

**ВЛИЯНИЕ ИСТОЧНИКА ТЕПЛОТЫ
НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ В ЧАСТИЦАХ
ДИФфуЗИОННО-ЛЕГИРОВАННОГО СПЛАВА
ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ
ОБРАБОТКЕ КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ
ЭНЕРГИИ**

Введение. Диффузионно-легированные сплавы для упрочнения и восстановления деталей машин известны и нашли свое применение благодаря работам авторов [1–7]. Основной проблемой при формировании износостойких покрытий из диффузионно-легированных металлических отходов производства индукционной наплавкой токами высокой частоты является высокая температура плавления данных сплавов. Наличие тугоплавкой боридной оболочки (Fe_2B и FeB) с температурами плавления 1389 °С и 1540 °С [8] соответственно ухудшает технологические свойства наплавочного сплава. На основании собственных работ и литературных данных [1–2, 9–15], предложена дополнительная обработка диффузионно-легированных сплавов, заключающаяся в кратковременной высокотемпературной обработке концентрированными источниками энергии.

Целью данной работы являлась оценка влияния источников теплоты на структурообразование в диффузионно-легированных сплавах из отходов чугунной дроби при кратковременной высокотемпературной обработке концентрированными источниками энергии.

Материалы и методики исследования. В качестве исследуемого материала были выбраны диффузионно-легированные отходы чугунной дроби ДЧЛ 08 и ИЧХ28Н2. Диффузионное легирование проводили во вращающемся герметизированном контейнере из нержавеющей стали. Температура обработки составляла 950 °С, продолжительность – 1 ч. Для кратковременной высокотемпературной обработки диффузионно-легированных сплавов использовалось следующее оборудование: установка для напыления УПУ–3Д

($I = 330\text{--}350$ А, $U = 75$ В, азот); установка для дуговой сварки в среде защитных газов с вольфрамовым электродом ($I = 30\text{--}35$ А, $U = 22\text{--}25$ В) и экспериментальная установка с графитовыми электродами оригинальной конструкции [16]. После кратковременной обработки концентрированными источниками энергии диффузионно-легированные сплавы подвергались анализу микроструктуры и микротвердости с помощью микроскопа Leica DM2500 P с цифровой камерой и микротвердомера ПМТ-3. Распределение Cr и Ni в диффузионно-легированной дроби ИЧХ28Н2 до и после обработки оценивали микрорентгеноспектральным анализом на сканирующем электронном микроскопе VEGA II LMU с микроанализатором INCA energy 350 (фирма «Oxford Instruments», Англия).

Обсуждение результатов исследований. Для изучения влияния на структурообразование кратковременной высокотемпературной обработки концентрированными источниками энергии и оценки эффекта контактного эвтектического плавления в диффузионно-легированных сплавах из отходов чугунной дроби ДЧЛ 08 и ИЧХ28Н2 были предложены следующие параметры:

1. Размерный параметр (учитывает диапазон допустимых размеров обрабатываемого материала).

2. Энергоемкость процесса (учитывает потребляемую мощность оборудования при обработке материала).

3. Параметр температурного воздействия (учитывает влияние температуры на формирования эвтектических структур в материале).

4. Стабильность 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 (учитывает влияние симметричности нагрева обрабатываемого материала при кратковременной обработке концентрированными источниками энергии).

Оценка влияния параметров при кратковременной высокотемпературной обработке диффузионно-легированных сплавов концентрированными источниками энергии осуществлялась по трем значениям:

« + » *удовлетворительно*, данный параметр влияет положительно;

« ± » *неоднозначно*, данный параметр влияет как положительно, так и отрицательно;

« - » *неудовлетворительно*, данный параметр влияет отрицательно.

