

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ОБРАБОТКА ДИФФУЗИОННО-ЛЕГИРОВАННЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ

Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Беларусь

В статье рассмотрены некоторые пути снижения температуры плавления диффузионно-легированных сплавов для индукционной наплавки. Изучено влияние предварительного оплавления диффузионно-легированных сплавов для индукционной наплавки на температуру плавления.

The article discusses some ways to reduce the melting point of the diffusion-alloyed alloys for induction cladding. The effect of pre-reflow diffusion-alloyed alloys for induction surfacing melting point was investigated.

Введение

Уже более 25 лет активно ведутся исследовательские работы по получению наплавочных сплавов из металлических отходов производства с помощью диффузионного легирования (ДЛ). Авторами [1–7] подробно описаны технологии получения ДЛ-сплавов из металлических дискретных материалов. В работах [1–4] исследованы технологии получения защитных покрытий (ЗП) из ДЛ-сплавов с помощью высококонцентрированных источников энергии (напыление, лазерное оплавление и т.д.). Для данных методов получения ЗП обязательным является ряд технологических свойств, предъявляемых к наносимому материалу: текучесть, насыпная плотность и содержание легирующих элементов. В работах [5–7] рассмотрены методы и технологии получения защитных покрытий из ДЛ сплавов индукционной наплавкой. К ДЛ-сплавам, используемым для получения ЗП индукционной наплавкой, дополнительно предъявляются требования к температуре плавления, так как при формировании ЗП на детали из-за наличия тугоплавкой боридной оболочки на ДЛ-сплаве возникает необходимость в циклическом нагреве и/или добавлении в шихту дополнительных легкоплавких присадок для предотвращения перегрева, а тем более пережога основного металла, что негативно отражается на технологических и эксплуатационных свойствах ЗП и упрочняемой детали.

Так как при высокотемпературных способах получения ЗП температуры формирования покрытия составляют порядка 2000–13000 °С, то тугоплавкость боридной оболочки не является критичной. Однако для более низкотемпературных процессов формирования ЗП температуры плавления ДЛ-сплава необходимо снижать. Для реализации изысканий в области снижения температуры плавления были выбраны два направления исследований:

– Материаловедческие направления, заключающиеся в легировании элементами, образующими легкоплавкие эвтектики и снижающие температуры плавления ДЛ-сплавов для индукционной наплавки;

– Технологические направления, состоящие в исследовании процессов контактного эвтектического плавления и исследования режимов индукционной наплавки ДЛ-сплавов.

Так как ДЛ-сплав для индукционной наплавки является готовым материалом, то введение легирующих элементов, образующих легкоплавкие эвтектики и снижающие температуру плавления, затруднительно, что обуславливает исследование реализации предварительного оплавления ДЛ-сплавов перед индукционной наплавкой. Ниже представлен литературный обзор некоторых научных работ, посвященных исследованию скоростного высокотемпературного нагрева дисперсных частиц и ЗП.

Авторами работы [8] рассмотрены причины образования дефектов в поверхностных слоях инструментальных сталей в результате обработки изделий высококонцентрированными источниками нагрева. Отмечены особенности образования дефектов при лазерной и плазменной обработке. При повышении энергозатрат и соответственно температуры нагрева происходит расплавление значительных объемов металла, увеличение объема жидкой ванны, газодинамического воздействия плазменной струи над силами поверхностного натяжения, в результате происходит выплеск части расплавленного металла. Глубина зоны плазменного микроплавления может достигать 1 мм.

В работе [9] рассмотрена структура и функциональные возможности мобильной информационно-измерительной системы, предназначенной для регистрации электрических и временных параметров процесса дуговой сварки с последующей статистической обработкой и графической интерпретацией полученных результатов. Данная система интересна исследователям, работающим в области создания сварочных материалов и исследования технологических процессов.

