

УДК 620.168.37:531.781

УЧЕТ ВРЕМЕННОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ МАГНИТОУПРУГИМ РАЗМАГНИЧИВАНИЕМ

© В. Ф. Новиков¹, С. В. Сорокина¹, К. Р. Муратов¹, В. П. Устинов²

Статья поступила 2 апреля 2014 г.

Рассмотрена возможность применения метода магнитоупругого размагничивания для контроля механических напряжений. Приведены результаты исследования изменения во времени напряженности магнитного поля локальной намагниченности стального образца при различных нагрузке и термической обработке. Показано, что при долговременных испытаниях методом магнитоупругого размагничивания необходимо учитывать временную стабильность остаточной намагниченности.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние; магнитоупругое размагничивание; магнитоупругая память; мониторинг зданий и сооружений; поле рассеяния; коэрцитивная сила; релаксационные процессы.

Напряженно-деформированное состояние материала контролируется целым рядом средств. Зачастую преимущество отдается тензометрическому методу, однако и он отличается сложностью и трудоемкостью монтажа тензодатчиков, ненадежностью клеевого соединения, наличием проводов.

Для контроля механических напряжений в металле перспективным является метод, основанный на эффекте магнитоупругой памяти [1]. Метод привлекателен своей простотой, оперативностью и может с успехом дополнить тензометрический метод. Для его реализации необходимо в заданном месте (на металле крана, балки моста, вышки ЛЭП и т.п.) осуществить локальное намагничивание и отметить это место краской или маркером; сформированный датчик (индикатор) готов к работе. При нагружении или разгрузке металла его остаточная намагниченность уменьшается. Информацию получают, измеряя величину магнитного поля рассеяния локальной намагниченности с помощью датчика магнитометра. Особенностью предлагаемого

подхода является то, что металл «запоминает» максимальную нагрузку, которой подвергался элемент конструкции в заданном интервале времени от момента намагничивания до момента измерения. Метод позволяет оперативно оценивать изменение напряжений, обладает высокой производительностью. Его можно использовать для контроля степени снеговой нагрузки на металлоконструкцию [2], потери несущей способности некоторых элементов при мониторинге зданий и сооружений. Поскольку выходным параметром является магнитное поле рассеяния, то на результаты измерения могут влиять внешние и внутренние магнитные поля, временные изменения остаточной намагниченности [1 – 5].

Конструкционные стали обладают сравнительно невысоким значением коэрцитивной силы (2 – 10) А/см. Важно установить, в какой мере остаточная намагниченность конструкционных сталей в условиях климатического изменения температуры, вибраций, уровня электромагнитных полей стабильна во времени. Знание магнитных релаксационных процессов материала в определенных условиях позволило бы делать долгосрочные прогнозы, оценивать остаточный ресурс металлоконструкции или предупреждать

¹ Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень, Россия; e-mail: physics1@tsogu.ru

² ЗАО «Пургаз», г. Губкинский, Россия; e-mail: zaopurgaz@purgaz.com

дать аварийные ситуации, используя магнитоупругое размагничивание.

Цель работы — исследование временной стабильности магнитного поля рассеяния локальной намагниченности (остаточной намагниченности) конструкционных сталей и определение возможности применения метода магнитоупругого размагничивания для долгосрочного контроля механических напряжений.

Для эксперимента использовали специальную установку для нагружения образцов консольным изгибом, импульсное намагничивающее устройство и феррозондовый магнитометр ИКНМ-2ФП. Исследование проводили на сталях марок 09Г2С и 10.

Образцы из стали 09Г2С имели размеры $15 \times 198 \times 3$ мм, а из стали 10 — $24 \times 196 \times 3$ мм. Четыре образца отжигали при 600°C в течение 5 ч и четыре образца — при 900°C в течение 2 ч. Отжиг проводили в защитной атмосфере, поэтому окисление и обезуглероживание верхних слоев были минимизированы.

Образцы в виде прямоугольных пластин с одной стороны консольно закрепляли в немагнитном зажиме. Часть из них подвергали изгибающему воздействию с помощью винтов, расположенных перпендикулярно образцам на их свободном конце.