При обработке диффузионно-легированного сплава из отходов чугунной дроби ИЧХ28Н2 в плазмотроне УПУ-3Д установлено, что распределение микротвердости по сечению дроби изменилось относительно исходного. В поверхностном слое наблюдается снижение значений микротвердости с 10000–12000 МПа до 8000–9000 МПа. Микротвердость центральной области незначительно возросла (с 3500–4500 МПа до 4000–5500 МПа). Предположительно, при воздействии концентрированного источника энергии на диффузионно-легированный сплав произошло частичное оплавление боридного слоя в системе FeB-Fe₂B и образование эвтектического сплава, что повлекло за собой снижение микротвердости в приповерхностном слое.

Микроструктура диффузионно-легированного сплава на основе чугунной дроби ИЧХ28Н2 по слоям представляет следующее: стекловидный фрагментарный слой оксида бора на поверхности частицы; высокобористая эвтектика 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.

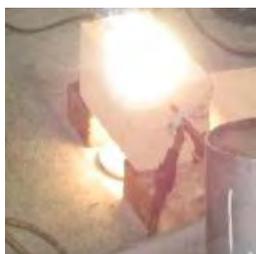
Размерный параметр при кратковременной обработке концентрированным источником энергии на установке УПУ-3Д оценили как неудовлетворительно, так как на данном оборудовании максимальный размер обрабатываемого материала составлял 120–160 мкм; энергоемкость процесса оценили также неудовлетворительно, так как мощность установки УПУ-3Д составила 25 кВт. Температурное воздействие можно оценить как неоднозначное, так как в оплавленных структурах присутствуют как оплавленные в процессе обработки области, так и не оплавленные, что характеризуется микротвердостью по сечению дроби. Параметр стабильности концентрированного источника энергии, за счет особенностей конструкции, оценили как удовлетворительный. Расположение материала в про-

цессе обработки, за счет наличия бункера и дозатора, оценили удовлетворительно. Симметричность нагрева, за счет наличия бункера и дозатора в конструкции, также оценили удовлетворительно.

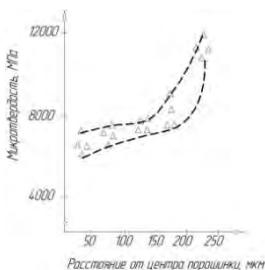
При обработке диффузионно-легированных сплавов на установке для дуговой сварки в среде защитных газов с вольфрамовым электродом также установлено изменение распределения микротвердости по сечению, что подтверждает оплавление сплава в процессе обработки.

В этом случае размерный параметр обработки на данной установке оценили как удовлетворительно, так как при любых режимах обработки максимальный размер обрабатываемого материала не ограничен конструктивными особенностями оборудования; энергоемкость процесса – неудовлетворительно, так как средняя мощность установки для дуговой сварки составляет 23 кВт; температурное воздействие – удовлетворительно, так как в анализируемых микроструктурах обнаружены оплавленные в процессе обработки области, что также характеризуется снижением микротвердости от поверхности к центру по сечению дроби; влияние параметра стабильности концентрированного источника энергии, за счет особенностей конструкции, оценили как неоднозначное, так как, несмотря на наличие стабилизатора горения дуги, в процессе обработки необходимо точное регулирование расстояния между горелкой и обрабатываемым материалом. Расположение обрабатываемого материала в процессе обработки оценили как неудовлетворительно, так как при обработке отсутствует надежная фиксация материала. Данный недостаток приводит к существенной потере значительной части материала при обработке. За счет отсутствия надежного фиксирования материала при обработке также оценили как неудовлетворительно и симметричность нагрева, что подтверждается анализом полученных микроструктур.

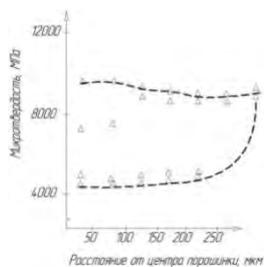
Обработка диффузионно-легированных сплавов из отходов чугунной дроби на установке с двумя графитовыми электродами изменила распределение микротвердости в сплаве по сечению от края к центру (рисунок 1).