Активно исследуется обработка концентрированными источниками энергии поверхностных слоев металлических материалов [10]. Установлено, что лазерное излучение в зависимости от его параметров (энергии, длительности и формы импульса), а также от теплофизических характеристик и структурного состояния обрабатываемого материала позволяет реализовать в поверхностных слоях различные процессы. В результате эффект упрочнения сталей при лазерном воздействии достигается не только вследствие мартенситного превращения, растворения карбидов, насыщения матрицы их компонентами, микрохимической неоднородности, но и высокотемпературного наклепа, повышения плотности дефектов кристаллического строения и пластических сдвигов.

В работе [11] рассмотрены явления, происходящие в рабочей зоне при нанесении покрытий. Изучено тепловое взаимодействие между покрытием и основой при электромагнитной наплавке. При кристаллизации расплава различной толщины характер этой зависимости не меняется, а на изменение времени интервала кристаллизации каплеобразное влияние оказывает начальная температура расплава. Управляя параметрами интенсивности теплового потока в направлении плоскости контакта капли расплава с основой, можно получать необходимое время кристаллизации, а в результате сформировать покрытия с заданными эксплуатационными свойствами.

Авторами [12] рассмотрен периферийный нагрев частиц при газопламенном нанесении порошковых покрытий. С помощью модели, реализованной в виде нейросети, определены пространственные контуры периферийных зон и показаны их зависимость от параметров нанесения.

В работе [13] изучено распределение микротвердости на глубине в образцах из различных конструкционных сталей, подвергнутых диффузионному борированию и последующей лазерной обработке. Исследованы режимы лазерного облучения, позволяющие частично или

полностью растворять боридные слои в ванне расплава. Показана возможность полного сохранения боридного слоя с получением под ним закалочной зоны из жидкой ванны расплава. После лазерной обработки боридных слоев толщиной 200–230 мкм наблюдали либо частичное разрушение боридного слоя, либо его полное сохранение.

Авторами работы [14] спектральным методом исследована реальная сварочная аргоновая дуга с неплавящимся вольфрамовым электродом, горящая на плавящемся титановом и неплавящаяся медном водоохлаждаемых анодах. Получены экспериментальные данные о распределении температуры в столбе дуги по ее радиусу вблизи анода. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что аксиальное распределение температуры в сварочной аргоновой дуге с вольфрамовым катодом зависит от состояния анода.

Выбор оптимальных режимов наплавки описан в работе [15]. От правильного выбора режима индукционной наплавки во многом зависит структура основного и наплавленного металлов, конфигурация слоя твердого сплава и, в конечном итоге, свойства наплавленной детали.

Работа [16] посвящена исследованию структуры и свойств металла, наплавленного индукционным способом с экранированием тепловых и электромагнитных полей. Показано, что благодаря экранированию на 12 % снижается неравномерность толщины слоя наплавленного металла, экономится на 10–15 % электроэнергия, исключается перегрев торца диска и наплавленного металла, а также сокращается время наплавки (с 32 до 22 с) по сравнению с наплавкой без экранирования. При этом микроструктура, твердость и износостойкость наплавленного металла остаются на том же уровне, что и при индукционной наплавке без экранирования.

Таким образом, установлено, что работ, посвященных предварительному оплавлению ДЛ-сплавов для индукционной наплавки, крайне мало. Автором ранее исследовалось предварительное оплавление ДЛ-сплавов из отходов дроби ИЧХ28Н2 в плазмотроне УПУ-3Д и ДЛ-сплавов из отходов дроби ДЧЛ 08, ИЧХ28Н2 и стружки Р6М5 на установке дуговой сварки в среде аргона с вольфрамовым электродом [17, 18]. Установлено, что распределение микротвердости по сечению порошинки изменилось относительно исходного. В поверхностном слое наблюдается резкое снижение значений микротвердости с 10000–12000 МПа до 8000–9000 МПа. Автор предполагает, что при воздействии концентрированными потоками энергии на ДЛ сплав произошло частичное оплавление боридного слоя в системе FeB-Fe₂B и образование эвтектики, что повлекло за собой снижение микротвердости в приповерхностном слое ДЛ-сплава.

