

ДИФФУЗИОННО-ЛЕГИРОВАННЫЕ СПЛАВЫ ИЗ ЧУГУННЫХ ОТХОДОВ С ПОВЫШЕННОЙ НАПЛАВЛЯЕМОСТЬЮ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

В.Г. Щербаков

Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь

Изучены и описаны особенности технологии изготовления диффузионно-легированных сплавов из металлических отходов производства для индукционной наплавки с повышенными технологическими свойствами. Предложена комплексная технология изготовления диффузионно-легированных сплавов для индукционной наплавки, включающая обработку в подвижных порошковых насыщающих средах и последующее кратковременное высокотемпературное воздействие для образования эвтектических структур в сплаве. Установлено, что использование сплавов для наплавки, полученных с помощью такой обработки, позволяет при сохранении необходимой твердости и износостойкости защитных покрытий снизить пористость и продолжительность формирования слоя.

Ключевые слова: диффузионное легирование, индукционная наплавка, металлические отходы производства, наплавляемость, износостойкость

DIFFUSIVELY ALLOYED MATERIALS MADE OF CAST-IRON DISCARD WITH INCREASED SURFACING PROPERTIES FOR OBTAINING A WEAR-RESISTANT COATINGS USING INDUCTION HARD-FACING PROCESSES

V.G. Shcherbakou

¹Belarusian National Technical University,
Minsk, Republic of Belarus

The article reveals some technological peculiarities of obtaining a high-tech diffusively alloyed material made of metal discard for induction hard-facing processes. A new technology for obtaining a diffusively alloyed material for induction hard-facing processes based on treatment in fluidized powder mixtures and further short-term high temperature processing with formation of eutectic structures is described in the present work. It is shown that above-

mentioned processing allows to decrease porosity and operational time providing at the same time the necessary parameters of hardness and wear resistance for obtained layer.

Keywords: diffusion alloying, induction hard-facing, metal wastes, surfacing, wear-resistance

E-mail: vg.stcherbakov@bntu.by

Введение

За более чем 25 лет авторами [1–5] исследована и подробно описана технология, связанная с получением диффузионно-легированных (ДЛ) сплавов из металлических порошков, в том числе и отходов производства. ДЛ сплавы применяют при упрочнении деталей, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания.

Разработаны новые самофлюсующиеся диффузионно-легированные бором порошки, содержащие от 4,4 до 13,4 масс % бора, частицы которых состоят из ядер исходных материалов – отходов производства дроби и боридных оболочек типа Fe_xB_y [5]. Диапазон применения новых материалов широк: самофлюсующиеся диффузионно-борированные порошки можно использовать как в технологиях восстановления и упрочнения деталей машин, так и для механической, в том числе финишной, обработки [1–2, 5].

Однако, работ, связанных с использованием ДЛ сплавов для индукционной наплавки, крайне мало [6–7], несмотря на то, что данный процесс формирования износостойких покрытий, по затратам удельной тепловой мощности, является одним из самых низкоэнергозатратных [3]. Основной проблемой при индукционной наплавке ДЛ сплавов является наличие тугоплавкой боридной оболочки. Тугоплавкость зависит от химического состава основного сплава. Так в сплавах на железной основе, оболочка состоит из боридов железа, а в легированных сплавах в оболочке присутствуют более тугоплавкие бориды. Согласно [8], в настоящее время, разработано несколько сот сплавов для индукционной наплавки. Химический состав сплавов изменяется от железо-углеродистых, с концентрацией легирующих элементов в интервале 1,5...2 %, до сплавов на основе никеля, кобальта и вольфрама с содержанием легирующих элементов до 90...96 %. Однако, как отмечено в работе [6] основными недостатками традиционных сплавов для защитных покрытий (порошков, проволок, наплавочных электродов) является ограниченность номенклатуры, универсальность и избыточность свойств. Существенным недостатком данных сплавов является их импортность и высокая стоимость, а также тот факт, что большинство из них были разработаны 10...50 лет назад и в настоящий момент они не отвечают современным экономическим и техническим требованиям. Согласно авторам [1–2] необходимо не назначать сплавы из ограниченного, а в ряде случаев устаревшего перечня серийно выпускаемых, а оперативно проектировать и изготавливать ограниченные партии высокоэффективных сплавов для конкретных производственных ситуаций.

Несмотря на всю разработанную авторами [1–5] гамму ДЛ сплавов для наплавки и напыления, традиционными сплавами для формирования износостойких покрытий индукционной наплавкой являются сплавы на никелевой и на железной основе типа Сормайт и ФБХ-6-2 [3].

Анализ литературных данных и собственные исследования автора [8–13], позволили предложить способ структурообразования в ДЛ сплавах, заключающийся в образовании эвтектических структур, за счет эффекта контактного эвтектического плавления, при кратковременной обработке концентрированными источниками тепла, способствующих повышению наплавляемости сплава при индукционной наплавке.

Материалы, оборудование и методики исследований

В качестве исходных сплавов для исследований были выбраны отходы (рис. 1) чугунной дроби ДЧЛ 08, образующиеся при дробеструйной обработке деталей и ИЧХ28Н2, образующихся при электроэрозионной обработке отливок из высокохромистого чугуна (табл. 1)

Табл. 1

Химический состав исследуемых металлических отходов производства

Сплав	Концентрация элементов, % масс								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe	Cu	S	P
ДЧЛ 08	3,25	0,44	0,361	0,189	0,122	осн.	0,148	0,06	0,03
ИЧХ28Н2	2,8–3,0	0,5–1,5	1,0	25,0–30,0	1,0–3,0	осн.	–	0,08	0,1

Фракционный анализ дроби проводили с помощью набора сит с различным размером отверстий, согласно ГОСТ 18 318-94. Так как дисперсность сплава для индукционной наплавки, согласно [8] находится в интервале 0,2...1,0 мм исследован гранулометрический состав исходных партий сплава. Установлено, что среднее содержание годной фракции для индукционной наплавки размерами 200...630 мкм составляет более 73 % для дроби ДЧЛ 08 и более 68 % для дроби ИЧХ28Н2.

