

---

---

## Раздел 2

# МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМООБРАБОТКА СПЛАВОВ И ОТЛИВОК

УДК 621.762

**В.Г. Щербаков**

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

### **ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКОЙ ДИФфуЗИОННО-ЛЕГИРОВАННЫХ СПЛАВОВ ИЗ ОТХОДОВ ЧУГУННОЙ ДРОБИ ПОСЛЕ КРАТКОВРЕМЕННОЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ОБРАБОТКИ КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ**

**Введение.** Все большее распространение в упрочняющих и восстановительных технологиях машиностроения получают диффузионно-легированные (ДЛ) сплавы. Авторы работ [1–10] обоснованно рекомендуют использование данных сплавов при восстановлении и упрочнении машин и механизмов, подвергающихся при работе интенсивному абразивному изнашиванию. Разработана целая концепция [1–7] обоснованного применения ДЛ сплавов из металлических отходов производства для замены дорогостоящих наплавочных материалов на железной и, в особенности, никелевой основах при формировании износостойких покрытий различными методами. ДЛ сплавы нашли свое применение во многих областях машиностроения как альтернативная замена дорогостоящих импортных материалов.

Стоит отметить определенную универсальность данной технологии, позволяющей оперативно наладить выпуск дешевых экономно-легированных сплавов из металлических дискретных металлоотходов производства в виде стружки, дроби, сечки и т.д. Однако особенности строения, структуры и физико-химических свойств ДЛ сплавов из металлических отходов производства ограничивают применение данных материалов при упрочнении и восстановлении деталей машин индукционной наплавкой токами вы-

сокой частоты (ТВЧ). В отличие от высокотемпературных способов формирования защитных покрытий (плазменное напыление, лазерная обработка и т.д.), когда наносимый на упрочняемую поверхность материал, в процессе нанесения, подвергается полному расплавлению и последующей кристаллизации, при индукционной наплавке ТВЧ реализуется совершенно другой процесс формирования износостойкого покрытия. Нагрев шихтового материала осуществляется через нагрев упрочняемой детали и превышение температуры по данным [11] выше 1250 °С приводит к структурным изменениям упрочняемой детали (перегрев) либо к неисправимому браку из-за активного окисления границ зерен стальной подложки (пережог). Можно снижать температуру плавления шихтового материала, используя дорогостоящие сплавы на никелевой основе, что является нецелесообразным, так как эксплуатационные свойства полученных покрытий часто являются завышенными и не оправдывают ресурсо- и энергозатраты на их формирование, а тем более на дальнейшую эксплуатацию. Либо проводя дополнительную обработку (воздействие) изменить структуру ДЛ сплавов на основе металлических отходов производства, что в свою очередь может привести к снижению температуры плавления данных сплавов.

Используя некоторые допущения порошковый ДЛ сплав можно представить в виде биметаллических гранул, состоящих из тугоплавкой боридной оболочки с температурой плавления согласно [12] 1389 °С для Fe<sub>2</sub>B и 1540 °С для FeB, соответственно и чугунного (стального) ядра, температура плавления которого существенно ниже и зависит от исходного химического состава подвергаемого диффузионному легированию сплава.

На основании работ [13–17], выполненных автором ранее, одним из эффективных методов влияния на структурообразование в ДЛ сплавах из металлических отходов производства является предварительная кратковременная высокотемпературная обработка (КВТО) концентрированными источниками энергии. Согласно литературным данным [11] и исходя из проведенных ранее автором исследований [13–17] предварительная КВТО ДЛ сплавов приводит к образованию в каждой отдельной частице сплава, за счет эффекта контактного эвтектического плавления (КЭП) [11, 18–19], эвтектических структур, обладающих меньшей температурой плавления. Изменяя интенсивность воздействия концентрированного источника энергии и продолжительность обработки, можно регулировать количество образующихся взамен тугоплавких боридных фаз, эвтектических составляющих в сплаве.

Таким образом, **цель данной работы** заключалась в оценке влияния предварительной кратковременной высокотемпературной обработки концентрированными источниками энергии на расплавление наплавочного сплава из диффузионно-легированных металлических отходов чугунной дроби ИЧХ28Н2 при формировании износостойких покрытий индукционной наплавкой токами высокой частоты.