Кратковременная обработка ДЛ-сплавов на установке с вольфрамовым электродом приводит к снижению микротвердости в приповерхностных слоях ДЛ-сплавов, что обуславливается подплавлением тугоплавкой боридной оболочки и образование эвтектических сплавов. Микроструктура оплавленного ДЛ-сплава по слоям представляет следующее [17, 18]:

- стекловидный фрагментарный слой оксида бора на поверхности частицы, образовавшийся вследствие испарения бора в процессе оплавления;
- высокобористая эвтектика, возникшая вследствие оплавления боридного слоя на поверхности частицы;
- неоплавленный частично сохранившийся боридный слой;
- низкобористая эвтектика, полученная при контактном эвтектическом плавлении боридного слоя и металлического ядра;
- металлическое ядро.

Анализируя поверхность ликвидус части системы Fe-B-C, построенной различными исследователями [2], можно предположить, что оплавление ДЛ-сплава приводит к образованию эвтектики, температура плавления которой 1000–1100 °С. Образование эвтектики в оплавленном ДЛ-сплаве повышает качество получаемого индукционной наплавкой защитного покрытия и его эксплуатационные свойства.

Таким образом, исследование предварительного оплавления ДЛ-сплавов, полученных из металлических отходов производства для индукционной наплавки ЗП является весьма актуаль-

ной задачей, позволяющей существенно снизить энергозатраты при восстановлении и упрочнении деталей машин, работающих в условиях интенсивного абразивного износа.

Материалы и методы исследования

В качестве исходных материалов были выбраны отходы чугуна ДЧЛ 08 (0,5–0,63 мм), ГОСТ 11964-81; отходы дробы ИЧХ28Н2 (0,5–0,63 мм), ГОСТ 7769-82; стружка Р6М5 (0,5–1,0 мм), ГОСТ 19265-73 и наплавочный ферросплав ФБХ-6-2 (0,4–0,5 мм), ГОСТ 21448-75. Диффузионное легирование (насыщение бором) проводили во вращающейся электрической печи [19]. Насыщающая смесь – карбид бора с активатором, время обработки 1 ч., температура – 950 °С. Сепарацию осуществляли ситовым способом. Оплавление ДЛ сплавов из отходов проводили на специальной установке для обработки металлического порошка [20]. Толщину боридных слоев, особенности структуры и морфологию исследовали с помощью металлографических микроскопов МИМ-7, ММУ-3У42, МИ-1, Planar 1М. Микродюрметрические исследования проводили на приборе ПМТ-3 согласно ГОСТ 2999-75. Химический состав борированной дробы оценивали микрорентгеноспектральным анализом на сканирующем электронном микроскопе VEGA II LMU с микроанализатором INCA energy 350 (фирма Oxford Instruments, Англия).

Результаты исследований и их обсуждение

Микроанализ ДЛ-сплавов из отходов ДЧЛ 08 и ИЧХ28Н2 после обработки выявил практически полное расплавление тугоплавкой боридной оболочки с образованием эвтектики и частичное оплавление боридных покрытий на ДЛ-сплавах из отходов стружки Р6М5 и ферросплава ФБХ-6-2.

Установлено существенное изменение значений микротвердости в ДЛ-сплавах по сечению до и после высокотемпературной обработки. Максимальная микротвердость в приповерхностных слоях в ДЛ-сплавах на основе ДЧЛ и ИЧХ снизилась с 12000–14000 МПа до 8000–10000 МПа, а в ДЛ-сплавах на основе Р6М5 и ФБХ с 10000–12000 МПа до 6000–8000 МПа. Микроструктура ДЛ-сплавов из отходов ДЧЛ, ИЧХ, Р6М5 и ферросплава ФБХ, а также распределение значений микротвердости по сечению до и после оплавления показаны на рис. 1–4.

