

Ничипурук А. П., Сташков А. Н., Огнева М. С.,
Кулеев В. Г., Царькова Т. П., Костин В. Н.
ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАГНИТНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ОДНООСНЫХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ И ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЯХ

В работе приводятся данные о возможности контроля магнитными методами деформаций и остаточных механических напряжений в пластически деформированных растяжением низкоуглеродистых сталях. Перспективы селективного контроля упругих деформаций (напряжений) лежат в области изучения перераспределения обратимых и необратимых процессов перемагничивания и разделения вкладов в процессы перемагничивания 90 и 180-градусных доменных границ. Показана возможность экспериментального определения критических полей смещения 90-градусных доменных границ при перемагничивании низкоуглеродистых сталей в ортогональных магнитных полях. Показана возможность оценки величины остаточных напряжений и степени пластической деформации конструкционных сталей с помощью двухпараметровой методики – по измерению остаточной намагниченности и коэрцитивной силы. Установлено, что все предложенные магнитные параметры меняются до относительного удлинения 15 %. Дальнейшее увеличение относительного удлинения не приводит к существенному изменению магнитных свойств.

Ключевые слова: деформация, дифференциальная магнитная восприимчивость, критическое поле, смещение 90-градусных доменных границ, ортогональные магнитные поля, остаточная намагниченность, коэрцитивная сила.

Неразрушающие методы оценки остаточного ресурса стальных конструкций, таких как трубопроводы, подъемные механизмы, резервуары для хранения жидкостей и газов, объекты железнодорожного

транспорта, разрабатываются многими научными группами в России и за рубежом. Так как системы постоянного мониторинга начали внедряться относительно недавно, то зачастую неизвестна предыстория объекта контроля. Это, а также ряд других обстоятельств, затрудняет применение методов неразрушающего контроля (магнитных, акустических, рентгеновских, вихретоковых, магнитопорошковых, акустико-эмиссионных) для достоверного определения напряженно-деформированного состояния объекта. Для решения данной задачи перспективными являются локальные магнитные методы. Известно, что магнитные свойства сталей в значительной степени изменяются под действием упругой и пластической деформации. Однако широко известные на сегодняшний день магнитные свойства, измеряемые на кривой намагничивания или петле гистерезиса, имеют недостаточную чувствительность или неоднозначное поведение в зависимости от приложенных или остаточных напряжений, особенно при больших растягивающих деформациях перед моментом разрушения материала. Перспективы селективного контроля упругих деформаций (напряжений) лежат в области изучения перераспределения обратимых и необратимых процессов перемагничивания и разделения вкладов в процессы перемагничивания 90 и 180-градусных доменных границ. Особый интерес представляет экспериментальное определение критических полей смещения 90-градусных доменных границ. В данной работе рассмотрено несколько магнитных методов, применение которых может привести к возможности оценки величины остаточных напряжений и степени пластической деформации конструкционных сталей.

Измерение полевых зависимостей дифференциальной магнитной восприимчивости. Расчет по модели

На пластине из стали 09Г2, подвергнутой предварительно пластической деформации растяжением, измеряли полевые зависимости дифференциальной магнитной проницаемости [1]. По полученным данным рассчитали, в рамках ранее созданной модели, критические поля смещения 90° (H_{90}) и 180° (H_{180})

доменных границ и поле наведенной магнитной анизотропии H_a . Результаты расчета приведены на рис. 1. Очевидно, что в отличие от поля H_{180} , которое пропорционально коэрцитивной силе, величины H_{90} и H_a чувствительны к изменению степени деформации исследованного материала во всем ее диапазоне вплоть до разрыва образца.

