной наплавки и пути повышения их технологических свойств / В.Г. Щербаков // *Литейные процессы.* – 2014. – № 13. – С. 90–98.

**25. Щербаков, В.Г.** Оплавление диффузионно-легированных сплавов из металлических дискретных металлоотходов для получения защитных покрытий ТВЧ / В.Г. Щербаков // *Литейные процессы.* – 2015. – № 14. – С. 15–23.

**26. Щербаков, В.Г.** Установка для высокотемпературной обработки диффузионно-легированного порошка для индукционной наплавки / В.Г. Щербаков, В.Г. Дашкевич // *Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: материалы 12-й Междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 25–27 мая 2016 г.) / Нац. акад. наук Беларуси [и др.]; редкол.: А.Ф.Ильющенко (гл. ред.) [и др.].* – Минск: Беларус. навука, 2016. – С. 300–302.

**27. Индукционная наплавка твердых сплавов / В.Н. Ткачев [и др.]** – М.: Машиностроение, 1970. – 183 с.

**28. Саратовкин, Д.Д.** Дендритная кристаллизация / Д.Д. Саратовкин // *ГНТИЛ по черн. и цв. мет-ии*, 1957. – 129 с.

**29. Залкин, В.М.** Природа эвтектических сплавов и эффект контактного плавления / В.М. Залкин // М.: Металлургия, 1987. – 152 с.

**30. 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. научных трудов. В 3 кн. Кн. 1. Материаловедение / редколлегия: С.А. Астапчик (гл. ред.) [и др.].* – Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2016. – С. 278–286.