Тугоплавкие слои FeB и Fe₂B, образовавшиеся на поверхности ДЛ-сплава, на основе дробы ДЧЛ и ИЧХ, в процессе ДЛ полностью расплавились. Пористость ДЛ-сплава в диффузионных слоях из-за микропластических деформаций во время ДЛ после оплавления снизилась с 8–9 % до 1–3 %. Из биметаллической структуры, образованной при ДЛ, микроструктура ДЛ-сплава на основе дробы ДЧЛ и ИЧХ после оплавления представляет эвтектический сплав, что свидетельствует о полном расплавлении тугоплавкой оболочки с последующей кристаллизацией.

В ДЛ-сплаве на основе дробы ИЧХ минимальное содержание Cr составляет 3,44 %, максимальное 24,14 %, среднее 15,46 %. Содержание Ni минимальное 0,02 %, максимальное 1,35 %, среднее 0,37 % (рис. 5).

Предварительное оплавление ДЛ-сплава на основе дробы ИЧХ существенно влияет на характер распределения легирующих элементов. Минимальное значение Cr в ДЛ-сплаве на основе дробы ИЧХ после оплавления составляет 5,69 %, максимальное 20,68 %, среднее 10,65 %. Минимальное значение Ni в ДЛ-сплаве на основе дробы ИЧХ после оплавления составляет 0,03 %, максимальное 0,40 %, среднее 0,26 %. Повышенное содержание Cr и Ni на границе диффузионный слой-металлическая основа и в ядре обусловлено диффузией элементов к центру порошинки в процессе насыщения бором при ДЛ. Более равномерное распределение Cr и Ni по сечению дробы после высокотемпературной обработки подтверждает полное расплавление дробы с последующей кристаллизацией. Снижение среднего значения Cr и Ni в обработанном ДЛ-сплаве на основе дробы ИЧХ после оплавления объясняется частичным испарением химических элементов при кристаллизации расплавленного ДЛ-сплава.

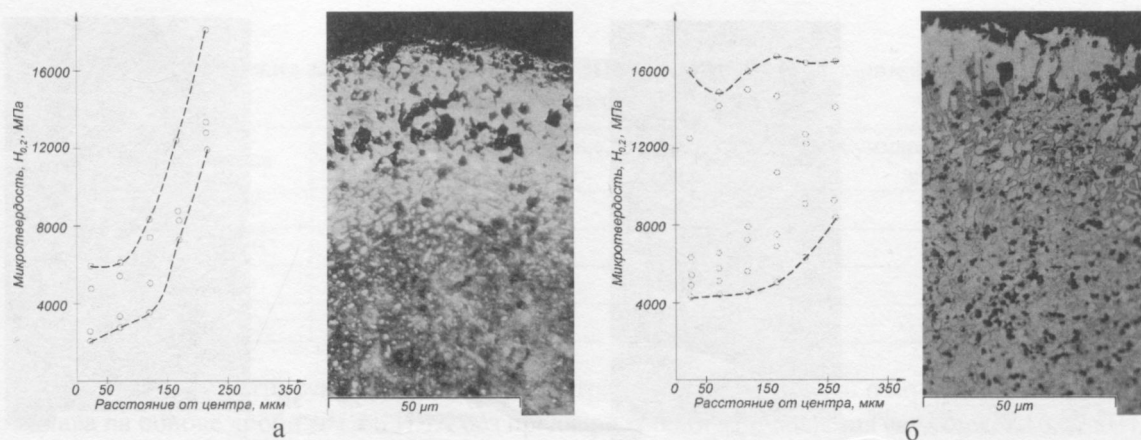


Рис. 1. Микроструктура и распределение микротвердости ДЛ отходов дробы ДЧЛ 08:
а – до оплавления; б – после оплавления