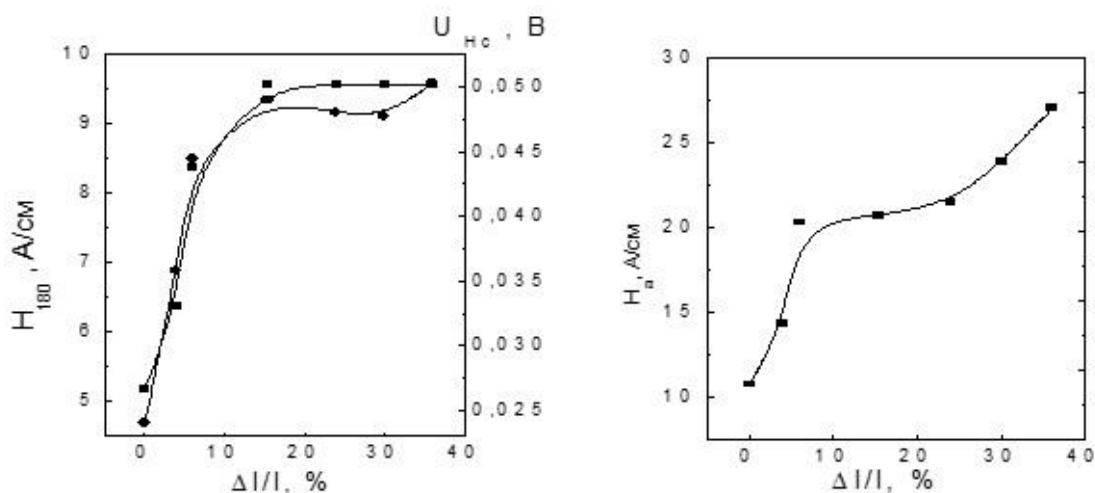


Рис. 1. График зависимости критического поля смещения 180° доменных границ H_{180} и относительных значений коэрцитивной силы – а; график зависимостей поля наведенной магнитной анизотропии H_a – б, от относительного удлинения

Измерения проекции намагниченности на ось проволочных образцов из низкоуглеродистой стали Ст1кп при перемагничивании их циркулярным полем в зависимости от величины поляризующего поля в соленоиде

Исследования проводили на образцах в виде проволок из низкоуглеродистой стали Ст.1кп (диаметр проволок составлял $3,84 \pm 0,03$ мм, длина 250 мм), подвергнутых предварительному отжигу при температуре $650^\circ C$ в течении 1,5 ч и пластической деформации растяжением в интервале относительных удлинений от 0 до 25 %. С помощью селективного вольтметра измеряли полевые зависимости ЭДС, пропорциональной результирующей дифференциальной проницаемости, возникающей под действием суперпозиции переменного циркулярного поля постоянной амплитуды (создавалось пропускание переменного тока через образец) и изменяющегося в широких

пределах квазистатического продольного поля, создаваемого соленоидом (поляризующее поле). Для всех деформированных образцов на полученных зависимостях наблюдается три максимума: вблизи нуля поля, а также в отрицательных и положительных полях [2]. Были построены зависимости полей правого и левого максимумов, а также поля наведенной анизотропии (как полусумма полей, соответствующих правому и левому максимумам) от степени относительного удлинения исследованных образцов (рис. 2). А в представленной ниже таблице показаны результаты сравнения расчетных (по модели) и экспериментальных значений (соответствующих центральному максимуму на зависимости, описанной выше) критических полей смещения 90-градусных доменных границ. Считаем совпадение результатов удовлетворительным.

Таблица

Наименование	Показатели			
Деформация, %	2	4	10	15
H_{90} (модель), А/см	8	25	27	30
H_0^{\max} (эксперимент), А/см	9	22	24	28

Остаточная намагниченность и коэрцитивная сила

На рис. 3 представлены относительные значения остаточной намагниченности в зависимости от степени деформации исследованных низкоуглеродистых образцов [1]. Резкое уменьшение остаточной намагниченности вплоть до относительных удлинений 7,5 % обусловлено, по-видимому, возникновением после разгрузки образца магнитной текстуры вдоль оси нагружения (типа «легкая плоскость»).