Исходная микроструктура чугунной дроби ДЧЛ 08 представляет собой мелкодисперсный ледебурит с мелкими включениями сорбита и троостита отпуска, а также карбидную фазу, входящую в состав эвтектики. Исходная дробь ИЧХ28Н2 представляет собой высокохромистый чугун, структура которого в литом состоянии представлена перлитной составляющей (α -твердый раствор + карбиды хрома) и эвтектикой (аустенит + карбиды хрома). В структуре выявлены карбиды хрома, следы цементита, а также остаточного аустенита в количестве более 50 %. Данная структура формируется в процессе электроэрозионной обработки при расплавлении приповерхностных микрообъемов чугуна, частицы которого попадают в холодный электролит и кристаллизуются с высокой скоростью.



Рис. 1. Внешний вид металлических отходов производства:
а – чугунная дробь ДЧЛ 08; б – чугунная дробь ИЧХ28Н2

Для ДЛ использовали карбид бора (B_4C) и борлирующие смеси, разработанные в НИЛ упрочнения стальных изделий БНТУ [14]. ДЛ чугунных сплавов проводили на специальной установке [15]. Соотношение количества насыщающей смеси к насыщаемому сплаву при борировании составляло 1:10 масс. Температура ДЛ чугунной дроби изменялась в интервале 900...1000 °С, продолжительность обработки составляла, в среднем, 60 мин.

Индукционную наплавку ДЛ сплавов проводили на установках ВЧГ2-100/0,066 и ФТИ-40/10-50 [16]. Упрочняемым материалом являлись пластины из углеродистой (Сталь 40) и марганцовистой (Сталь 65Г) сталей. Продолжительность наплавки контролировали визуально по цвету свечения нагретого сплава, моменту образования жидкой ванны расплава и с помощью пирометра “Compact” CTLaser-2МН-СF4.

Шлифы для микроанализа вырезали с использованием отрезных машин с жидкостным охлаждением и изготавливали по стандартным методикам. Анализ внешнего вида покрытий проводили с помощью микроскопа стереоскопического СМ 0655-Т с цифровой камерой. Анализ микроструктуры проводили на металлографических микроскопах МИ-1 и Leica DM2 500 Р с цифровой камерой при увеличениях $\times 100$, $\times 200$, $\times 500$ и $\times 1000$. Для выявления микроструктуры использовали стандартные металлографические реактивы. Твердость и микротвердость ДЛ сплавов и покрытий измеряли используя микротвердомер ПМТ-3 и твердомер ТК-2М.

Химический состав ДЛ сплавов определяли микрорентгеноспектральным анализом на сканирующем электронном микроскопе VEGA II LMU с микроанализатором INCA Energy 350 (фирма Oxford Instruments, Англия). Фазовый состав анализировали на дифрактометре ДРОН-2.0 в монохроматизированном кобальтовом ($\text{CoK}\alpha$) излучении. Рентгеновскую съемку осуществляли по Брэггу-Брентано в сканирующем режиме с шагом $2\theta = 0,1^\circ$ при напряжении 30 кВ и анодном токе 16 мА.

Испытания образцов на абразивное изнашивание проводили в среде незакрепленного абразива (речной песок фракцией 315...630 мкм) в специальной установке на базе лабораторных бегунов.

Кратковременную высокотемпературную обработку ДЛ сплавов проводили на универсальной плазменной установке УПУ-3Д ($I = 330...350$ А, $U = 75$ В, азот), установке для дуговой сварки в среде защитных газов с вольфрамовым электродом ($I = 30...35$ А, $U = 22...25$ В) и на установке с двумя графитовыми электродами [17].

Наплавляемость ДЛ сплавов подвергнутых предварительной кратковременной высокотемпературной обработке анализировали на металлических пластинах из низкоуглеродистой стали (Ст 2), по стандартным режимам индукционной наплавки с помощью установки ФТИ-40/10-50.

Диффузионное легирование чугунных отходов производства

Установлено, что при ДЛ чугунной дроби ДЧЛ 08 и ИЧХ28Н2 во вращающихся контейнерах на установке с использованием непрерывно-последовательного режима насыщения с рекомендованными температурно-временными параметрами обработки ($t = 900 \pm 50$ °С, $\tau = 60 \pm 5$ мин) формируются диффузионные слои толщиной 80...120 мкм и микротвердостью равной 12 000...14 000 МПа. Циклический режим ДЛ позволяет обеспечить гарантированную повторяемость результатов в процессе получения ДЛ сплавов из металлических отходов чугунной дроби ДЧЛ 08 и ИЧХ28Н2 для индукционной наплавки размером 200...630 мкм и концентрацией в ДЛ сплаве бора в интервале 2...4 % мас.

Существующая производительность разработанной установки для ДЛ металлических порошков составляет 0,8...1,0 кг/час, что является недостаточным для промышленного выпуска наплавочных сплавов. Для повышения производительности установки дополнительно было проведено исследование оптимизации температурно-временных параметров насыщения и их влияние на стабильность получаемых результатов.