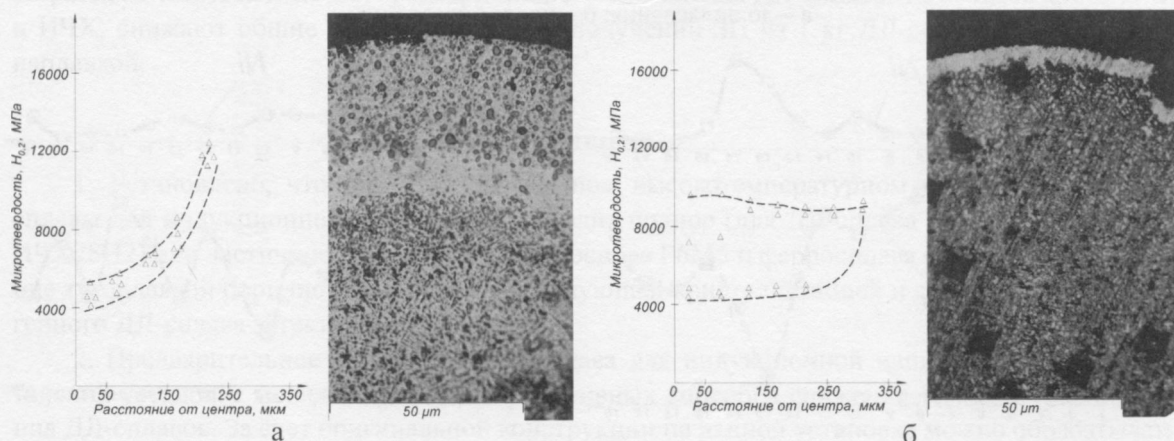


Рис. 2. Микроструктура и распределение микротвердости ДЛ отходов дробы ИЧХ28Н2:
а – до оплавления; б – после оплавления

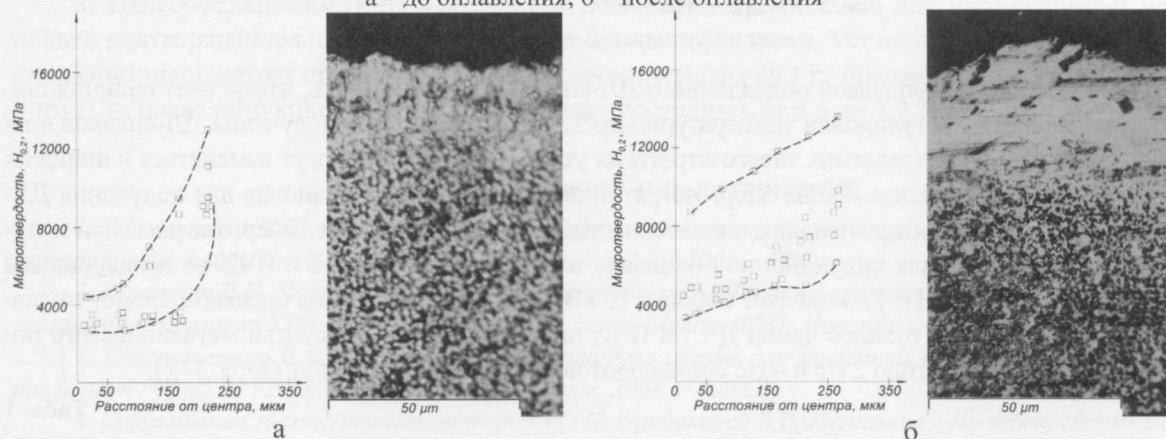


Рис. 3. Микроструктура и распределение микротвердости ДЛ отходов стружки Р6М5:
а – до оплавления; б – после оплавления

