

**ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ДИФФУЗИОННОГО БОРИРОВАНИЯ НА  
МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ**

**Константинов В.М., Щербаков В.Г.**

*Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Беларусь, E-mail: v\_m\_konst@mail.ru, vg.stcherbakov@bntu.by*

Традиционными объектами химико-термической обработки (ХТО) являются тела, размеры которых намного превышают толщину диффузионного слоя. ХТО таких объектов проводится в целях повышения эксплуатационных свойств поверхности. Микрообъекты (с позиций ХТО) – это тела, линейные размеры которых сопоставимы с толщиной диффузионного слоя. Микрообъектами могут быть порошки, проволока малых диаметров, лист, фольга и микроизделия. Существенные различия целей ХТО микрообъектов, технологических схем и процессов структурообразования позволили выделить новое перспективное направление ХТО – термодиффузионное легирование микрообъектов [1]. Необходимость подобной дифференциации на микро- и макрообъекты обусловлена существенными различиями в диффузионных процессах, структурообразовании и технологических схемах реализации процессов ХТО. Вследствие вышеизложенного различные процессы ХТО микрообъектов в технической литературе принято называть диффузионным легированием (ДЛ) [1].

Диффузионно-легированные сплавы нашли широкое применение при упрочнении и восстановлении деталей машин и механизмов, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания. [2]. В ряде случаев кроме известных технологических свойств, к указанным порошкам предъявляются специфические требования по магнитным характеристикам. Примерами таких технологий нанесения покрытий являются индукционная, электроискровая наплавка, и др. [3]. Специфика указанных технологий подразумевает использование материалов с требуемой намагничиваемостью и магнитной проницаемостью. В данной работе была проведен анализ информации о магнитных свойствах диффузионно-легированных бором порошковых сплавах на стальной либо чугуновой основах.

Как известно, выше точки Кюри интенсивность теплового движения атомов ферромагнетика оказывается достаточной для разрушения его самопроизвольной намагниченности и изменения симметрии, в результате ферромагнетик становится парамагнетиком. Это приводит к резкому падению значения магнитной проницаемости с порядка  $10^2$ – $10^4$  до единиц [4]. Магнитомягкие сплавы (стали) лучше поддаются индукционному нагреву, чем магнитотвёрдые, так как у них коэрцитивная сила меньше [5]. По известным данным А.П. Гуляева, уменьшение размера зерна, наклёп, напряжения в решётке, фазовые превращения вызывают увеличение коэрцитивной силы, следовательно, размер дисперсность структуры и ее морфология являются факторами поведения сплава в магнитном поле (рис. 1).

Авторами ранее исследовано влияние температуры процесса и продолжительности выдержки при обработке на толщину, а, следовательно, и на концентрацию легирующих элементов в чугуновой дроби (рис. 2) [6-7]. При увеличении продолжительности диффузионного легирования от 60 до 120 мин, с постоянной температурой обработки, увеличение толщины диффузионного слоя составляет около 10...15 %, что при получении экономно диффузионно-легированных сплавов является нерациональным. Повышение температуры диффузионного легирования с 850...900 °С до 1000 °С, с сохранением постоянного времени обработки, способствует росту диффузионного слоя на 15...25%, однако концентрация легирующих элементов и стоимость готового сплава, с учетом энергозатрат, при производстве нивелируются.

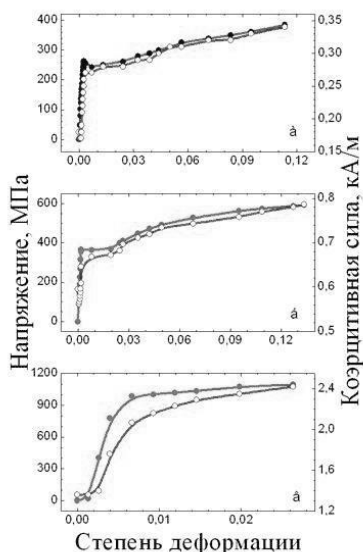
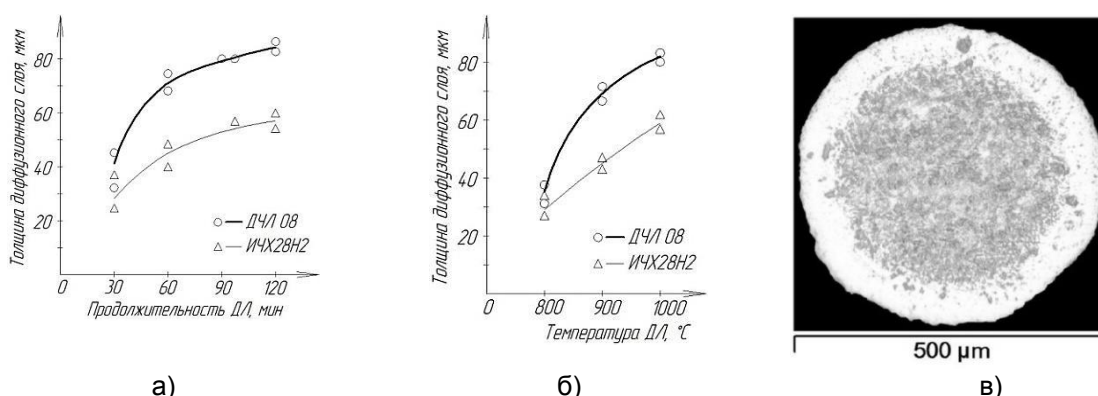