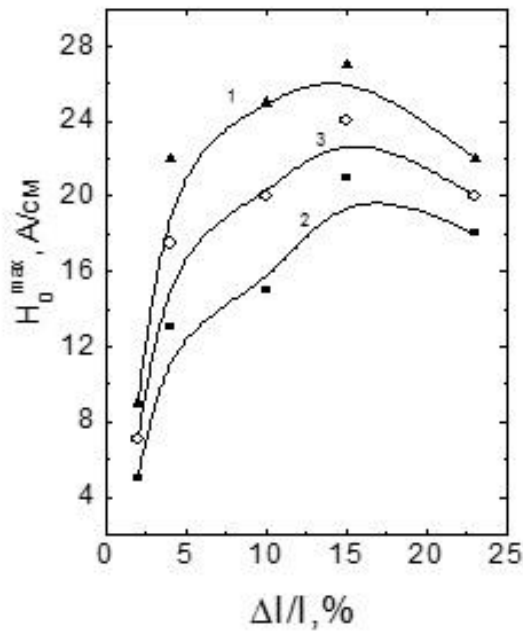


Рис. 2. Зависимости значений полей максимумов (кривые 1 и 2) и поля наведенной магнитной анизотропии (кривая 3) от относительного удлинения образцов

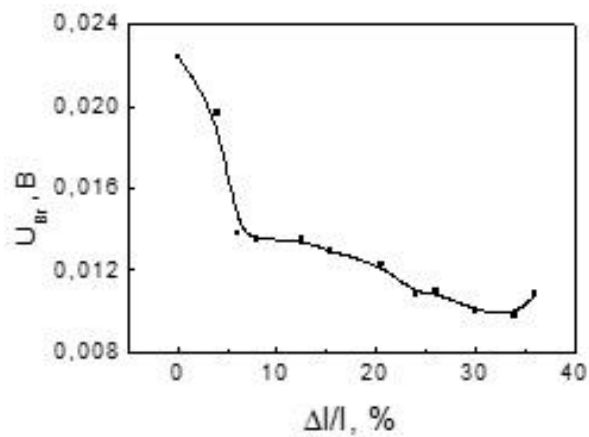


Рис. 3. Зависимость относительных значений остаточной индукции U_{Br} от относительного удлинения

На рис. 4 представлена зависимость величины внешних растягивающих напряжений, предварительно пластически деформированных растяжением образцов из низкоуглеродистой стали, при которых достигается минимум коэрцитивной силы, в зависимости от степени пластической деформации.

Данная зависимость свидетельствует о монотонном возрастании остаточных напряжений с ростом степени пластической деформации стали [3].

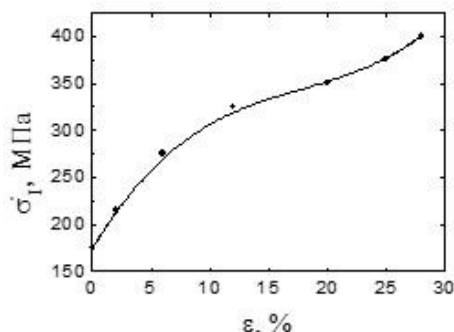


Рис. 4. Зависимость остаточных сжимающих напряжений σ_1^- , вызванных пластическим растяжением стали Ст3, от деформации ε

Заключение

Представленные результаты показывают возможности магнитных методов для оценки степени пластической деформации и величины остаточных напряжений в низкоуглеродистых сталях, деформированных растяжением. До 15 % относительного удлинения все полученные зависимости ведут себя похожим образом (наблюдается резкое уменьшение или увеличение магнитной характеристики). Для решения вопроса о расхождении в поведении исследованных параметров при более высоких степенях деформации, на наш взгляд, следует провести анализ совместного влияния на магнитные свойства сталей различного рода текстур, возникающих в процессе деформации.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Диагностика» №01201463329 (проект № 12-П-2-1031) при поддержке ОФИ УрО РАН (проект № 13-2-052-УВГ) и РФФИ (проект № 12-08-33098 мол_а_вед).

Литература

1. Ничипурук А. П., Сташков А. Н., Костин В. Н., Корх М. К. // Дефектоскопия. 2009. № 9. С. 31.

2. Ничипурук А. П., Розенфельд Е. В., Огнева М. С., Сташков А. Н.,
Королев А. В. // Дефектоскопия. 2014. № 10. С. 18.
3. Кулеев В. Г., Царькова Т. П. // Дефектоскопия. 2014. № 2. С. 34.