Из-за особенностей конструкции установки изменять скорость вращения контейнеров не целесообразно, также, согласно [18] рекомендованная скорость вращения при насыщении составляет 50 ± 5 об/мин. Ранее установлено, что для получения

ДЛ сплавов с 2...4 % мас. бора необходимо осуществлять насыщение при температурах 900 ± 50 °С и продолжительностью 60 ± 5 мин. Автором предложена замена теплоизолирующих элементов на дополнительные контейнеры, выполняющие двойную задачу – теплоизоляцию по зонам нагрева при ДЛ и повышение количества обрабатываемого сплава. Установлено, что при получении ДЛ сплавов из отходов чугунной дроби с содержанием бора в интервале 2...4 % толщина диффузионных слоев должна быть в интервале 50...100 мкм. При сохранении заданной толщины диффузионного слоя темп толкания можно сократить до 45...55 минут. При ДЛ с использованием трех контейнеров и теплоизолирующих элементов сокращение темпа толкания с 60 мин до 50...57 мин повышает производительность установки до 1,1...1,5 кг/час, с сохранением толщины диффузионного слоя в интервале 60...90 мкм. При ДЛ с использованием трех контейнеров и двух дополнительных контейнеров вместо теплоизолирующих элементов с сокращением темпа толкания с 60 мин до 33...42 мин производительность возрастает до 1,3...1,7 кг/час, с сохранением толщины диффузионного слоя в интервале 50...75 мкм.

Таким образом, установлено, что рост производительности установки для ДЛ возможен за счет использования дополнительных контейнеров и сокращения темпа толкания. Использование пяти контейнеров и сокращение темпа толкания до 35...40 мин, при сохранении толщины диффузионного слоя в интервале 50...90 мкм, повышает производительность установки для ДЛ в 1,2...1,7 раза.

Количественная оценка образования эвтектических структур в ДЛ сплавах при оплавлении концентрированными источниками энергии

После оплавления ДЛ сплавы из чугунной дроби имеют сложный фазовый состав (рис. 2) и данные рентгеноструктурного анализа могут быть неполными и количественную оценку образования эвтектических структур в ДЛ сплавах целесообразно дополнить с помощью микродюроспектрального анализа [19].

Известно, что микротвердость высокобористой фазы FeB составляет 1850...1950 HV, микротвердость низкобористой фазы Fe₂B – 1505...1680 HV, а микротвердость эвтектики, состоящей из α-твердого раствора на основе железа и фазы Fe₂B – 440...580 HV [20]. Анализ микротвердости по сечению ДЛ сплава до и после оплавления с различной силой тока и сравнение с результатами металлографического анализа позволяет достаточно точно судить о концентрации эвтектических структур в сплаве [19]. После ДЛ микротвердость по сечению сплава неоднородна и на поверхности сплава составляет 10 000...16 000 МПа, за счет наличия боридного диффузионного слоя, а микротвердость сердцевины составляет 4000...6000 МПа, так как за счет длительной высокотемпературной обработки произошло разупрочнение сплава.

Анализ изменения микротвердости по сечению ДЛ сплава с увеличением силы тока при кратковременной обработке концентрированными источниками энергии показал, что при оплавлении с силой тока 50...70 А на поверхности и в приповерхностном слое ДЛ сплава происходит незначительное снижение микротвердости за счет образования локальных участков с эвтектической структурой. При повышении силы тока до 70...100 А в ДЛ сплаве образуется сплошная эвтектическая прослойка между металлическим ядром и диффузионным слоем, а при оплавлении с силой тока в интервале 150...200 А происходит рост микротвердости ядра и снижение микротвердости на поверхности а счет образования эвтектических структур с микротвердостью 8000 ...9000 МПа.

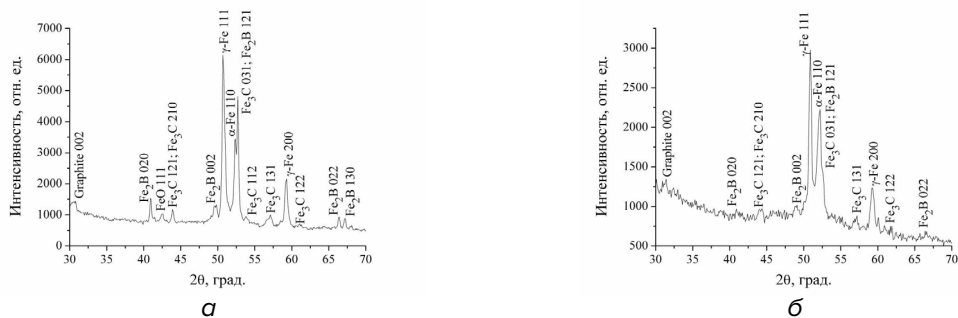


Рис. 2. Диффрактограммы ДЛ сплавов после оплавления:
 а – ДЛ сплав из чугунной дроби ДЧЛ 08; б – ДЛ сплав из чугунной дроби ИЧХ28Н2

Автором предложен механизм (рис. 3) структурообразования в ДЛ сплавах из чугунных отходов, за счет эффекта контактного эвтектического плавления, при кратковременной обработке концентрированными источниками энергии.