Проведен приближенный расчет энергетических затрат при получении ЗП из ДЛ сплавов на основе отходов дробы ДЧЛ и ИЧХ без оплавления и с предварительным оплавлением. В табл. 1 проведена сравнительная оценка энергозатрат, необходимых для получения ЗП из 1 кг ДЛ-сплава. Суммарные энергозатраты на получение 1 кг ДЛ-сплава для индукционной наплавки, складываются из затрат на изготовление ДЛ-сплава из отходов дробы ДЧЛ или ИЧХ, непосредственно затраты на предварительное оплавление ДЛ-сплава и затраты на получение

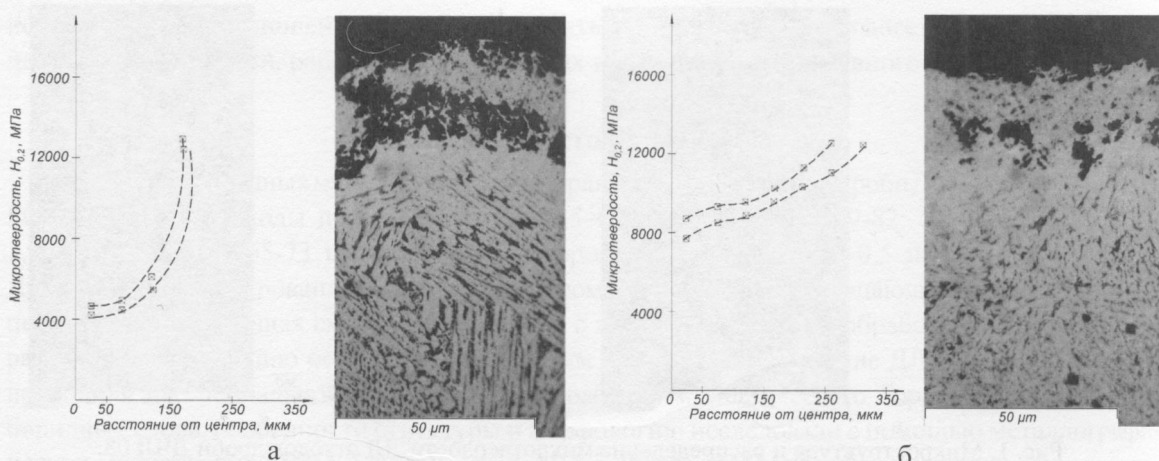


Рис. 4. Микроструктура и распределение микротвердости ДЛ ферросплава ФБХ-6-2:
а – до оплавления; б – после оплавления

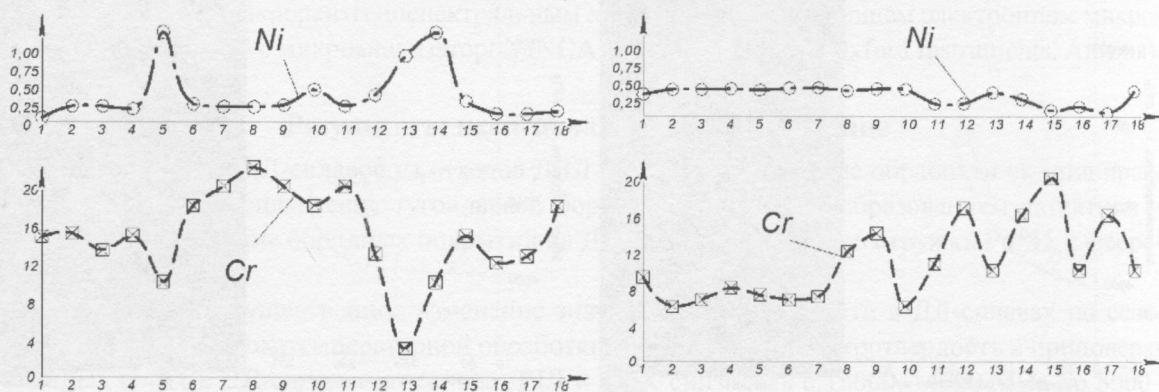


Рис. 5. Распределение Cr и Ni в ДЛ дроби ИЧХ28Н2:
а – до оплавления; б – после оплавления

