

**СУБАЧЕВ ЮРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ**

**ОЦЕНКА СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ И ДЕЙСТВУЮЩИХ  
НАПРЯЖЕНИЙ В ИЗДЕЛИЯХ ИЗ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ  
НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА МАГНИТНЫМИ МЕТОДАМИ**

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,  
веществ, материалов и изделий

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук  
Институте машиноведения Уральского отделения Российской академии наук и  
Научном центре порошкового материаловедения Пермского государственного  
технического университета.

Научный руководитель: член-корреспондент РАН,  
доктор технических наук, профессор  
Горкунов Эдуард Степанович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Корзунин Геннадий Семенович

доктор технических наук, доцент  
Поляков Андрей Петрович

Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук  
Институт металлургии Уральского отделения  
Российской академии наук, г. Екатеринбург.

Защита состоится «29» марта 2011 года в 16 часов на заседании диссер-  
тационного Совета Д 004.023.01 в Учреждении Российской академии наук  
Институте машиноведения УрО РАН по адресу: 620049, г. Екатеринбург,  
ул. Комсомольская, д. 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской  
академии наук Института машиноведения УрО РАН.

Ваш отзыв на автореферат, заверенный гербовой печатью, просим направ-  
лять ученому секретарю диссертационного совета по адресу: 620049,  
г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, д. 34, ИМАШ УрО РАН.  
Тел.: (343) 375-35-61, факс: (343) 374-53-30, e-mail: avk@imach.uran.ru

Автореферат разослан «   » февраля 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор

А.В. Коновалов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Увеличение в промышленно развитых странах объема изделий из конструкционных сталей, изготавливаемых по технологии порошковой металлургии, обусловлено высоким коэффициентом использования металла и сокращением трудозатрат на единицу готовой продукции по сравнению с традиционными технологиями литья, так как часто не требует дополнительной энергоемкой механической обработки изделий.

Высокое качество продукции порошковой металлургии в первую очередь должно обеспечиваться тщательным соблюдением технологической дисциплины на всех этапах производства. Однако из-за большого количества факторов, влияющих на свойства порошковых изделий на каждом технологическом этапе, качество готовой продукции может отличаться от требуемого. В связи с этим вопросы неразрушающего контроля структурного состояния и прочностных характеристик порошковых изделий на различных этапах производства являются актуальными.

Применение неразрушающих, в частности, магнитных методов контроля структурного состояния изделий порошковой металлургии, как в процессе их изготовления, так и в процессе эксплуатации способствует повышению надежности работы таких изделий. Задача контроля структурного состояния изделий из порошковых углеродистых сталей после спекания по их магнитным характеристикам в какой-то мере решена. Однако работ, посвященных магнитной структуроскопии термически обработанных и пластически упрочненных изделий из спеченных порошковых сталей, явно недостаточно. В имеющихся работах авторы затрагивают лишь отдельные вопросы этой большой проблемы. Исследований по оценке микронапряжений, упругих и пластических деформаций магнитными методами также очень мало. Хотя во всем мире со второй половины прошлого столетия разработке неразрушающих методов оценки микронапряжений в изделиях из литых сталей и действующих напряжений при их эксплуатации уделяется большое внимание.

Для контроля структурного состояния изделий из углеродистых порошковых сталей широкое распространение получили методы магнитной структуроскопии. Для порошковых сталей магнитные методы более предпочтительны поскольку позволяют реализовать контроль состояния материала по всему сечению изделия, а не в локальном участке или поверхностном слое, что характерно для многих неразрушающих методов контроля. Для порошковых материалов это имеет большое значение, поскольку они неоднородны в микрообъемах. Для оценки одноосных напряжений в сталях также лучше всего применимы магнитные методы, однако они требуют тщательного исследования влияния на результаты измерений различных факторов, таких как химический состав, структурное состояние, уровень микронапряжений и прочих.

В отличие от материалов, полученных по традиционной металлургической технологии, порошковые материалы характеризуются высокой дефектностью структуры (наличием пор, большого числа включений), что в значительной степени усложняет модельные представления о влиянии различных факторов на физико-механические свойства спеченных материалов.

Главенствующее значение при разработке подходов к оценке структуры, микронапряжений и прочностных свойств порошковых спеченных сталей по магнитным характеристикам необходимо уделить изучению влияния пористости на магнитные свойства.

**Целью** диссертационной работы является определение возможностей использования магнитных характеристик для оценки структуры, механических свойств и напряжений в изделиях из порошковых сталей при изготовлении и после упрочняющих обработок.

**Научная новизна** результатов исследований заключается в следующем.

1. Установлена принципиальная возможность оценки твердости и временного сопротивления изделий из порошковых материалов на основе железа по измерениям максимальной намагниченности и коэрцитивной силы (либо максимальной магнитной проницаемости) при варьировании как величины пористости, так и размеров пор.

2. Показана возможность определения с помощью коэрцитивной силы величины временного сопротивления изделий из углеродистых порошковых сталей после холодной прокатки, а также величины относительной деформации при прокатке с помощью коэрцитивной силы или максимальной намагниченности.

3. При одноосном растяжении порошковые материалы деформируются однородно, и коэрцитивная сила изменяется подобно тому, как это происходит у литых сталей, то есть, с образованием минимума вблизи предела текучести. Повышение величины пористости в материале сказывается на увеличении «глубины минимума», что, вероятно, связано с образованием на порах замыкающих магнитных доменов, сокращение объема которых при одноосном растяжении и приводит к снижению коэрцитивной силы.

4. Влияние пористости на характер изменения коэрцитивной силы при одноосном растяжении исследованных порошковых материалов минимально при перемагничивании в области Релея, что позволяет по величине внешних растягивающих напряжений, при которых достигается минимум коэрцитивной силы оценивать уровень микронапряжений в изделиях из порошковых сталей.

#### **Практическая значимость результатов исследований.**

1. В качестве параметра для оценки твердости и временного сопротивления изделий из порошковых сталей при варьировании величины пористости рекомендована максимальная намагниченность, а при изменении размеров пор – коэрцитивная сила или максимальная магнитная проницаемость.