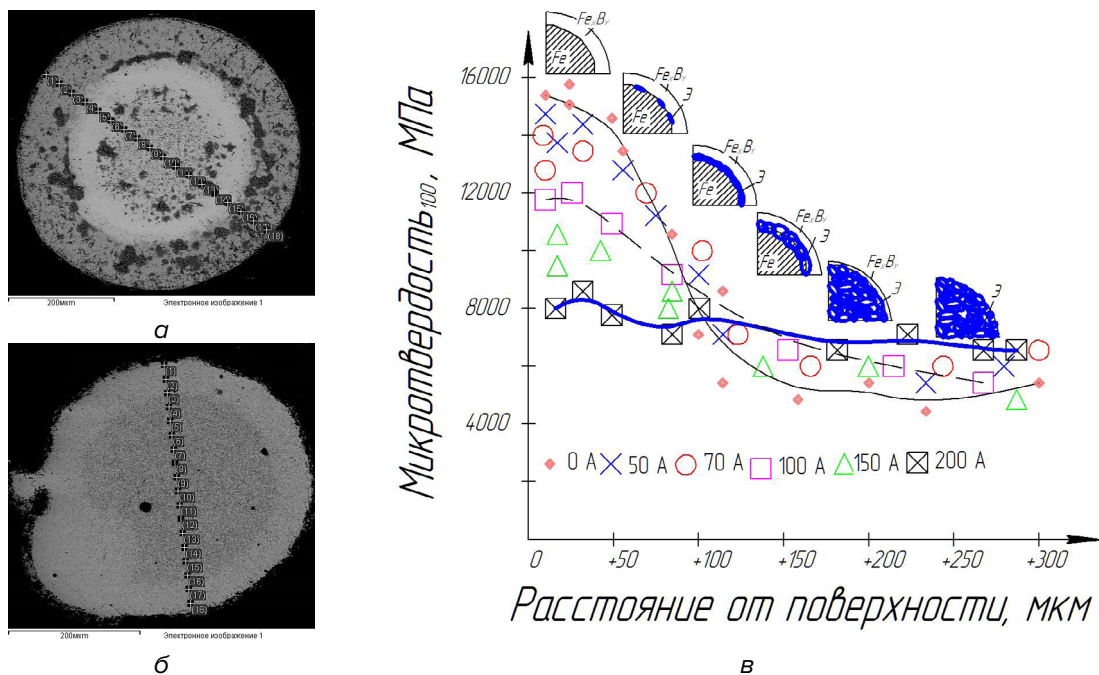


Рис. 3. Структурообразования в ДЛ сплавах при оплавлении:
 а – исходный ДЛ сплав; б – ДЛ сплав после оплавления с силой тока 150...200 А;
 в – схема оплавления тугоплавкой боридной оболочки в ДЛ сплавах (0 ...200 А – сила тока при оплавлении, Э – эвтектические участки, образованные за счет эффекта контактного эвтектического плавления, Fe_xB_y – диффузионный боридный слой, Fe – чугунное «ядро» в ДЛ сплаве)

Исследование химического состава ДЛ сплава из высокохромистого чугуна фиксирует изменение концентрации легирующих элементов после оплавления. В исходном ДЛ сплаве средняя концентрация Cr составляет 15,46 %, а Ni – 0,37 %. После оплавления средняя концентрация Cr составляет 10,65 %, а Ni – 0,26 %. Повышенное содержание Cr и Ni на границе диффузионный слой – металлическая основа и в ядре обусловлено диффузией элементов к центру в процессе насыщения бором при ДЛ. Равномерное распределение Cr и Ni по сечению после оплавления обусловлено расплавлением боридной оболочки и последующей кристаллизацией с образованием эвтектических структур в сплаве.

Анализ микроструктуры и микротвердости ДЛ сплавов после оплавления концентрированными источниками энергии позволяет прогнозировать количество эвтектических структур в ДЛ сплаве (табл. 2) и подвергать дополнительной обработке ДЛ сплавы перед индукционной наплавкой.

Табл. 2

Количество эвтектической составляющей в ДЛ сплаве после оплавления

Режим	Ток, А	Фазовый состав сплава	% эвтектики, об.
1	50	$Fe_2B + \text{Э}(\alpha\text{-тв.р-р} + Fe_2B)$	5...10
2	70	$Fe_2B + \text{Э}(\alpha\text{-тв.р-р} + Fe_2B)$	15...20
3	100	$Fe_2B + \text{Э}(\alpha\text{-тв.р-р} + Fe_2B)$	30...40
4	150	$Fe_2B + \text{Э}(\alpha\text{-тв.р-р} + Fe_2B)$	60..70
5	200	$\text{Э}(\alpha\text{-тв.р-р} + Fe_2B)$	90...100

Оценка влияния количества эвтектической составляющей в ДЛ сплаве на наплавляемость, за счет анализа времени образования жидкой ванны при индукционной наплавке по стандартным режимам позволила установить, что без предварительного оплавления на поверхности детали формируется несплошное дефектное покрытие с отсутствием участков сплавления с основным металлом (рис. 4, а). На дефектность наплавленного покрытия, как описано ранее, оказывает существенное влияние концентрация тугоплавких боридов в диффузионном слое, а их наличие, в свою очередь, приводит к образованию нерасплавившихся частиц сплава и резкому снижению эксплуатационных свойств покрытия. Индукционная наплавка ДЛ сплавов после оплавления по тем же режимам, формирует на поверхности детали сплошные покрытия с минимальной пористостью (рис. 4, б), так как известно, что эвтектика железо – бор имеет температуру плавления 1140...1170 °С [8] (по другим данным [20] 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.