Значения максимальных механических напряжений в образцах вблизи консольного крепления вычисляли по формуле

$$\sigma_{\max} = EAd/L^2, \quad (1)$$

где E — модуль упругости ($E = 2,06 \cdot 10^{11}$ Па); A — стрела прогиба; d — толщина образца; L — длина изгибаемой части.

Применение расчетного метода определения механических напряжений обусловлено простотой формы образцов, постоянством нагрузки и температуры в процессе испытаний. Отклонения от реальных значений напряжений, которые могли бы быть определены тензометрическим методом, постоянны и не меняют сути предложенного подхода.

Вид термической обработки и рассчитанные напряжения стальных образцов приведены в таблице.

На образцах вблизи зажима намагничивался участок Ш-образным электромагнитом из электротехнической стали тремя разнонаправленными импульсами тока. В результате на пластине создавались два разнонаправленно намагниченных участка. Внешнее магнитное поле усиливает намагниченность одного из них и ослабляет — другого. Причем в силу симметричности магнитной петли гистерезиса в относительно малом земном поле изменения намагниченностей практически одинаковы. Поэтому ослаблялось воздействие магнитного поля лаборатории на результирующее поле рассеяния и уменьшалась ошибка измерения. Регистрацию нормальной составляющей напряженности магнитного поля рассеяния H_n проводили в течение 45 – 350 суток в месте локального намагничи-

вания. Результаты некоторых измерений представлены на рис. 1.

Релаксация остаточного магнитного поля рассеяния является результатом большого числа изменений локальных магнитных моментов вещества под действием случайного воздействия тепловых движений, внешних электромагнитных полей, вибраций и т.п. Можно ожидать экспоненциальный характер спада напряженности магнитного поля рассеяния, который характерен для подобных систем, поэтому в качестве уравнения аппроксимации выбрали характерную для релаксационных процессов экспоненциальную функцию. В экспоненте степенной показатель характеризует скорость релаксационных процессов.

В процессе отжига стали при 600°C происходят движение дислокаций, диффузионный дрейф примесных атомов, снимаются остаточные напряжения, уменьшается ее структурная неоднородность. Эти процессы приводят к уменьшению твердости, прочности и увеличению пластичности стали.

На рис. 1, а показаны зависимости напряженности магнитного поля рассеяния от времени для отожженных при 600°C образцов стали 10 и стали 09Г2С. Степенной показатель уравнения аппроксимации релаксационных процессов образца № 1 стали 10 ($\sigma = 0$ МПа) составил $5 \cdot 10^{-4}$ 1/сут, а образца № 2 ($\sigma = 272,4$ МПа) — $11 \cdot 10^{-4}$ 1/сут. По степенным показателям видно, что во втором образце релаксационные процессы протекают несколько быстрее, чем в первом. Причиной может быть механическая деформация, приводящая к диффузионному перераспределению примесных атомов (прежде всего, атомов углерода и азота), которое в свою очередь приводит к движению междоменных границ, что и сопровождается некоторым размагничиванием.

Степенной показатель уравнения аппроксимации релаксационных процессов образца № 3 стали 09Г2С ($\sigma = 0$ МПа) составил $4 \cdot 10^{-4}$ 1/сут, а образца № 4 ($\sigma = 136,2$ МПа) — $23 \cdot 10^{-4}$ 1/сут. Степенной показатель образца № 4 заметно больше, чем у образца № 3.

Марки стали, температура отжига и напряжения при долговременной постоянной деформации (нагрузке)

Номер образца	Марка стали	$T_{\text{отж}}, ^\circ\text{C}$	Расчетные напряжения σ_{\max} , МПа
1	10	600	0
2	10	600	272
3	09Г2С	600	0
4	09Г2С	600	204
5	09Г2С	900	170
6	09Г2С	900	590
7	10	900	Более σ_T ($\sigma_{0,2}$)
8	10	900	0

Примечание. Образец № 7 испытал напряжения выше предела текучести (σ_T или $\sigma_{0,2}$), что подтверждается наличием остаточной деформации после снятия нагрузки.

Отсюда также можно сделать вывод, что релаксационные процессы в неоднородно нагруженном образце (изгиб) протекают быстрее.