2. Для определения величины временного сопротивления изделий из порошковых углеродистых сталей после прокатки применима коэрцитивная сила, а для определения относительной деформации при прокатке – коэрцитивная сила или максимальная намагниченность.

3. Предпочтительным магнитным параметром определения твердости при закалке, а также последующем низко- или среднетемпературном отпуске изделий из порошковых конструкционных сталей является коэрцитивная сила. Для оценки уровня приложенных одноосных растягивающих напряжений в издели-

ях из термообработанной порошковой стали 50Н2М рекомендована коэрцитивная сила частного цикла (максимальная индукция 0,4 Тл).

4. Для качественной оценки уровня микронапряжений в изделиях из порошковых сталей может быть использована величина приложенных одноосных растягивающих напряжений, соответствующая положению минимума коэрцитивной силы частного цикла (область Релея).

Результаты работы используются в Научном центре порошкового материаловедения ПГТУ (НЦ ПМ) при подготовке специалистов и научно-педагогических кадров высшей квалификации, при выполнении прикладных исследований совместно с предприятиями ОАО «ИНКАР» и ЗАО «Новомет-Пермь», а также при оценке структуры и прочностных свойств изделий, производимых в НЦ ПМ. Акты об использовании результатов работы приведены в приложении к диссертации.

**Достоверность основных научных положений и выводов**, сформулированных в диссертации, обеспечена применением апробированных методик и современного оборудования, проверкой полученных результатов альтернативными методами исследований, а также их соответствием данным других исследователей.

Диссертационная работа выполнялась в рамках: работ по Программе Президиума РАН № 22 «Фундаментальные проблемы механики взаимодействий в технических и природных системах», Программе ОЭММПУ РАН № 13 «Трибологические и прочностные свойства структурированных материалов и поверхностных слоев», научно-исследовательских работ Института машиноведения УрО РАН, грантов РФФИ №№ 06-01-00679, 07-01-96086, 09-08-01091.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Установлена принципиальная возможность использования максимальной намагниченности, коэрцитивной силы и максимальной магнитной проницаемости порошкового материала для оценки твердости и временного сопротивления при варьировании величины пористости и размеров пор.

2. Установлены однозначные закономерности, позволяющие по измерениям максимальной намагниченности и коэрцитивной силы оценивать величину относительной деформации и временного сопротивления углеродистых порошковых сталей после холодной прокатки.

3. Дано объяснение влияния величины пористости на характер изменения коэрцитивной силы порошковых сталей при одноосном растяжении и предложен способ минимизации этого влияния для оценки уровня микронапряжений.

**Личный вклад.** Автор внес определяющий вклад в постановку задач, выбор методов исследований, анализ и интерпретацию полученных результатов. Основная часть экспериментальной работы была выполнена лично автором.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: III Российская научно-техническая конференция «Разрушение, контроль и диагностика материалов и конструкций», (г. Екатеринбург, 2007 г.); 6-ая и 8-ая Международные конференции «Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности» (г. Москва, 2007 и 2009 гг.); XXII, XXIII и XXV Национальная конференция «Дни на безразрушительный контроль» (Болгария, г. Созополь, 2007, 2008 и 2010 гг.); IV Российская научно-техническая конференция «Физические свойства металлов и сплавов» (г. Екатеринбург, 2007 г.); II и III Всероссийские конференции «Безопасность и живучесть технических систем» (г. Красноярск, 2007 и 2009 г.); 17 Всемирная конференция по неразрушающему контролю (Китай, г. Шанхай, 2008 г.); IV международная научно-техническая конференция (г. Тюмень, 2008 г.); IV Российская конференция «Ресурс и диагностика материалов и конструкций» (г. Екатеринбург, 2009 г.); IV Всероссийская конференция молодых ученых «Материаловедение, технологии и экология в 3-м тысячелетии» (г. Томск, 2009 г.); 5-ый Международный форум (10-ой Международной конференции) «Актуальные проблемы современной науки» (г. Самара, 2009 г.); VI Российская научно-техническая конференция «Механика микронеоднородных материалов и разрушение» (г. Екатеринбург, 2010 г.); Российская школа-конференция молодых ученых «Механика деформаций и разруше-

ние материалов» (г. Екатеринбург, 2010 г.); 10 Европейская конференция по неразрушающему контролю (г. Москва, 2010 г.).

**Публикации:** Основные результаты диссертации опубликованы в 22 работах, в том числе 3 статьи в международных журналах и 4 статьи в журналах из перечня ВАК РФ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа изложена на 170 страницах, состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 171 наименование работ отечественных и зарубежных авторов. Диссертация включает 61 рисунок, 11 таблиц и 1 приложение.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность тематики исследований, указаны преимущества магнитных методов контроля структурного состояния и внутренних напряжений в порошковых материалах перед другими неразрушающими методами, сформулирована цель работы, перечислены полученные автором результаты, раскрыта их научная и практическая ценность, представлены положения, выносимые на защиту, и описана структура диссертации.

**В первой главе** рассматриваются особенности структурного состояния изделий, получаемых методом порошковой металлургии. Описывается влияние процессов, протекающих на различных технологических этапах производства, на структуру и свойства порошковых материалов и роль пористости в этом влиянии.

Проводится анализ литературных данных и результатов экспериментальных исследований о влиянии пористости на механические, а также структурно чувствительные и структурно нечувствительные магнитные характеристики порошковых сталей. Рассматриваются различные теории о влиянии пористости на коэрцитивную силу порошковых материалов. Описывается современное состояние неразрушающего магнитного контроля качества изделий из спеченных сталей при изготовлении и действующих напряжений при их эксплуатации.