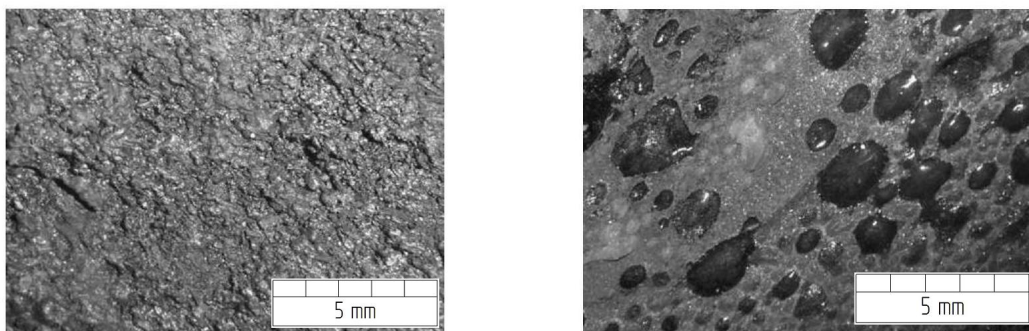


Рис. 4. Внешний вид наплавленного покрытия из чугунных ДЛ сплавов:
 а – ДЛ сплав без оплавления; б – ДЛ сплав после оплавления

Установлено, что с повышением количества эвтектических структур в ДЛ сплаве после оплавления, снижается продолжительность временного интервала образования жидкой ванны расплава (табл. 3) при формировании износостойких покрытий индукционной наплавкой.

Изменяя силу тока при оплавлении ДЛ сплавов из чугунной дроби ДЧЛ 08 и ИЧХ28Н2 в интервале 50...200 А в каждой отдельной частице ДЛ сплава, можно сформировать эвтектические структуры, концентрация которых изменяется в интер-

вале 5...100 %, обладающие пониженной температурой плавления. Предварительное оплавление ДЛ сплавов с силой тока 50...200 А снижает время образования жидкой ванны расплава при индукционной наплавке за счет формирования 5...10 % эвтектических структур в сплаве на 15...17 %. Оплавление ДЛ сплавов с силой тока в 200 А формирует 90...100 % эвтектических структур и снижает время образования жидкой ванны при индукционной наплавке на 61...65 %.

Табл. 3

Продолжительность индукционной наплавки ДЛ сплава после оплавления

Режим	Сила тока, А	% эвтектических структур в ДЛ сплаве, объемн.	Время до начала образования жидкой ванны расплава, с	Снижение времени образования жидкой ванны, %
0	0	0	60...65	0
1	50	5...10	50...55	15...17
2	70	15...20	45...50	23...25
3	100	30...40	35...40	38...41
4	150	60...70	30...35	46...50
5	200	90...100	20...25	61...65

Оптимизация режимов оплавления ДЛ сплавов из чугунных отходов и структурообразование износостойких покрытий при индукционной наплавке

Анализ микроструктуры, микротвердости, химического и фазового состава, количества эвтектической составляющей в сплаве позволил предложить интервалы рациональных режимов (рис. 5) комплексной обработки для формирования защитных покрытий индукционной наплавкой из ДЛ сплавов.

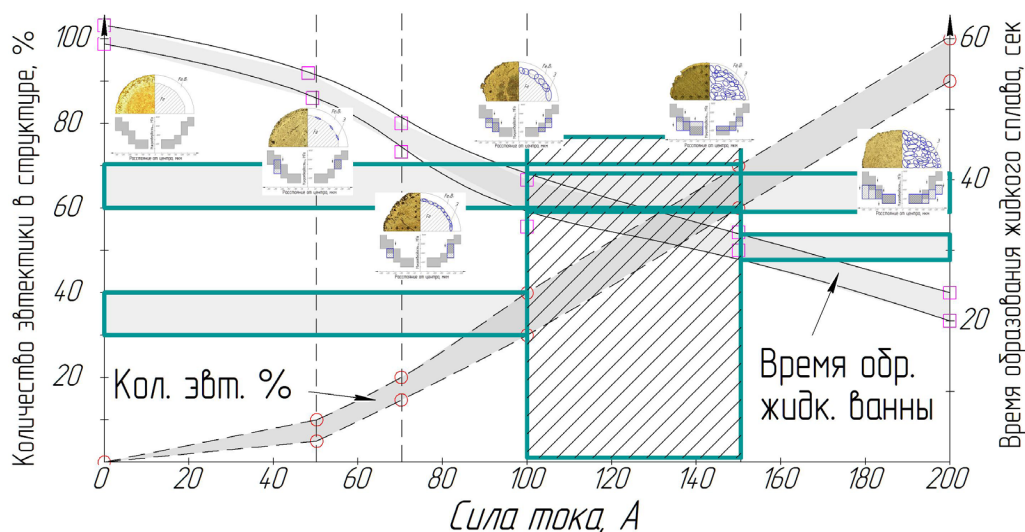


Рис. 5. Режимы комплексной обработки ДЛ сплавов для формирования защитных покрытий индукционной наплавкой. Заштрихованная область – рекомендуемые параметры оплавления с силой тока 100...150 А, для формирования в структуре ДЛ сплава областей с концентрацией эвтектических структур в интервале 30...70 % и с временем расплавления 30...40 с. В верхней области рисунка – схемы структурообразования в ДЛ сплавах при оплавлении

Для получения ДЛ сплава, с минимальным временным интервалом образования жидкой ванны расплава равным 20...25 с, за счет наличия 90...100 % эвтектических

структур, оплавление проводят при 150...200 А. При оплавлении с 50...100 А в ДЛ сплаве будут присутствовать эвтектические структуры с концентрацией 5...20 %, а временной интервал образования жидкой ванны расплава составит 45...55 с. Оплавление с силой тока в интервале 50...100 А формирует минимальную концентрацию эвтектических структур в ДЛ сплавах, что не достаточно для формирования покрытий с минимальной пористостью и в слое будут присутствовать отдельные не расплавившиеся частицы исходного ДЛ сплава. При оплавлении с силой тока 150...200 А энергозатраты на формирование эвтектических структур превышают общие энергозатраты и экономически нецелесообразны. Для формирования износостойких покрытий индукционной наплавкой ДЛ сплавы из чугунной дроби ДЧЛ 08 и ИЧХ28Н2 необходимо предварительно подвергать обработке концентрированными источниками энергии с силой тока 100...150 А для формирования в сплавах 30...70 % эвтектических структур, наличие которых приводит к снижению интервала образования жидкой ванны расплава до 30...40 с, что составляет 38...50 % от общего времени наплавки.