После отжига при 900 °С сталь имеет мелкозернистую структуру, высокую вязкость, пластичность, низкую твердость и пониженную коэрцитивную силу. Выдержка в вакуумной печи при данной температуре обеспечивает завершение фазовых превращений и растворение примесей. В результате формируется более равновесная структура.

На рис. 1, б показаны изменения магнитного поля на образцах после отжига при 900 °С. Образец № 5 из стали 09Г2С находился под нагрузкой $\sigma = 204,3$ МПа, а образец № 6 — под нагрузкой $\sigma = 170,2$ МПа. По степенным показателям уравнения аппроксимации видно, что релаксационные процессы протекают быстрее в более нагруженном образце. Подобная картина наблюдается и на образцах из стали 10.

Несмотря на то, что релаксационные процессы в нагруженных образцах протекают быстрее, сам эффект остается достаточно малым. Так за 45 дней убыль напряженности магнитного поля рассеяния составила порядка 2–3 % у стали 10 и 7–8 % у стали 09Г2С [6]. Причем наиболее интенсивно процесс протекает в течение 15–30 дней.

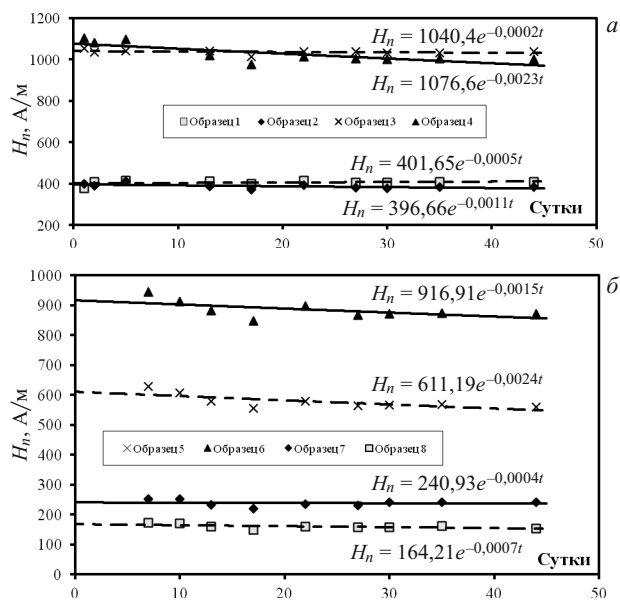


Рис. 1. Изменения напряженности магнитного поля рассеяния H_n намагниченного участка на образцах № 1–4 после отжига при 600 °С (а) и № 5–8 после отжига при 900 °С (б)

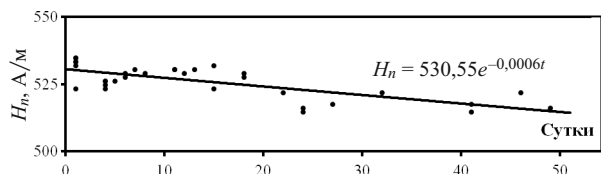


Рис. 2. Изменение напряженности магнитного поля рассеяния H_n намагниченного участка на трубчатом образце

Исследование релаксационных процессов в одно- и однородно нагруженном образце в практически экранированном состоянии осуществлялось с помощью винтового зажима для нагружения. Использовали образец из стали 09Г2С в виде тонкостенной трубки диам. 30 мм и длиной 140 мм. Образец в состоянии поставки, долгое время находившийся без нагрузки, закрепляли в специальной установке и нагружали до 250 МПа. Внутри образца размещали две намагничивающие катушки, включенные встречно. С помощью импульсного устройства многократными импульсами намагничивали центральную область образца. Затем катушки вынимали, а на их место помещали два феррозонда, включенных встречно, что исключало (минимизировало) влияние внешнего магнитного поля.

Показатель скорости релаксации на образце, не прошедшем термическую обработку, составил $6 \cdot 10^{-4}$ 1/сут, что говорит о весьма малых релаксационных процессах при $\sigma = 250$ МПа. Изменение напряженности магнитного поля рассеяния за 50 суток составило 3–4 % (рис. 2).

Результаты долговременных измерений магнитных полей рассеяния образцов приведены на рис. 3.