Анализ показал, что методы магнитной структуроскопии изделий из порошковых сталей в состоянии после спекания зарекомендовали себя как эффективные. В частности, содержание углерода в спеченных стальных изделиях оценивают по величине коэрцитивной силы, а пористость – по намагниченности насыщения. Применение двухпараметрового контроля по этим двум магнитным характеристикам позволяет автоматизировать процесс разбраковки изделий из спеченных сталей по пористости и содержанию углерода. Однако на сегодняшний день работ по оценке структуры и прочностных характеристик спеченных изделий после упрочняющих деформационных и термических обработок мало, а исследования по оценке напряжений в порошковых сталях с помощью магнитных характеристик неизвестны.

На основании выявленных при анализе литературы проблем сформулированы задачи исследований.

**Вторая глава** посвящена описанию исследуемых материалов, применяемого оборудования и использованных методик исследований.

Круг исследованных материалов включает в себя: спеченное железо, полученное из порошков со средним размером частиц в диапазоне от 40 до 200 мкм; углеродистые порошковые стали типа «железо–графит» с содержанием углерода до 0,95 %; конструкционные порошковые стали типа 50Н2М и системы легирования Fe-Cu-C<sup>1</sup>. Для сравнения в качестве беспористого материала использовали литую сталь марки Ст3.

Физико-механические свойства образцов из порошковых материалов исследовали в состоянии после спекания, а также после упрочняющих обработок. Измерения магнитных характеристик проводили как в ненагруженном состоянии, так и непосредственно в процессе одноосного растяжения.

**В третьей главе** рассматривается влияние варьирования размера частиц исходного порошка железа, типа прессования, а также деформационного и тер-

---

<sup>1</sup> Образцы из спеченного железа были изготовлены в ходе совместных работ в Научном центре порошкового материаловедения ПГТУ (г. Пермь). Часть образцов была предоставлена Физико-техническим институтом УрО РАН (г. Ижевск) и Институтом механики БАН (г. София, Болгария).

мического упрочнения на структуру и физико-механические свойства порошковых материалов. Показано, что повышение среднего размера частиц железного порошка от 40 до 200 мкм практически не сказывается на величине зерна спеченного железа, слабо влияет на временное сопротивление, предел текучести, относительное удлинение, но приводит к снижению твердости на 5-10 % (рисунок 1а) вследствие увеличения среднего размера пор в спеченных железных материалах примерно с 12 до 20 мкм (рисунок 1б). С ростом размера частиц порошка происходит изменение величины коэрцитивной силы ( $H_c$ ) и максимальной магнитной проницаемости ( $\mu_{\text{макс}}$ ) спеченного железа (рисунки 2а, б).

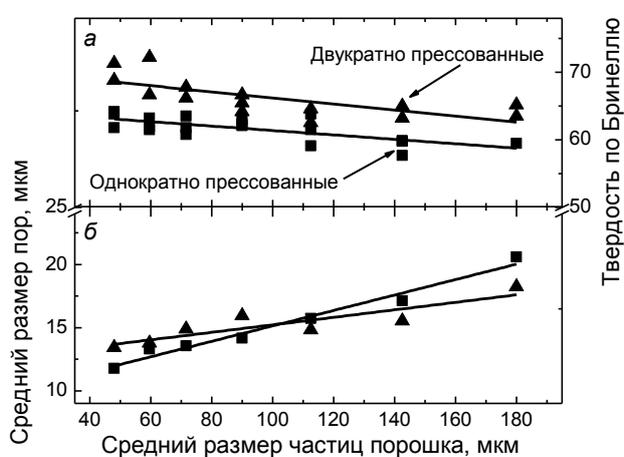


Рисунок 1 – Величина твердости и размер пор в спеченном железе в зависимости от среднего размера частиц исходного порошка

Это обусловлено увеличением среднего размера пор ( $d$ ), что соответствует теоретическим представлениям<sup>2</sup>, согласно которым для пор, размеры которых превышают толщину доменной стенки ( $0,05 \dots 0,20$  мкм)<sup>3</sup>,  $H_c \sim \frac{1}{d}$ . Причины облегчения процессов перемещения с ростом среднего размера пор заключаются в формировании вблизи пор замыкающей вторичной доменной структуры – зародышей переметалличивания.

Установлены общие закономерности изменения коэрцитивной силы, максимальной магнитной проницаемости и твердости спеченного железа с повышением среднего размера пор (размера частиц порошка) при прочих неизменных структурных параметрах.

Двукратное прессование с промежуточным отжигом (доуплотнение при 700 МПа) железных прессовок приводит к сокращению пористости в среднем с

<sup>2</sup> Kersten M. Zur Theorie der ferromagnetischen Hysterese und der Anfängspermeabilität // Phys. Ztschr. – 1943. – Bd. 44. – S. 63-77.

<sup>3</sup> Бозорт Р. Ферромагнетизм. Пер. с англ. – М.: ИИЛ, 1956. – 784 с.

8,5 до 2,8 %, улучшает межчастичный контакт и тем самым создает благоприятные условия для формирования более крупного зерна (150 вместо 40 мкм) при дальнейшем спекании. Двукратное прессование практически не сказывается на размере пор, но повышает твердость спеченного железа на 8 % и временное сопротивление на 20 % вследствие сокращения величины пористости.

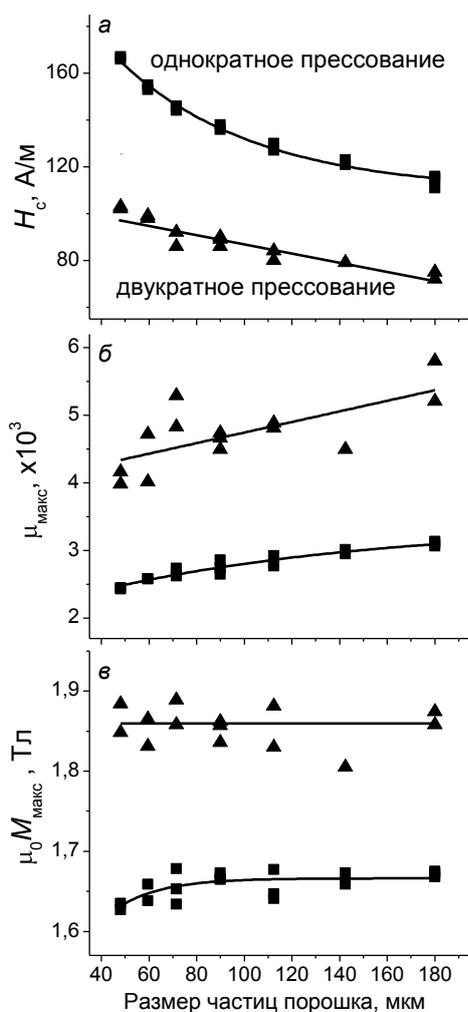


Рисунок 2 – Влияние среднего размера частиц порошка на магнитные характеристики спеченного железа<sup>4</sup>.