ЗП индукционной наплавкой оплавленного ДЛ-сплава. Стоит отметить, что за счет наличия широкого диапазона регулировки температурно-временных параметров получения ДЛ-сплавов и их предварительного оплавления энергозатраты на установках [19, 20] могут изменяться в широких диапазонах. Для анализа общих энергозатрат производительность установок для получения ДЛ-сплава и для его предварительного оплавления выбрана равной 1 кг/час. Энергозатраты при получении ДЛ-сплавов для индукционной наплавки из отходов дроби ДЧЛ и ИЧХ во вращающейся электрической печи [19] составляет порядка 10 кВт/кг. Энергозатраты на предварительное оплавление ДЛ-сплава из отходов дроби ДЧЛ и ИЧХ на установке для обработки металлического порошка [20] со скоростью 2 г/с и 4 г/с составляют порядка 0,46–0,92 кВт/кг (табл. 1–2).

Табл. 1

Сравнительная оценка затрат при получении ЗП индукционной наплавкой из оплавленных ДЛ сплавов со скоростью 2 г/с

ДЛ сплав	Получение, кВт/ кг	Оплавление, кВт/ кг	Инд. наплавка, кВт/ кг	Суммарные затраты, кВт/ кг
ДЧЛ 08	10	–	6,67	16,67
ДЧЛ 08+О	10	0,92	5	15,92
ИЧХ	10	–	6,67	16,67
ИЧХ+О	10	0,92	5	15,92

Сравнительная оценка затрат при получении ЗП индукционной наплавкой из оплавленных ДЛ сплавов со скоростью 4 г/с

ДЛ сплав	Получение, кВт/ кг	Оплавление, кВт/ кг	Инд. наплавка, кВт/ кг	Суммарные затраты, кВт/ кг
ДЧЛ 08	10	–	6,67	16,67
ДЧЛ 08+О	10	0,46	5	15,46
ИЧХ	10	–	6,67	16,67
ИЧХ+О	10	0,46	5	15,46

Установлено, что суммарное значение затраченной энергии при получении ЗП из 1 кг ДЛ-сплава на основе дроби ДЧЛ и ИЧХ 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 ДЛ-сплавов из отходов дроби ДЧЛ и ИЧХ, снижают общие энергозатраты при получении ЗП из 1 кг ДЛ-сплава индукционной наплавкой.

Выводы

1. Установлено, что при кратковременном высокотемпературном воздействии на ДЛ-сплавы для индукционной наплавки происходит полное (для ДЛ-сплава на основе ДЧЛ 08 и ИЧХ28Н2) или частичное (для ДЛ-сплава на основе Р6М5 и ферросплава ФБХ-6-2) расплавление тугоплавкой боридной оболочки с последующей кристаллизацией и с образованием гомогенного ДЛ-сплава эвтектического состава;

2. Предварительное оплавление ДЛ-сплава для индукционной наплавки в экспериментальной установке является одним из эффективных способов снижения температуры плавления ДЛ-сплавов. За счет оригинальной конструкции на данной установке можно обрабатывать ДЛ-сплав для индукционной наплавки размерами 200–630 мкм и более.

3. Целесообразность предварительного оплавления ДЛ-сплавов для индукционной наплавки подтверждается приближенным экономическим расчетом. Установлено, что суммарное снижение энергозатрат при получении защитного покрытия из 1 кг предварительно обработанного ДЛ-сплава индукционной наплавкой может составлять от 4,5 до 7,2 %.