Рис. 6. ДЛ сплавы для индукционной наплавки после оплавления:
 а – ДЛ сплав после оплавления с 100 А; б – ДЛ сплав после оплавления с 150 А

Для получения защитных покрытий индукционной наплавкой из ДЛ сплавов на основе чугунной дроби ДЧЛ 08 и ИЧХ28Н2 необходимо проводить ДЛ в подвижной порошковой насыщающей среде при температуре 900...950 °С в течение 60 мин и последующую кратковременную высокотемпературную обработку концентрированными источниками энергии с силой тока 100...150 А. Данная комплексная обработка формирует в ДЛ сплаве за счет эффекта контактного эвтектического плавления 30...70 % (рис. 6) эвтектических структур с пониженной температурой плавления и при последующей наплавке сокращает время формирования жидкой ванны расплава на 40...60 % по сравнению с ДЛ сплавами без оплавления.

В структуре слоя после индукционной наплавки с режимами оплавления 100...150 А присутствуют первичные карбиды (рис. 7–8).

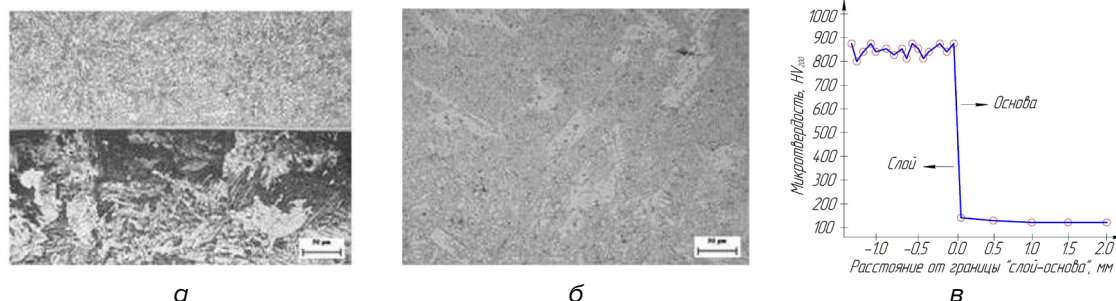


Рис. 7. Характерные микроструктуры и распределение твердости между слоем и основой покрытий из ДЛ чугунной дроби ДЧЛ 08:
 а – основа–слой; б – слой; в – распределение микротвердости

Твердость покрытий из ДЛ сплавов на основе чугунной дроби ДЧЛ 08 и ИЧХ28Н2 составляет 830 HV и 920 HV, соответственно. Данная твердость обусловлена наличием в наплавленной структуре легированных боридов железа, боридов хрома, борцементита и легированного хромом и никелем борцементита. Пористость в слоях незначительная и составляет порядка 2...3 %. У линии сплавления металл имеет четко выраженную дендритную структуру.

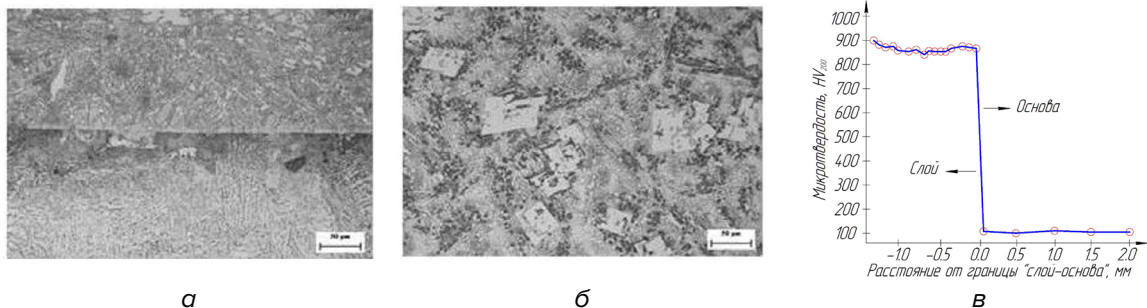


Рис. 8. Характерные микроструктуры и распределение твердости между слоем и основой покрытий из ДЛ чугунной дробИ ИЧХ28Н2: а – основа–слой; б – слой; в – распределение микротвердости

Исследование износостойкости покрытий из ДЛ сплавов на основе чугунной дробИ ДЧЛ 08 и ИЧХ28Н2 показало, что износостойкость данных покрытий в 2,5...3 раза выше, чем у стали 45, подвергнутой закалке в воде с последующим низким отпуском и в 1,1...1,3 раза выше, чем у покрытия из наплавочного сплава типа Сормайт.

Таким образом, установлены температурно-временные параметры комплексной технологии изготовления ДЛ сплавов из чугунной дробИ ДЧЛ 08 и ИЧХ28Н2 для формирования износостойких покрытий индукционной наплавкой. Данная обработка включает ДЛ в подвижных порошковых средах и последующее оплавление ДЛ сплавов с силой тока 100...150 А. Полученные покрытия обладают минимальной пористостью (2...3 %), твердостью 830...920 HV и износостойкостью в 2,5...3 раза выше, чем у термообработанной стали 45 и в 1,1...1,3 раза выше, чем у защитных покрытий из наплавочного сплава типа Сормайт.