Применение операции доуплотнения приводит к изменению уровня магнитных свойств (рисунок 2). Коэрцитивная сила снижается в среднем на 35 %, а максимальная магнитная проницаемость увеличивается на 80 % ввиду сокращения пористости и увеличения размера зерна. Максимальная намагниченность ( $M_{\text{макс}}$ ) увеличивается на 10 % (рисунок 2в) только вследствие сокращения пористости, поскольку отражает объемную долю ферромагнитной фазы в объеме материала образцов.

Повышение твердости и величины временного сопротивления при доуплотнении спеченного железа отражается на уровне максимальной намагниченности.

Таким образом, оценивать твердость и временное сопротивление порошковых сталей при изменении величины пористости можно по измерениям максимальной намагниченности, а при изменении размера пор – по измерениям коэрцитивной силы или максимальной магнитной проницаемости.

Результаты металлографических исследований и магнитных измерений образцов из порошковых углеродистых сталей типа ЖГр после деформацион-

<sup>4</sup>  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная

ного упрочнения холодной прокаткой показали, что с ростом относительной деформации ( $\varepsilon_{пр}$ ) формируется текстура прокатки: поры, зерна феррита и перлита вытянуты преимущественно вдоль направления прокатки.

Сокращение пористости при прокатке приводит к повышению величины максимальной намагниченности в результате сокращения объемной доли пор в материале образцов (рисунок 3).

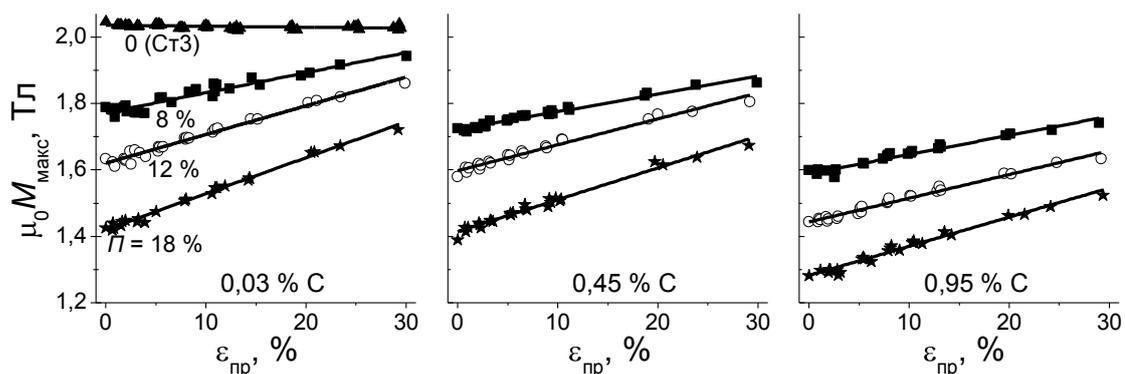


Рисунок 3 – Увеличение максимальной намагниченности порошковых углеродистых сталей при прокатке. У прямых указана исходная пористость

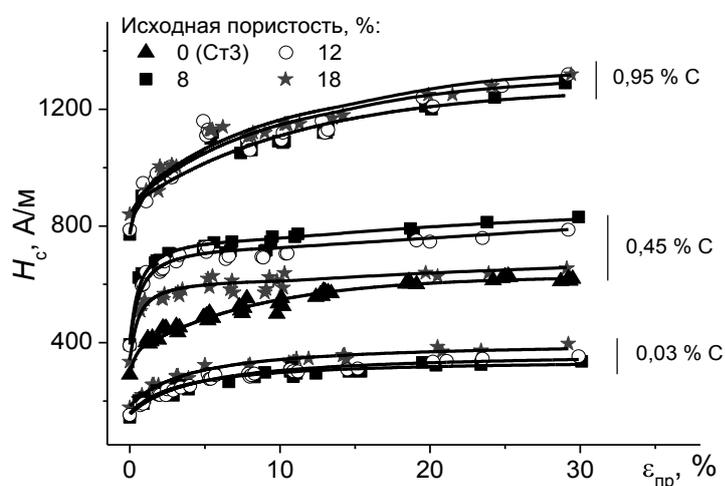


Рисунок 4 – Изменение коэрцитивной силы порошковых углеродистых сталей при прокатке

С увеличением относительной деформации при прокатке коэрцитивная сила порошковых углеродистых сталей повышается (рисунок 4) преимущественно за счет роста плотности дислокаций, причем величина пористости оказывает слабое влияние на уровень коэрцитивной силы и характер ее изменения при прокатке.

Монотонное изменение величин максимальной намагниченности и коэрцитивной силы позволяет оценивать величину относительной деформации при холодной прокатке изделий из углеродистых порошковых сталей.

Установлена зависимость коэрцитивной силы углеродистых порошковых сталей от величины их временного сопротивления после прокатки (рисунок 5), указывающая на возможность использования коэрцитивной силы при оценке временного сопротивления упрочненных прокаткой изделий из углеродистых порошковых сталей.