а



б



в

а – внешний вид установки для оплавления; б – распределение микротвердости в исходном ДЛ сплаве; в – распределение микротвердости в оплавленном ДЛ сплаве

Рисунок 1 – Внешний вид установки для оплавления и распределения микротвердости в ДЛ сплаве

В конкретном случае размерный параметр при обработке на установке с двумя графитовыми электродами оценили как удовлетворительно, так как на данном оборудовании при любых режимах обработки максимальный размер обрабатываемого материала неограничен; энергоемкость процесса – удовлетворительно, так как средняя мощность установки при использовании сварочного выпрямителя составляет 11,4 кВт; температурное воздействие – удовлетворительно, так как в анализируемых микроструктурах обнаружены оплавленные в процессе обработки области, что также характеризуется снижением микротвердости от поверхности к центру; влияние параметра стабильности концентрированного источника энергии, за счет особенностей конструкции, удовлетворительно, так как в процессе горения дуги возможно плавное регулирование расстояния между электродами и обрабатываемым материалом; расположение материала в процессе обработки – удовлетворительно, так как его перемещение при обработке осуществляется специальным дозирующим устройством. За счет равномерной подачи материала с помощью специального дозирующего устройства при обработке оценили удовлетворительно и симметричность нагрева, что также подтверждается анализом полученных микроструктур.

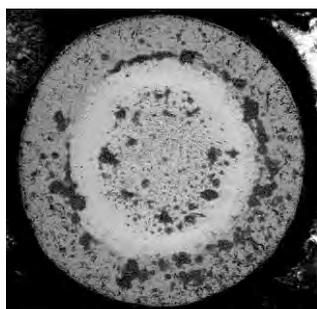
Исследование изменения химического состава в диффузионно-легированном сплаве на основе отходов чугуновой дробы ИЧХ28Н2 установило следующее (рисунок 2):

– минимальное содержание Cr составляет 3,44 %, максимальное – 24,14 %, среднее – 15,46 %;

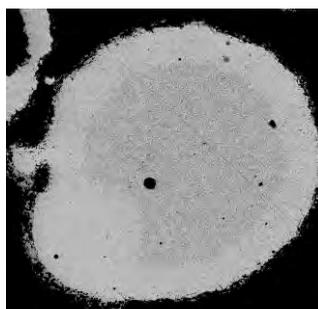
– минимальное содержание Ni – 0,02 %, максимальное – 1,35 %, среднее – 0,37 %;

– минимальное содержание Cr в диффузионно-легированной дроби после обработки составляет 5,69 %, максимальное – 20,68 %, среднее – 10,65 %;

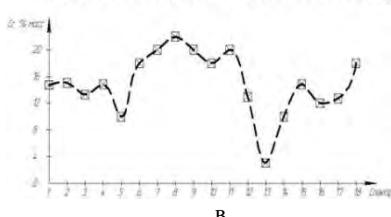
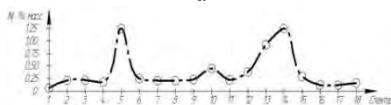
– минимальное содержание Ni в диффузионно-легированной дроби после обработки составляет 0,03 %, максимальное – 0,40 %, среднее – 0,26 %.



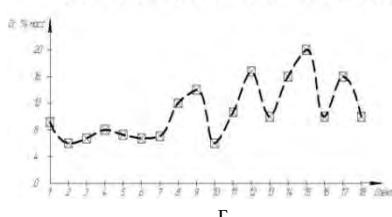
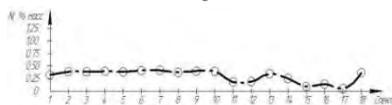
а



б



в



г

а, в – в исходном состоянии; б, г – после оплавления
Рисунок 2 – Микроструктуры и распределение концентрации Cr и Ni в диффузионно-легированной дроби ИЧХ28Н2

Повышенное содержание Cr и Ni на границе «диффузионный слой–металлическая основа» и в ядре обусловлено диффузией элементов к центру в процессе насыщения бором при диффузионном

легировании. Равномерное распределение Cr и Ni по сечению дроби после кратковременной обработки концентрированным источником энергии частично подтверждает расплавление тугоплавкой боридной оболочки в дроби и последующую кристаллизацию сплава с образованием эвтектических структур.