Заключение

1. Изучено диффузионное легирование (борирование) отходов чугунной дробИ ДЧЛ 08 и ИЧХ28Н2 с использованием запатентованной вращающейся электрической печи периодического действия. Микротвердость в ДЛ сплавах из чугунной дробИ ДЧЛ 08 и ИЧХ28Н2 после обработки достигает значений в 13 000...14 000 МПа для ДЧЛ 08 и 11 000...12 000 МПа для ИЧХ28Н2. Толщина диффузионных слоев после насыщения составляет 60...100 мкм для ДЧЛ 08 и 40...70 мкм для ИЧХ28Н2. Установлено, что при обработке металлических отходов, размером 200...630 мкм, в подвижной насыщающей среде карбида бора для получения в сплаве 2...4 % бора необходимо обработку осуществлять при температурах не выше 950 ± 20 °С и продолжительностью обработки не более $1 \pm 0,2$ часа.

2. Изучен процесс структурообразования в ДЛ сплавах при кратковременной высокотемпературной обработке. При оплавлении ДЛ сплавов с силой тока 50...70 А на поверхности и в приповерхностном слое снижается микротвердость за счет образования локальных участков с эвтектической структурой. Рост силы тока до 70...100 А способствует образованию сплошной прослойки эвтектического типа между металлическим ядром и диффузионным слоем. Оплавление с силой тока в интервале 150...200 А приводит к росту микротвердости ядра и снижению микротвердости по-

верхностного слоя за счет эффекта контактного эвтектического плавления и образованию эвтектических структур с микротвердостью 8000...9000 МПа.

3. Проведена оценка влияния количества эвтектических структур в ДЛ сплаве после оплавления на продолжительность времени образования жидкой ванны расплава при формировании износостойких покрытий индукционной наплавкой. Изменение силы тока при оплавлении в интервале 50...200 А приводит к образованию в каждой отдельной частице ДЛ сплава эвтектических структур, концентрация которых изменяется в интервале 5...100 %, с пониженной температурой плавления, чем исходный ДЛ сплав. При оплавлении с силой тока 50 А в ДЛ сплаве формируется 5...10 % эвтектических структур и время до образования жидкой ванны расплава снижается на 15...17 %, а при силе тока равной 200 А формируется 90...100 % эвтектических структур и время образования жидкой ванны расплава снижается на 61...65 %.

4. Комплексная обработка, заключающаяся в диффузионном легировании и последующем оплавлении ДЛ сплавов из чугуновых отходов позволяет сократить время образования жидкой ванны расплава при индукционной наплавке с 120 с до 85 с и получить износостойкие слои толщиной 0,9...1,3 мм с минимальной пористостью (2...3 %) и твердостью 830 НВ и 920 НВ. Износостойкость полученных покрытий в 2,5...3 раза выше, чем у термообработанной стали 45 и в 1,1...1,3 раза выше, чем у покрытий из наплавочного сплава типа Сормайт.

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., 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. Пантелеенко Ф. И. Восстановление деталей машин: Справ. / Ф. И. Пантелеенко [и др.]; под общ. ред. В. П. Иванова. М.:Машиностроение, 2003. 672 с.
4. 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.
5. Современные перспективные материалы / Под редакцией В.В. Клубовича – Витебск: Изд-во УО «ВГТУ», 2011. – 562 с.
6. Константинов, В.М. Диффузионно-легированные сплавы для защитных покрытий: дис. ...докт. техн. наук : 05.02.01 / В.М. Константинов. – Минск, 2008. – 474 л.
7. Жабуренок, С.Н. Повышение долговечности плужных лемехов наплавкой диффузионно-легированными сплавами из чугуновой стружки и последующей термической обработкой: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01 / С.Н. Жабуренок; ПГУ – Новополоцк, 2004. – 20 с.
8. Ткачев В. Н. Индукционная наплавка твердых сплавов / В. Н. Ткачев [и др.]; под общ. ред. В. Н. Ткачева. М.: Машиностроение, 1970. 183
9. Саратовкин, Д.Д. Дендритная кристаллизация / Д.Д. Саратовкин // ГНТИЛ по черн. и цв. мет-ии, 1957. – 129 с.
10. Залкин, В.М. Природа эвтектических сплавов и эффект контактного плавления / В.М. Залкин // М.: Металлургия, 1987. – 152 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. научных трудов. В 3 кн. Кн. 2. Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки / редколлегия: С.А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2015. – 360 с.
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. научных трудов. В 3 кн. Кн. 1. Материаловедение / редколлегия: С.А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2016. – С. 278–286.
13. Перспективные материалы и технологии : монография. В 2-х т. Т. 2 / А.В. Алифанов [и др.]; под ред. В.В. Клубовича. – Витебск: УО «ВГТУ», 2017. – 509 с.
14. Научно-исследовательская лаборатория упрочнения стальных изделий [<http://www.bntu.by/mtf-nilusi.html>]

15. 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.
16. Константинов, В. М. Многофункциональная научно-исследовательская установка индукционного нагрева сталей и сплавов / В. М. Константинов и [др.] // *Металлургия : республиканский межведомственный сборник научных трудов*. – Минск : БНТУ, 2015. – Вып. 36 – С. 255–262.
17. Установка для обработки металлического порошка : пат.№10 051 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.
18. 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.
19. Девойно, О.Г. Технология формирования износостойких поверхностей лазерным легированием / О.Г. Девойно. – Мн. УП «Технопринт», 2001. – 180 с.
20. Крукович, М.Г. Пластичность борированных слоев / М.Г. Крукович, Б.А. Прусаков, И.Г. Сизов. – М.: ФИЗМАТЛИТ. 2010. – 384 с.