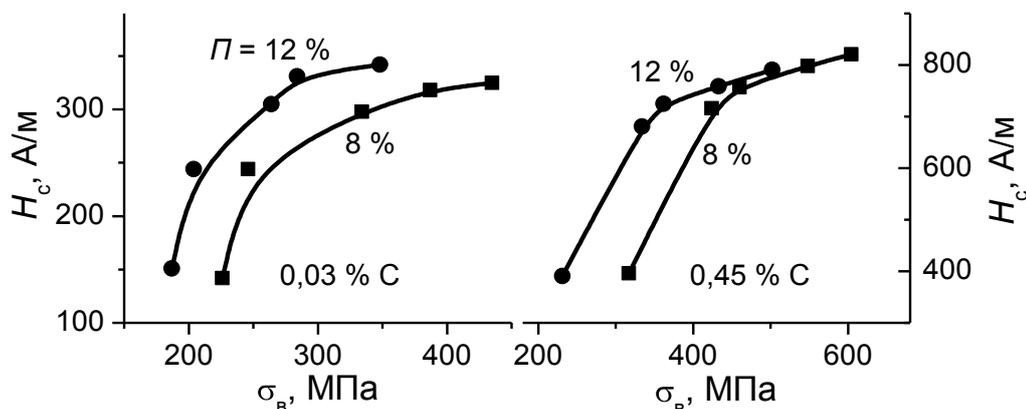


Рисунок 5 – Зависимость коэрцитивной силы углеродистых порошковых сталей от величины их временного сопротивления после упрочнения прокаткой. У кривых указана исходная пористость

Исследования влияния различных режимов термообработки на структуру и физико-механические свойства конструкционной порошковой стали 50Н2М показали, что закалка стали осуществляется при охлаждении с температур не ниже 760 °С (рисунок 6а).

Изменение температуры под закалку в диапазоне от 760 до 910 °С слабо сказывается на физико-механических свойствах образцов, что свидетельствует о постоянстве концентрации углерода в твердом растворе и остаточного аустенита в стали, содержание которого согласно рентгеноструктурному анализу составляет не более 10 %.

Постоянство величины твердости в диапазоне температур закалки 760...910 °С указывает на необходимость контроля именно «недогрева» стали при закалке. Наиболее предпочтительным магнитным параметром, отражающим изменение твердости порошковой стали, является коэрцитивная сила (рисунок 6а).

При отпуске закаленных образцов из стали 50H2M происходит монотонное снижение твердости (рисунок бб) за счет аннигиляции дислокаций, роста размеров субзерен и выделения углерода из твердого раствора, которое приводит к снижению тетрагональности решетки мартенсита.

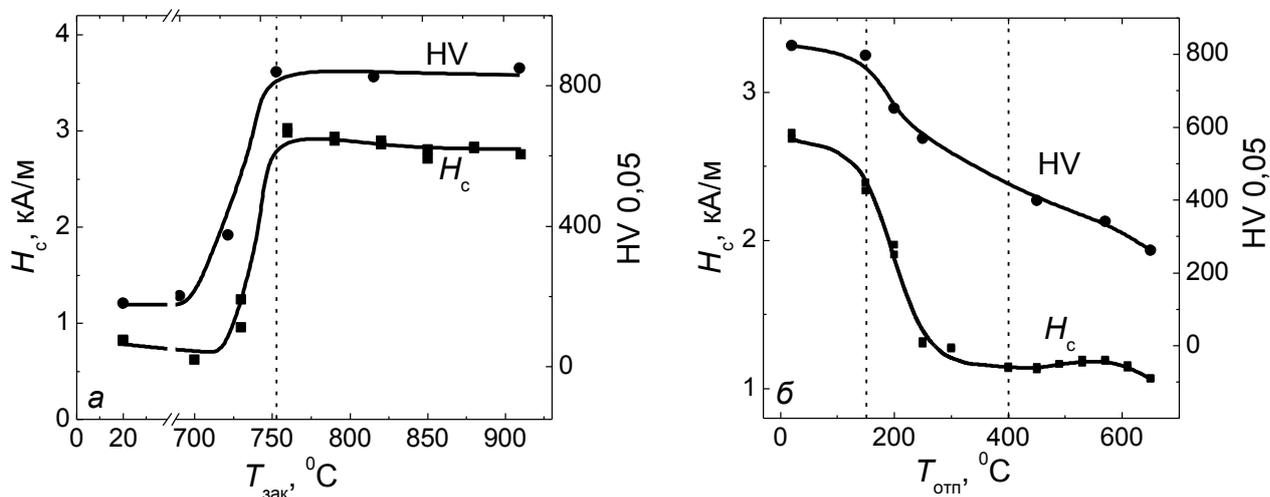


Рисунок 6 – Коэрцитивная сила и твердость порошковой стали 50H2M после охлаждения с различных температур (а) и отпуски (б)

По этим же причинам в интервале температур отпуска вплоть до 400 °C значения коэрцитивной силы снижаются (рисунок бб), а максимальной магнитной проницаемости и остаточной индукции повышаются.

В диапазоне температур отпуска 450...650 °C наблюдается немонотонный характер изменения коэрцитивной силы (рисунок бб) и максимальной магнитной проницаемости. С одной стороны, по мере увеличения температуры отпуска процессы перемагничивания облегчаются за счет уменьшения внутренних напряжений, а с другой стороны, происходит коагуляция карбидных частиц, приводящая к повышению их магнитостатической энергии, а, следовательно, и коэрцитивной силы. Когда размер карбидных включений превышает толщину доменной стенки, вблизи таких включений образуются замыкающие магнитные домены, что облегчает процессы перемагничивания. Вероятно, максимум коэрцитивной силы в районе 570 °C соответствует температуре, при которой размеры карбидных частиц соизмеримы с толщиной доменных стенок.

В интервале температур отпуска от 150 до 400 °С между твердостью и исследованными структурно чувствительными магнитными характеристиками закаленной порошковой стали 50Н2М наблюдается связь (рисунок 6б). Причем магнитные характеристики более чувствительны к изменениям температуры отпуска, чем твердость.