**Материалы, оборудование и методики исследований.** В качестве исходного материала для исследований были выбраны отходы чугунной дроби из высокохромистого чугуна ИЧХ28Н2 ГОСТ 7769-82, образующиеся в результате электроэрозионной обработки отливок. Размеры исходной дроби составляли 0,4–0,63 мм. Химический состав дроби: 1,8–3,0 % С, 25,0–30,0 % Cr, 1,0–3,0 % Ni, 1,0 % Mn, 1,0 % Si. Диффузионное легирование (борирование) осуществлялось во вращающемся герметизированном контейнере из нержавеющей стали на установке [20]. В качестве насыщающей среды использовался карбид бора с добавкой 1% активатора в виде  $AlF_3$ . Температура диффузионного легирования составляла 950 °С, продолжительность процесса – 60 мин. Сепарацию обработанного материала от насыщающей смеси осуществляли с использованием набора сит с размером ячеек менее 0,4 мм либо с использованием компактного магнитного сепаратора. Кратковременную высокотемпературную обработку концентрированными источниками энергии проводили на установке [21]. Диффузионно-легированный сплав на основе чугунной дроби ИЧХ28Н2 дозированно подавался в рабочее пространство установки и после обработки размещался в сборном бункере. Индукционную наплавку проводили на исследовательской установке ФТИ-40/10-50 [22]. Диффузионно-легированный сплав без предварительной КВТО и после КВТО равномерно располагался на пластине из среднеуглеродистой стали размером (Ш×Д×В) 20×30×5 мм. Масса ДЛ сплава для наплавки на каждой пластине была одинакова. Распределение сплава по площади пластины равномерное. Пластины в зоне нагрева от индуктора располагались в одинаковых положениях без возможности дальнейшего перемещения. Шихта для наплавки состояла только из ДЛ сплава. Контроль температуры нагрева пластин осуществлялся с помощью выносного пирометра «Compact» CT Laser-2MH-CF4. Режим нагрева пластин программировался и осуществлялся следующим образом: нагрев до 1200 °С в течение 90 с, изотермическая выдержка при 1200 °С – 60 с и последующее медленное охлаждение на спокойном воздухе. Анализ микроструктуры и микротвердости осу-

ществлялся по стандартным методикам с использованием микроскопа Leica DM2500 P с цифровой камерой и микротвердомера ПМТ-3. Распределение Cr и Ni в диффузионно-легированной дроби ИЧХ28Н2 до и после КВТО оценивали микрорентгеноспектральным анализом на сканирующем электронном микроскопе VEGA II LMU с микроанализатором INCA energy 350 (фирма Oxford Instruments, Англия).

**Результаты исследований и их обсуждение.** Микроструктуры и распределение микротвердости по сечению ДЛ сплава из металлических отходов производства на основе чугуна ИЧХ28Н2 до и после КВТО представлены на рис. 1 и 2 соответственно. В микроструктуре исходного ДЛ сплава присутствует боридный слой на поверхности частиц, что также подтверждается распределением микротвердости по сечению сплава от края к центру. Микроструктурный анализ ДЛ сплава после КВТО выявил наличие локальных областей со структурой, характерной для эвтектических сплавов [23]. Образование в ДЛ сплаве областей с эвтектической структурой после КВТО подтверждается также и распределением микротвердости по сечению. В исходном состоянии после ДЛ микротвердость диффузионного слоя толщиной 30–50 мкм составляет 11000–13000 МПа и резко снижается при приближении к ядру сплава до 5000–7000 МПа (рис. 2, а).

Микротвердость под диффузионным слоем и до ядра остается постоянной. После КВТО в ДЛ сплаве распределение микротвердости по сечению изменилось. Зафиксировано снижение микротвердости на поверхности и в диффузионном слое ДЛ сплава до 7000–8000 МПа и в сердцевине до 4000–5500 МПа (рис. 2, б).