REFERENCES

1. 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, Tehnoprnt Publ., 2001, 300 p. (in Russian)
2. Voroshnin L. G., Panteleenko F. I., Konstantinov V. M. Teorija i praktika poluchenija zashhitnyh 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)
3. Panteleenko F. I. Vosstanovlenie detalej mashin [Restoration of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003, 672 p. (in Russian)
4. Panteleenko F. I. Iznosostoykie gazotermicheskie pokrytiya iz diffuzionno-legirovannykh poroshkov na osnove chugunnoj struzhki: monografiya [Wear-resistant gas-thermal coatings from diffusion-alloyed powders based on cast-iron shavings] Minsk.: Tehnoprnt, 2005, 146 p. (in Russian)
5. Klubovich V.V. Sovremennyye perspektivnyye materialy [Modern promising materials] Vitebsk: Publishing house of the VSTU, 2011, 562 p. (in Russian)
6. Konsantinov V.M. Diffuzionno-legirovannyye splavy dlja zashhitnyh pokrytij. Diss. Dokt. Techn. Nauk [Diffusion-alloyed alloys for protective coatings. Dr. techn. nauk]. Minsk, 2008, 474 p. (in Russian)
7. Zhaburonak S.N. Povyshenie dolgovechnosti pluzhnykh lemehov naplavkoy diffuzionno-legirovannyimi splavami iz chugunnoj struzhki i posleduyuschey termicheskoy obrabotkoy. Autoref. Diss. Kand. Techn. Nauk [The increase of ploughshare's longevity due hard-facing diffusely-alloyed materials on the cast iron chip base heat treatment]. Novopolotsk, PSU Publ., 2004, 20 p. (in Russian)
8. Tkachev V. N. Indukcionnaja naplavka tverdykh splavov [Induction hardfacing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970, 183 p. (in Russian)
9. Saratovkin D.D. Dendritnaja kristallizacija [Dendritic crystallization] GNTIL po chernoy i cvetnoy metallurgii, 1957, 129 p. (in Russian)
10. Zalkin V.M. Priroda jevtecticheskikh splavov i jeffekt kontaktnogo plavlenija [Nature of eutectic alloys and effect of contact fusion]. Moscow, Metallurgija Publ., 1987, 152 p. (in Russian)
11. Shcherbakou V.G. Predvaritelnaya vyisokotemperaturnaya obrabotka diffuzionno-legirovannykh splavov dlya indukcionnoy naplavki [Pre-treatment of high-diffusion alloyed alloys for induction welding. Modern methods and technology of materials and processing]. Minsk, FTI NAN Belarusi Publ., 2015, pp. 341–348. (in Russian)
12. Shcherbakou V.G. Nekotorye osobennosti formirovaniya iznosostoykikh pokrytity indukcionnoy naplavkoy diffuzionno-legirovannyimi splavami iz metallicheskih othodov proizvodstva [Some features of formation of wear-resistant coatings induction welding diffusion-alloyed alloys of metal waste. Modern methods and technologies of creation and processing of materials]. Minsk, FTI NAN Belarusi Publ., 2016, pp. 278–286. (in Russian)
13. Perspektivnyye materialy i tehnologii [Promising materials and technologies] A.V. Alifanov [and others]; Ed. V.V. Klubovich. – Vitebsk: VSTU, 2017. – 509 p. (in Russian)
14. Research laboratory for hardening of steel products [<http://www.bntu.by/mtf-nilusi.html>] (in Russian)
15. Konstantinov V.M., Shtempel O.P., Scherbakou V.G. Vraschayushchayasya elektricheskaya pech dlya himiko-termicheskoy obrabotki syipuchego materiala [Rotating electric oven for chemical and thermal processing of bulk material]: pat. 15412 Rесп. Belarus, МПК7 F27B 7/14/ заявитель Белорусский национальный технический университет. – № а 20091415 ; заявл. 05.10.09 ; опубл. 28.02.12 // Афіцыйны бюл. / Nats. tsentr intelektual. ulasnasti . – 2012. №1. – p. 143. (in Russian)

16. Konstantinov V.M. Multifunktionalnaya nauchno-issledovatel'skaya ustanovka induktsionnogo nagreva staley i splavov [Multifunctional research installation for induction heating of steels and alloys]. Minsk, BNTU Publ., 2015, pp. 255–262. (in Russian)
17. Konstantinov V.M., Dashkevich V.G., Scherbakou V.G. Ustanovka dlya obrabotki metallicheskoj poroshki [Plant for processing metal powder] pat.N°10 051 Resp. Belarus, MPK B 22F 1/00 zayavitel' Belorusskiy natsionalnyy tehničeskij universitet. – N° u 20 130 804 ; zayavl. 08.10.2013 ; opubl. 30.04.2014 // Afitsiyiny byul. / Nats. tsentr intelektual. ulasnasti . – 2014. N°2. – p. 136. (in Russian)
18. Shtempel O.P. Intensifikatsiya diffuzionnogo legirovaniya metallicheskih poroshkov dlya zaschitnyh pokrytij v podvizhnyh poroshkovyih smesyah. Autoref. Diss. Kand. Techn. Nauk [Intensification of metal powder diffusion alloying for protective coating in mobile powder mixture]. Novopolotsk, PSU Publ., 2003, 23 p. (in Russian)
19. Devojno, O.G Tehnologiya formirovaniya iznosostoykih poverhnostey lazernym legirovanijem [The technology of formation of wear-resistant surfaces by laser alloying] Minsk, Technoprint Publ. 2001. 180 p. (in Russian)
20. Krukovich M.G., Prusakov I.G., Sizov B.A. Plastichnost' borirovannykh slojev [The plasticity of borated layers]. Moscow, FIZMATLIT, 2010, 384 p. (in Russian)

Статья поступила в редакцию в окончательном варианте 07.05.18