Монотонное изменение коэрцитивной силы, максимальной магнитной проницаемости и остаточной магнитной индукции в зависимости от температуры отпуска вплоть до 400 °С позволяет осуществлять контроль твердости изделий из порошковых сталей типа 50Н2М после низко- или среднетемпературного отпуска, формирующего оптимальный комплекс прочностных свойств.

**В четвертой главе** приводятся результаты магнитных измерений в процессе одноосного растяжения образцов из порошковых сталей. На примере спеченного железа показано, что значения исследованных магнитных характеристик в 5 разных сечениях по длине рабочей части образцов отличаются от среднего арифметического не более чем на 6 %, это свидетельствует об однородной деформации порошкового материала при растяжении.

Установлен общий характер изменения коэрцитивной силы при упруго-пластическом растяжении порошковых и литых сталей с образованием минимума вблизи предела текучести. В начальной области упругого растяжения коэрцитивная сила монотонно снижается, что связано с перестройкой доменной структуры и формированием вдоль направления приложения нагрузки наведенной магнитной текстуры, облегчающей процессы перемагничивания. Причины формирования магнитной текстуры заключаются в том, что при упругом растяжении материалов с положительной магнитострикцией объем доменов, вектора намагниченности которых близки к оси приложения нагрузки, увеличивается за счет уменьшения объема замыкающих доменов, вектора намагниченности которых имеют наибольшее отклонение от этой оси. Иными словами, замыкающие домены при одноосном растяжении становятся энергетически менее выгодными, и их объем сокращается, что приводит к некоторому снижению коэрцитивной силы образцов.

По мере дальнейшего растяжения в упругой области деформаций магнито-стрикция железа может менять знак, при этом меняется тип магнитной анизотропии, наведенной приложенными напряжениями, что сопровождается повышением коэрцитивной силы.

При дальнейшем растяжении в упругой области, а затем и в области развитой пластической деформации коэрцитивная сила растет вследствие разрушения магнитной текстуры и роста в материале плотности дислокаций. При внешних напряжениях, превышающих предел текучести, увеличение коэрцитивной силы обусловлено преимущественно ростом плотности дислокаций.

Приводятся результаты влияния величины пористости на «глубину минимума» коэрцитивной силы (разность между величиной коэрцитивной силы в исходном состоянии и ее минимальным значением при растяжении) при одноосном растяжении образцов из порошковых материалов.

При растяжении образцов из спеченного железа и углеродистых порошковых сталей влияние величины пористости на «глубину минимума» коэрцитивной силы ( $\Delta H_c$ ) менее выражено (рисунок 7а). Легирование спеченных материалов медью и молибденом способствует увеличению «глубины» этого минимума для образцов системы Fe-Cu-C и образцов спеченной стали 30H2M (рисунок 7б).

Дается объяснение влияния величины пористости на «глубину минимума» коэрцитивной силы порошковых материалов исходя из представлений о том, что при упругом растяжении ферромагнитных материалов на основе железа формируется магнитная анизотропия, что сопровождается сокращением объема 90-градусных замыкающих магнитных доменов. Поскольку критические поля 180-градусных доменных стенок меньше, чем 90-градусных, а общий объем 90-градусных доменов по мере приложения большей упругой деформации уменьшается, то снижается и коэрцитивная сила образцов.

В порошковых материалах, чем выше значение пористости, тем больше количество пор, вблизи которых формируются замыкающие 90-градусные доменные структуры в результате понижения их магнитостатической энергии.

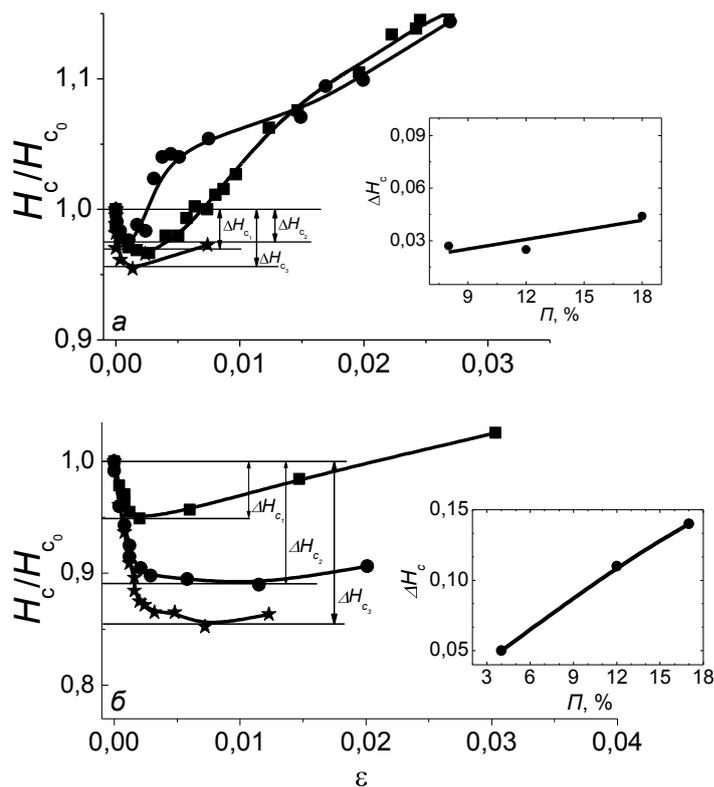


Рисунок 7 – Влияние величины пористости на «глубину минимума» коэрцитивной силы при растяжении порошковых сталей: *a* – ЖГр (0,45 % С); *б* – 30Н2М

Показано, что при снижении величины максимального перемагничивающего поля минимум коэрцитивной силы при растяжении порошковых сталей становится более выраженным, а «глубина минимума» коэрцитивной силы в меньшей степени зависит от величины пористости (рисунок 8). Обусловлено это уменьшением вклада в величину коэрцитивной силы частного цикла доменных границ, которые имеют критические поля отрыва от пор больше приложенного и вследствие этого остаются закрепленными.

Момент достижения минимума коэрцитивной силы при растяжении ферромагнитных материалов на основе железа связан с частичной компенсацией внутренних сжимающих микронапряжений внешними растягивающими напряжениями.