Рисунок 1 – Зависимость коэрцитивной силы от степени деформации и напряжения для конструкционных сталей [8]

Известно, что высокая коэрцитивная сила углеродистой стали получается после закалки при наличии мартенситной структуры. Наилучшие свойства получаются в сплаве, содержащем 0,8% С после закалки, оптимальная температура закалки 780...850 °С, закалка производится в воду или масло [8]. В порошковых материалах на коэрцитивную силу в значительной степени влияет диаметр частиц.



а) – Зависимость толщины слоя от продолжительности ДЛ;  
 б) – Зависимость толщины слоя от температуры ДЛ;  
 в) – Микроструктура диффузионно-легированной дроби ДЧЛ 08

Рисунок 2 – Температурно-временные зависимости диффузионного легирования металлических отходов чугунной дроби и микроструктура

Как известно, борирование снижает магнитную проницаемость углеродистых сталей и тем значительнее, чем больше толщина слоя [9]. Коэрцитивная сила боридов FeB и Fe<sub>2</sub>B оценивается величинами 1,9...2,1 и 2,8...3,1 Э соответственно. Точка Кюри борида FeB равна 685 °С. Борирование также увеличивает электросопротивление стали [10]. Однако авторами [11] исследованы фазовый и химический составы диффузионного боридного покрытия, нанесенного на штамповую сталь марки 4Х6МФС. Показано, что борирование стали изменяет форму петли магнитного гистерезиса, увеличивая значения коэрцитивной силы, максимальной дифференциальной магнитной проницаемости и остаточной индукции. С увеличением толщины боридного покрытия магнитные характеристики изменяются незначительно, а значения удельного электросопротивления возрастают.

Таким образом, наличие диффузионных боридных слоев и термическая обработка значительно изменяют магнитные характеристика стальных и чугунных

порошков, что является существенным фактором ряда упрочняющих технологий. Известные данные неполны и в ряде случаев, противоречивы.

Необходимы дальнейшие исследования в данной области с подробным анализом исходных материалов и корректных назначений режимов диффузионного легирования.

**Список литературы:**

1. Пантелеенко, Ф.И. Состояние и особенности диффузионного легирования порошков / Ф.И. Пантелеенко, В.М. Константинов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. - № 1. - С. 36–43.
2. Пантелеенко Ф.И., Константинов В.М. Теоретические основы и технологии получения защитных покрытий из диффузионно-легированных сплавов Перспективные материалы и технологии; под общ. ред. В.В. Клубовича. – 2008. – Витебск: Изд-во УО «ВТГУ» – Глава 9. - С. 187-214.
3. Акулович, Л.М. Технология и оборудование магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей различного профиля / Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев. – Минск: БГАТУ, 2013. – 372 с.
4. Обработка изделий машиностроения с применением индукционного нагрева [Текст]: научное издание / [А. И. Гордиенко и др.]; Национальная академия наук Беларуси, Физико-технический институт. - Минск: Беларуская навука, 2009. - 287 с.
5. Иванов В.Н., Фролов В.Я., Иванов Д.В. Индукционный нагрев металлов. Теория и практика. Учебное пособие. СПб. Изд Политехнического Института. -2008. -362 с.
6. Щербаков, В. Г. Некоторые особенности получения диффузионно-легированных сплавов для индукционной наплавки из дисперсных отходов стали и чугуна в подвижных порошковых смесях / В. Г. Щербаков // Металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов. – Минск: БНТУ, 2015. – Вып. 36 - С. 243-249.
7. Щербаков, В.Г. Диффузионно-легированные сплавы из металлических отходов производства с пониженной температурой плавления для формирования износостойких покрытий индукционной наплавкой токами высокой частоты / В.Г. Щербаков // Литье и металлургия. – 2016. – № 4 (85). – С. 89 - 96.
8. Гуляев, А.П. Материаловедение/А.П. Гуляев. М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
9. Дубинин Г.Н. Конструкционные, проводниковые и магнитные материалы / Г.Н. Дубинин, Ю.С. Авраамов. – М.: Машиностроение, 1973. – 296 с.
10. Борисенко Г.В. Химико-термическая обработка металлов и сплавов / Г.В. Борисенко, Л.А. Васильев, Л.Г. Ворошнин [и др.] / М.: Металлургия, 1981. -424 с.
11. Пугачева Н.Б. Влияние диффузионных боридных покрытий на электромагнитные свойства штамповой стали / Н.Б. Пугачева, С.М. Задворкина, Т.М. Быкова / Вопросы материаловедения, Санкт-Петербург, ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей», 2016. - № 3. - С. 66–73.