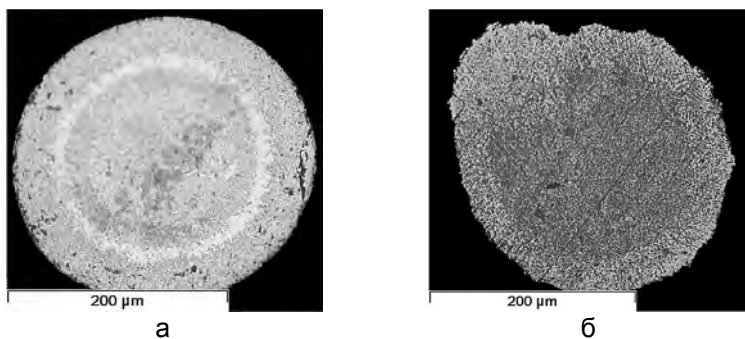


Рис. 1. ДЛ сплав из отходов чугуна ИЧХ28Н2:  
а – исходная микроструктура ДЛ сплава; б – микроструктура ДЛ сплава после КВТО

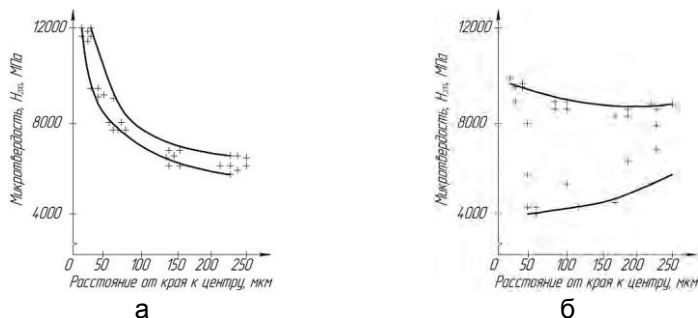


Рис. 2. ДЛ сплав из отходов чугунной дробИ ИЧХ28Н2:  
 а – распределение микротвердости по сечению ДЛ сплава  
 в исходном состоянии; б – распределение микротвердости  
 по сечению ДЛ сплава после КВТО

После КВТО распределение Сг и Ni в ДЛ сплаве стало более равномерное [13–15]. Распределение Сг и Ni после КВТО также свидетельствует об образовании в ДЛ сплаве за счет эффекта КЭП эвтектических структур. Таким образом, анализ микроструктуры, микротвердости и распределение Сг и Ni после КВТО позволяет предполагать, что в ДЛ сплаве из отходов чугунной дробИ ИЧХ28Н2 за счет эффекта КЭП образуются эвтектические структуры с меньшей температурой плавления, чем исходный сплав.

Микроструктуры покрытий, полученных индукционной наплавкой ТВЧ из ДЛ сплавов на основе отходов чугунной дробИ ИЧХ28Н2 до и после КВТО, представлены на рис. 3.

При индукционной наплавке ТВЧ ДЛ сплава без предварительной КВТО, в процессе плавления не фиксируется характерное для этого процесса усадка шихты [11], так как в ней из-за отсутствия флюсов не присутствуют легкоплавкие составляющие. Визуальное наблюдение в процессе наплавки подтверждает отсутствие полного сплавления металлической шихты с основой. Микроанализ наплавленного слоя зафиксировал локальные области, в которых начинается процесс частичного сплавления шихты и основного металла. ДюрOMETрический анализ не расплавившихся частиц ДЛ сплава показал высокую твердость сохранившегося диффузионного слоя (10000–11000 МПа), что подтверждает незавершенность диффузионных процессов во время изотермической выдержки при индукционной наплавке. За счет отсутствия сплавления при изотермической выдержке в покрытии присутствует значительная пористость ( $\approx 50\%$ ), что также негативно влияет на скорость формирования покрытия.

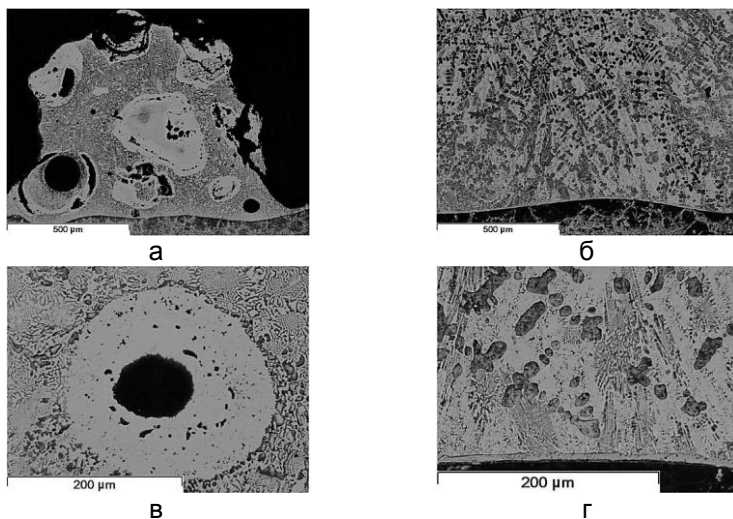


Рис. 3. Микроструктуры покрытий из ДЛ сплава на основе отходов чугунной дроби ИЧХ28Н2:

а, в – покрытие из исходного ДЛ сплава; б, г – покрытие из ДЛ сплава после КВТО

При индукционной наплавке ТВЧ ДЛ сплава из чугунной дроби ИЧХ28Н2, предварительно подвергнутого КВТО, фиксируется полное расплавление шихтового материала с образованием жидкой ванны расплава. Следует отметить, что полное расплавление шихты произошло при изотермической выдержке в процессе наплавки после 30-секундного временного интервала. Анализ микроструктуры покрытия свидетельствует об образовании характерной доэвтектической структуры в процессе кристаллизации жидкой ванны расплава. Образование доэвтектических структур в наплавленном слое, по мнению авторов [11], свидетельствует о значительном перегреве жидкого металла в процессе изотермической выдержки и последующего медленного охлаждения на спокойном воздухе. В литературе нет однозначного ответа влияния микроструктуры сплава на относительную износостойкость покрытия. Авторы [11] отмечают, что в структуре износостойких покрытий необходимо наличие эвтектических и/или заэвтектических структур, а наличие доэвтектических структур нежелательно. Авторы [3] считают, что наличие доэвтектических, эвтектических и заэвтектических структур является предпочтительным для покрытий, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания. Мик-

ротвердость дендритных участков в наплавленном слое составляет 8000–9000 МПа, а эвтектической ледебуритной составляющей 10000–11000 МПа. Пористость покрытия не превышает 1 %. Металлографическим методом зафиксирована тонкая прослойка между покрытием и основным металлом, что также подтверждает полное сплавление диффузионно-легированного сплава с основой при наплавке ТВЧ. Технико-экономическое обоснование целесообразности комплексной обработки ДЛ сплавов из металлических отходов производства для индукционной наплавки ТВЧ описано в работах [13, 15, 17]. Проведенные оценочные расчеты свидетельствуют, что суммарные энергозатраты на предварительную КВТО ДЛ сплавов с последующей индукционной наплавкой ТВЧ на 7 % ниже, чем затраты при индукционной наплавке ТВЧ без КВТО, за счет снижения как температуры плавления сплава при формировании покрытия, так и продолжительности самого процесса.

**Выводы.** Исследование структурообразования покрытий при индукционной наплавке токами высокой частоты из диффузионно-легированных бором гранулированных сплавов из отходов дроби белого чугуна, подвергнутых предварительной кратковременной высокотемпературной обработке концентрированными источниками энергии показало целесообразность применения данной комплексной обработки при формировании износостойких покрытий, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания. Предварительная кратковременная высокотемпературная обработка концентрированными источниками энергии диффузионно-легированных сплавов из отходов чугунной дроби ИЧХ28Н2, за счет эффекта контактного эвтектического плавления, приводит к образованию в структуре сплава локальных областей с эвтектической структурой, благоприятно влияющих на процессы сплавления при индукционной наплавке ТВЧ. Оплавление диффузионно-легированных сплавов предварительной кратковременной высокотемпературной обработкой концентрированными источниками энергии является перспективной и экономически обоснованной заменой дорогостоящих импортных наплавочных сплавов на никелевой и железной основах при формировании износостойких покрытий индукционной наплавкой ТВЧ.

#### Список литературы

1. Пантелеенко Ф.И. Теоретические и технологические основы получения самофлюсующихся порошков на железной основе диффузионным легированием и разработка износостойких ком-