В легированных порошковых сталях дополнительный объем замыкающих доменов формируется вблизи слабомагнитных включений нерастворенных в железе легирующих компонентов и карбидных включений, размеры которых соизмеримы с толщиной доменной стенки или превышают ее.

Исходя из этих рассуждений, «глубина минимума» коэрцитивной силы при одноосном растяжении будет больше в порошковых сталях, структура которых отличается большим объемом слабомагнитных включений и более высокой пористостью.

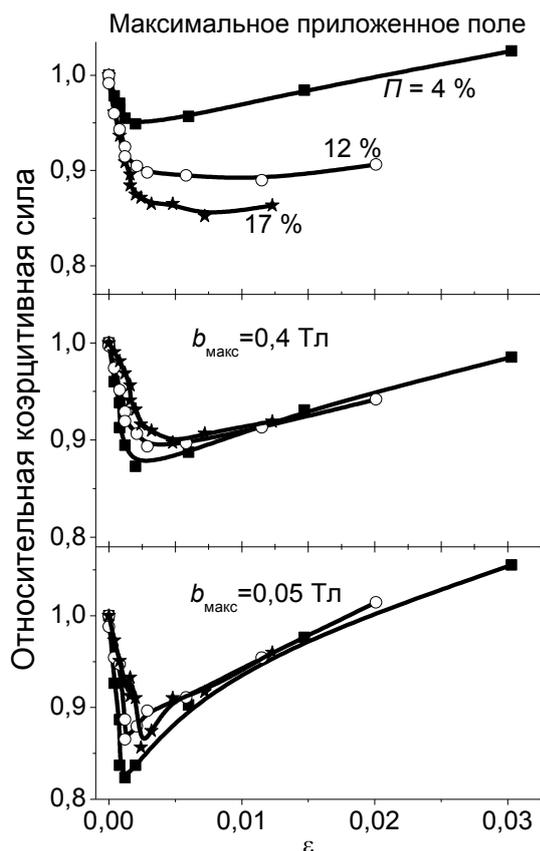


Рисунок 8 – Влияние величины максимального перемагничивающего поля на «глубину минимума» коэрцитивной силы при растяжении порошковой стали 30Н2М

чае вклад пористости в величину коэрцитивной силы частного цикла будет минимален.

При одноосном растяжении образцов из спеченного железа и углеродистых порошковых сталей в области развитой пластической деформации установлено подобие между диаграммой нагружения и зависимостью коэрцитивной силы от степени деформации (рисунок 9). Это позволяет с помощью коэрци-

Происходит это при внешних упругих растягивающих напряжениях<sup>5</sup>:

$$\sigma_{\text{мин}} \sim \sigma_i, \quad (1)$$

где  $\sigma_i$  – среднее значение амплитуды внутренних напряжений.

Показана возможность качественной оценки уровня микронапряжений в изделиях из порошковых сталей по положению минимума коэрцитивной силы при одноосном растяжении по аналогии со способом, разработанным для литых конструкционных сталей<sup>6</sup>. Принципиальным отличием является то, что оценку внутренних напряжений в порошковых материалах необходимо проводить на основании положения минимума коэрцитивной силы, полученной не из предельных петель гистерезиса, а при перемагничивании в области Релея. В таком случае

<sup>5</sup> Вонсовский С.В. Влияние слабых упругих напряжений на начальную обратимую восприимчивость ферромагнетиков // ЖЭТФ. – 1947. – Т. 17. – Вып. 12. – С. 1094-1105.

<sup>6</sup> Пат. 2035690 Российская федерация, МПК<sup>7</sup> G 01 B 7/24, G 01 N 3/08. Способ определения напряжений в ферромагнитных материалах на железной основе / Кочанов Н.Н. и др. – № 4453055/28; БИ № 14, опубл. 20.05.95.

тивной силы оценивать уровень действующих напряжений при растяжении элементов конструкций из углеродистых порошковых сталей в пластической области.

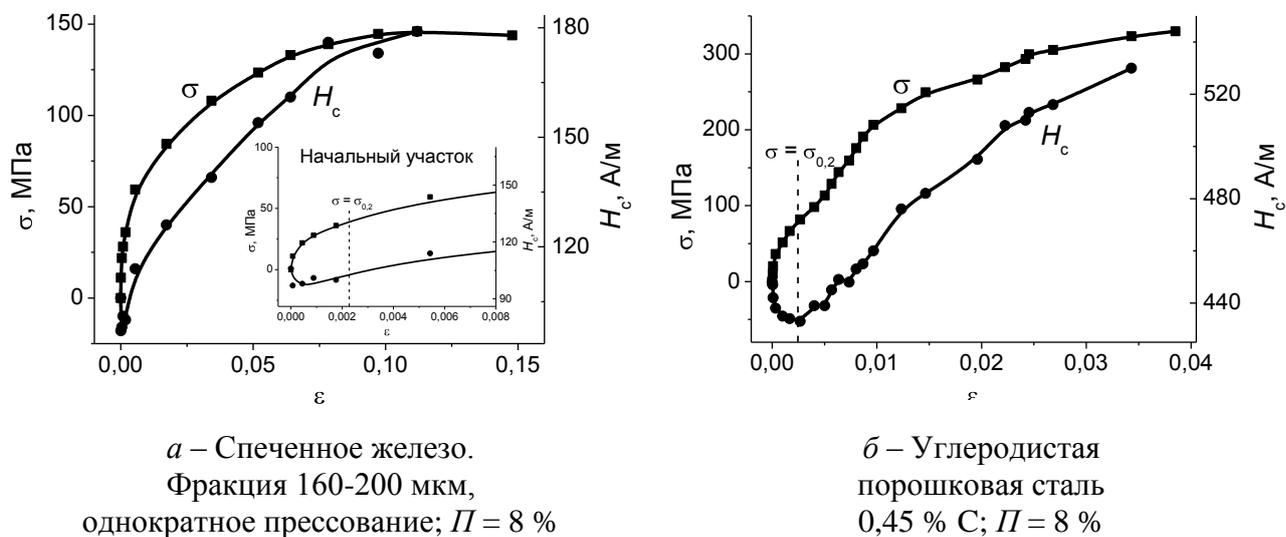


Рисунок 9 – Диаграммы нагружения и зависимости коэрцитивной силы от степени деформации при растяжении образцов из спеченного железа (*а*) и углеродистой порошковой стали (*б*)

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Установлены однозначные закономерности, позволяющие оценивать твердость и временное сопротивление порошкового материала по измерениям максимальной намагниченности (при варьировании величины пористости), и по измерениям коэрцитивной силы или максимальной магнитной проницаемости (при изменении размеров пор).