Незначительное снижение среднего значения Cr и Ni в дроби после обработки объясняется частичным испарением химических элементов при кристаллизации расплавленного сплава. Образование эвтектических структур при кратковременной обработке концентрированным источником энергии на установке с двумя графитовыми электродами подтверждается также и анализом микроструктур данной чугунной дроби до и после обработки.

Результаты оценки влияния источников теплоты при кратковременной высокотемпературной обработке концентрированными источниками энергии на структурообразование в диффузионно-легированных сплавах из отходов чугунной дроби ДЧЛ 08 и ИЧХ28Н2 приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Оценка параметров обработки при кратковременной высокотемпературной обработке концентрированными источниками энергии

Источник*	Исследуемый параметр**					
	1	2	3	4	5	6
УПУ	–	–	±	+	+	+
W	+	–	+	–	–	–
ЭУ	+	+	+	+	+	+

* Источник: УПУ – установка УПУ-3Д; W – установка для дуговой сварки в среде защитных газов с вольфрамовым электродом; ЭУ – экспериментальная установка
 ** Исследуемый параметр: 1 – Размерный параметр, 2 – Энергоемкость процесса, 3 – Температурное воздействие, 4 – Стабильность источника, 5 – Расположение материала, 6 – Симметричность нагрева

Выводы. В работе исследовано влияние источника теплоты на структурообразование в диффузионно-легированных сплавах при кратковременной высокотемпературной обработке. Установлено, что все используемые источники теплоты при обработке приводят, в разной степени, к оплавлению тугоплавкой боридной оболочки в диффузионно-легированных сплавах из отходов чугунной дроби

ДЧЛ 08 и ИЧХ28Н2 и последующей кристаллизации с образованием эвтектических структур. Основными недостатками обработки на установке УПУ–3Д является высокие энергозатраты и малый размер обрабатываемого материала. Следовательно данная обработка нецелесообразна для диффузионно-легированных сплавов, применяемых при индукционной наплавке токами высокой частоты. Обработка на установке для дуговой сварки в среде защитных газов с вольфрамовым электродом из-за отсутствия надежной фиксации обрабатываемого материала приводит к значительной его потере при обработке. Данная обработка также является нецелесообразной за счет повышенных энергозатрат. Обработка на экспериментальной установке является минимально энергозатратной и достаточно стабильной. Обработке можно подвергать диффузионно-легированные сплавы различного размера и состава. Стабильность полученных результатов подтверждается анализом микроструктур и микротвердости материалов до и после обработки.

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. Восстановление** деталей машин: Справочник / Ф.И. Пантелеенко [и др.]; под ред. В.П. Иванова. – М.: Машиностроение, 2003. – 672 с., ил.
- 4. Износостойкие** газотермические покрытия из диффузионно-легированных порошков на основе чугуновой стружки / В.М. Константинов [и др.]; под ред. Ф.И. Пантелеенко – Мн.: Технопринт, 2005. – 146 с.
- 5. Константинов, В.М.** Диффузионно-легированные сплавы для защитных покрытий : дис. ... докт. техн. наук : 05.02.01 / В.М. Константинов. – Минск, 2008. – 474 л.
- 6. Современные** перспективные материалы / Под редакцией В.В. Клубовича. – Витебск: Изд-вл УО «ВГТУ», 2011. – 562 с.

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

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

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

10. **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.

11. **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.

12. **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.

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

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

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

16. **Установка для обработки металлического порошка** : пат. № 10051 Респ. Беларусь, МПК В 22F 1/00 / В.М. Константинов, В.Г. Дашкевич, В.Г. Щербаков; заявитель Белорус. нац. техн. ун-т. – № и 20130804 ; заявл. 08.10.2013 ; опубл. 30.04.2014 // Афіцыйны бюл. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці . – 2014. № 2. – С. 136.