Список использованных источников

1. Пантелеенко, Ф.И. Самофлюсующиеся диффузионно-легированные порошки на железной основе и защитные покрытия на них. – Мн.: УП «Технопринт», 2001. – 300 с.
2. Ворошин Л.Г., Пантелеенко Ф.И., Константинов В.М. Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО. – 2-е изд., перераб. и доп. – Минск: ФТИ; Новополоцк: ПГУ, 2001. – 148 с.
3. Константинов В.М. Диффузионно-легированные сплавы для защитных покрытий : дис. докт. техн. наук : 05.02.01 / В.М. Константинов. – Минск, 2008. – 400 С.
4. Современные перспективные материалы / Под редакцией В.В. Клубовича – Витебск: Изд-вл УО «ВГТУ», 2011. – 562 с.
5. Пантелеенко, Е.Ф. Исследование диффузионно-легированных отходов стальной и чугунной дроби для получения защитных покрытий / Е.Ф. Пантелеенко, В.Г. Щербаков // *Литье и металлургия*, 2009. – №1. – С. 176–181.
6. Щербаков, В.Г. Некоторые аспекты использования отходов металлургического производства в качестве основы для получения наплавочных материалов. / В.Г. Щербаков // *Металлургия: Республиканский межведомственный сборник научных трудов в 2 ч. / БНТУ. – Минск, 2011. – Ч. 2. – С. 200–212.*
7. Щербаков, В.Г. Получение диффузионно-легированных сплавов в подвижных порошковых средах

из металлических отходов производства для индукционной наплавки и пути повышения их технологических свойств / Щербаков В.Г. // *Литейные процессы*. – 2014. – №13. – С.90–98.

8. Самотугин, С.С. Причины образования дефектов при поверхностном упрочнении сталей и сплавов высококонцентрированными источниками нагрева / Самотугин С.С., Мазур В.А. // *Автоматическая сварка* № 3, 2007, С. 27–31.

9. Пирумов, А.Е. Специализированная информационно-измерительная система для мониторинга процесса дуговой сварки / Пирумов А.Е., Скачков И.О., Супрун С.А., Максимов С.Ю. // *Автоматическая сварка* № 8, 2007, С. 41–43.

10. Бровер, А.В. Самоорганизация поверхностных слоев металлических материалов при обработке концентрированными потоками энергии // Бровер А.В., Дьяченко Л.Д. // *Упрочняющие технологии и покрытия*, № 3, 2007, С. 8–14.

11. Хейфец, М.Л. Теплофизика процессов наплавки покрытий ферромагнитными порошками в электромагнитном поле / Хейфец М.Л.; Грецкий Н.Л., Кожуро Л.М. // *Упрочняющие технологии и покрытия*, № 5, 2008, С. 3–8.

12. Федосов, В.В. Модель периферийного нагрева частиц при газопламенном нанесении покрытий / Федосов В.В., Федосова А.В. // *Упрочняющие технологии и покрытия*, № 2, 2009, С. 32–36.

13. Мишаков, Г.А. Лазерная обработка конструкционных сталей после диффузионного борирования / Мишаков Г.А., Родионов А.И. // *Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева* № 4 (83), 2010 С. 247–251.

14. Ерошенко, Л.Е. Аксиальное распределение температуры в дуге при сварке титана вольфрамовым электродом в аргоне / Ерошенко Л.Е., Прилуцкий В.П., Белоус В.Ю., Замков В.Н. // *Автоматическая сварка* № 3, 2001, С. 11–14.

15. Индукционная наплавка твердых сплавов. Ткачев В.Н., Фиштейн Б.М., Казинцев Н.В., Алдырев Д.А. «Машиностроение», 1970, стр. 183.

16. Пулька, Ч.В. Влияние режимов индукционной наплавки на структуру и свойства наплавленного металла / Пулька Ч.В., Шаблий О.Н., Письменный А.С. // *Автоматическая сварка* №10, 2004, С 19–21.

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

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

19. 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.

20. 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. - № и 20130804 ; заявл. 08.10.2013 ; опубл. 30.04.2014 // *Афіцыйны бюл. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці*, 2014. № 2. – С. 136.

Статья поступила в редакцию 13.04.2015