2. Монотонное повышение коэрцитивной силы углеродистых порошковых сталей при холодной прокатке преимущественно вследствие роста плотности дислокаций позволяет оценивать величину их временного сопротивления. Кроме того, с помощью коэрцитивной силы или максимальной намагниченности можно оценить величину относительной деформации упрочненных прокаткой изделий из этих сталей.

3. Экспериментально подтверждено, что коэрцитивная сила является предпочтительным параметром контроля твердости спеченных изделий из конст-

рукционной стали 50Н2М при закалке. Установлено, что для контроля твердости изделий из порошковых конструкционных сталей при низко- или средне-температурном отпуске, формирующем наиболее оптимальный комплекс их прочностных свойств, применимы коэрцитивная сила, максимальная магнитная проницаемость и остаточная магнитная индукция.

4. На примере модельных образцов из спеченного железа показано, что отклонение значений исследованных магнитных характеристик, измеренных в разных сечениях по длине образцов, от среднего составляет не более 6 %. Величина отклонения не превышает этого значения и в условиях одноосного растяжения, что свидетельствует об однородной деформации порошковых материалов по длине рабочей части образцов.

5. При одноосном растяжении коэрцитивная сила исследованных порошковых материалов изменяется аналогично коэрцитивной силе литых сталей – с образованием минимума. Момент достижения минимума связан с частичной компенсацией внутренних сжимающих микронапряжений внешними растягивающими напряжениями. Влияние величины пористости выражается в увеличении «глубины» этого минимума, что связано с образованием вблизи пор замыкающих магнитных доменов, сокращение объема которых при упругом растяжении приводит к снижению коэрцитивной силы. Легирование порошковых сталей усиливает это влияние за счет большего объема замыкающих доменов, образованных вблизи слабомагнитных включений в виде нерастворенных в железе легирующих компонентов и карбидных частиц, размеры которых соизмеримы с толщиной доменной стенки или превышают ее.

6. При перемагничивании порошковых сталей в области Релея разность между величиной коэрцитивной силы в исходном состоянии и ее минимальным значением при растяжении слабо зависит от величины пористости, что объясняется сокращением вклада в величину коэрцитивной силы частного цикла доменных границ, закрепленных у пор вследствие высоких значений критических полей отрыва. Это позволяет оценивать уровень микронапряжений в изделиях

из порошковых сталей по величине внешних растягивающих напряжений, при которых достигается минимум коэрцитивной силы частного цикла.

7. Установлено подобие между диаграммами нагружения и зависимостями коэрцитивной силы от степени деформации в области развитой пластической деформации одноосным растяжением образцов из спеченного железа и углеродистых порошковых сталей, позволяющее с помощью коэрцитивной силы оценивать уровень действующих напряжений при растяжении элементов конструкций из углеродистых порошковых сталей.

### **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Публикации в научных изданиях, входящих в список ВАК РФ:

1. Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Митропольская С.Ю., Субачев Ю.В., Ульянов А.И. Влияние упругопластической деформации на магнитные характеристики конструкционной порошковой стали с различной остаточной пористостью // Дефектоскопия. – 2007. – № 12. – С. 53-65.

2. Горкунов Э.С., Субачев Ю.В., Митропольская С.Ю., Задворкин С.М., Коковихин Е.А., Ульянов А.И., Шершнева Л.С., Соловьев К.Е. Структура и электромагнитные характеристики деформированной прокаткой порошковой стали типа ЖГр с различными пористостью и содержанием углерода // Дефектоскопия. – 2009. – № 7. – С. 83-96.

3. Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Субачев Ю.В., Анциферов В.Н., Вакутин А.П., Мельникова Е.В., Смирнова С.В. Влияние размера частиц шихты на магнитные характеристики спеченного порошкового железа // Дефектоскопия. – 2009. – № 12. – С. 60-69.

4. Горкунов Э.С., Субачев Ю.В., Ульянов А.И., Задворкин С.М., Мельникова Е.В., Коковихин Е.А. Изучение поведения магнитных характеристик конструкционных порошковых сталей типа ЖГр при прокатке и последующем растяжении // Дефектоскопия. – 2010. – № 3. – С. 70-81.

Публикации в научных изданиях, не входящих в список ВАК РФ:

1. Горкунов Э.С., Ковачев Б.Г., Задворкин С.М., Митропольская С.Ю., Субачев Ю.В. Анализ корреляции между накоплением структурной поврежденности и эволюцией магнитных характеристик спеченных порошковых материалов в условиях действия напряжений и деформаций // Научни известия на НТСМ. – 2007. – № 3(98). – С. 64-83.

2. Горкунов Э.С., Митропольская С.Ю., Миховски М.М., Субачев Ю.В. Влияние содержания меди, углерода и остаточной пористости на магнитные характеристики и деформационное поведение спеченной порошковой композиции на основе железа // Научни известия на НТСМ. – 2008. – № 2(105). – С. 63-68.

3. Горкунов Э.С., Субачев Ю.В., Задворкин С.М., Ульянов А.И., Шершнева Л.С. Влияние термической обработки и упруго-пластической деформации на магнитные характеристики порошковых сталей // Научни известия на НТСМ. – 2010. – № 5(115). – С. 52-59.