Следует отметить высокую стабильность магнитного поля локальной намагниченности у наклепанного изгибом перед испытанием образца № 7. Казалось бы, что после наклепа вновь созданная дислокационная структура спровоцирует сток примесных атомов к дислокациям и создание вокруг них «облаков» Коттрелла, а это в свою очередь приведет к движению

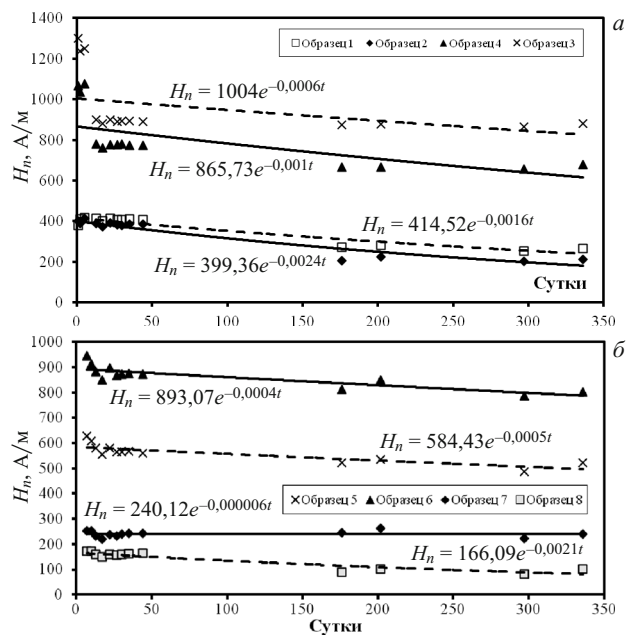


Рис. 3. Долговременные изменения напряженности магнитного поля рассеяния H_n намагниченного участка на образцах № 1–4 после отжига при 600 °С и № 5–8 после отжига при 900 °С

междоменных границ, а следовательно, к размагничиванию. Но, вероятно, взаимодействие междоменных границ с системой дислокаций сильно наклепанного образца превалирует над другими процессами.

Видно, что за последующие 300 дней убыль напряженности магнитного поля рассеяния для образцов № 1 – 4 составила порядка 30 – 35 % без нагрузки, а под нагрузкой — 2 % у стали 10 и 7 – 8 % у стали 09Г2С; для образцов № 5 – 8 — 30 – 35 % у стали 10 и 15 – 20 % у стали 09Г2С.

Таким образом, релаксационные процессы в металлоконструкциях, испытывающих механические напряжения в пределах упругости, невелики и их можно учесть в первом приближении с помощью экспоненциальной функции при проведении долгосрочного контроля напряжений в элементах конструкций мостов, башен, вышек и т.п. Например, для изучения снеговой и ветровой нагрузок достаточно 3 – 6 месяцев, тогда как многие сезонные изменения длятся не более 8 месяцев и могут быть учтены по результатам приведенных исследований [7].

ЛИТЕРАТУРА

1. Мужичкий В. Ф., Попов Б. Е., Безлюдька Г. Я. Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса стальных металлоконструкций подъемных сооружений и сосудов, работающих под давлением / Дефектоскопия. 2001. № 1. С. 38 – 46.
2. Отчет о деятельности федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2005 году / Сайт «Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору», [2014]: — Режим доступа: http://arch.gosnadzor.ru/osnovnaya_deyatelnost_slujby/otcheti-o-deyatelnosti-sluzhbi-godovic. — Загл. с экрана. (01.02.2014).
3. Яновский Б. М. Земной магнетизм. Ч. 2. — Л.: ЛГУ, 1963. — 461 с.
4. Вонсовский С. В., Шур Я. С. Ферромагнетизм. — М.: ГИТЛ, 1948. — 816 с.
5. Болотов А. А., Новиков В. Ф., Бабушкина С. В., Кулак С. М. Временная нестабильность остаточной намагниченности стали / Новые материалы, неразрушающий контроль и наукоемкие технологии в машиностроении / Материалы III международной научно-технической конференции. — Тюмень: Феликс, 2005. С. 279 – 281.
6. Новиков В. Ф., Бахарев М. С., Сорокина С. В. Неразрушающий контроль снеговой и ветровой нагрузки металлоконструкций в режиме магнитоупругой памяти / Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2008. № 3. С. 51 – 54.