- позиционных покрытий из них: автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.01 / Ф.И. Пантелеенко. – Минск, 1992 – 32 с.
2. Пантелеенко Ф.И. Самофлюсующиеся диффузионно-легированные порошки на железной основе и защитные покрытия на них. – Мн.: УП «Технопринт», 2001. – 300 с.
  3. Ворошнин 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.
  4. Восстановление деталей машин: справочник / Ф.И. Пантелеенко [и др.] ; под общ. ред. В.П. Иванова. – М.: Машиностроение, 2003. – 672 с., ил.
  5. Износостойкие газотермические покрытия из диффузионно-легированных порошков на основе чугуновой стружки: монография / В.М. Константинов, Н.В. Спиридонов, О.Г. Девойно, А.М. Авсиевич; под. ред. чл.-корр. НАНБ Ф.И. Пантелеенко. – Мн.: Технопринт, 2005. – 146 с.
  6. Константинов, В.М. Диффузионно-легированные сплавы для защитных покрытий: дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.01 / В.М. Константинов. – Минск, 2008. – 474 л.
  7. Современные перспективные материалы / под ред. В.В. Клубовича. – Витебск: Изд-вл УО «ВГТУ», 2011. – 562 с.
  8. Пантелеенко Е.Ф., Щербаков В.Г. Исследование диффузионно-легированных отходов стальной и чугуновой дроби для получения защитных покрытий // Литье и металлургия: научно-производственный журнал. – 2009. – № 1 (50). – С. 176–181.
  9. Щербаков В.Г. Некоторые аспекты использования отходов металлургического производства в качестве основы для получения наплавочных материалов // Металлургия : республ. межвед. сб. науч. трудов. – Минск : БНТУ, 2011. – Вып. 33, ч. 2. - С. 200–213.
  10. Щербаков В.Г. Некоторые особенности получения диффузионно-легированных сплавов для индукционной наплавки из дисперсных отходов стали и чугуна в подвижных порошковых смесях // Металлургия : республ. межвед. сб. науч. трудов. – Минск: БНТУ, 2015. – Вып. 36 - С. 243–249.
  11. Индукционная наплавка твердых сплавов / В.Н. Ткачев [и др.]. – М.: Машиностроение, 1970. – 183 с.
  12. Крукович М.Г., Прусаков Б.А., Сизов И.Г. Пластичность борированных слоев. – М.: ФИЗМАТЛИТ. 2010. – 384 с.



13. Щербаков В.Г. Снижение температуры плавления диффузионно-легированных сплавов для индукционной наплавки // Литье и металлургия. – 2014. – № 1 (74). – С. 97–100.
14. 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: межрегион. сб. науч. тр. / под ред. В.М. Колокольцева. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. – Вып.13. – С. 90–98.
15. 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 кн. Кн. 2. Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки / редкол.: С.А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2015. – С. 341–348.
16. Щербаков В.Г. Оплавление диффузионно-легированных сплавов из металлических дискретных металлоотходов для получения защитных покрытий ТВЧ // Литейные процессы: межрегион. сб. науч. тр. / под ред. В.М. Колокольцева. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2015. – Вып.14. – С. 15–23.
17. 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 кн. Кн. 1. Материаловедение / редкол.: С.А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2016. – С. 278–286.
18. Саратовкин Д.Д. Дендритная кристаллизация // ГНТИЛ по черн. и цв. мет.-ии. – 1957. – 129 с.
19. Залкин В.М. Природа эвтектических сплавов и эффект контактного плавления. – М.: Металлургия, 1987. – 152 с.
20. 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.

21. 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.
22. Многофункциональная научно-исследовательская установка индукционного нагрева сталей и сплавов / В.М. Константинов и [др.] // *Металлургия: республ. межвед. сб. науч. трудов.* – Минск: БНТУ, 2015. – Вып. 36 - С. 255-262.
23. Таран Ю.Н., Мазур В.И. Структура эвтектических сплавов. – М.: *Металлургия*, 1978. – 312 с.

УДК 621.74.011

**Р.Д. Габбасов, Б.А. Кулаков, В.К. Дубровин**

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

### **ПОВЕДЕНИЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО ТИТАН-АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА ПРИ НАГРЕВЕ И ОХЛАЖДЕНИИ\***

Интерметаллидные титан-алюминиевые сплавы обладают высокой удельной прочностью, жесткостью, сопротивлением ползучести, жаростойкостью при повышенных температурах. Однако получение литых деталей из данных сплавов затруднено вследствие недостатка данных об их технологических свойствах.

Измерение термического расширения при нагреве и охлаждении и определение температур фазовых превращений интерметаллидного титан-алюминиевого сплава TNM-B1 проводили на dilatометре DIL 402C немецкой фирмы NETZCH, приведенном на рис.1.

---

\*Работа выполнена в рамках программы «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («УМНИК-2015») в номинации «Современные материалы и технологии» по теме «Разработка материалов и технологии производства ответственных литых деталей на основе титан-алюминиевых интерметаллидов».

© Габбасов Р.Д., Кулаков Б.А., Дубровин В.К., 2016