

СВЯЗЬ МАГНИТОУПРУГОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МАГНИТОУПРУГОГО РАЗМАГНИЧИВАНИЯ СТАЛЕЙ 60Г И 65Г С КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛОЙ И МАГНИТОСТРИКЦИЕЙ

© 2022 г. В.Ф. Новиков^{1,*}, С.М. Кулак^{1,**}, К.Р. Муратов^{1,***}, А.С. Парахин^{1,****}

¹Тюменский индустриальный университет, Россия 625000 Тюмень, ул. Володарского, 38

E-mail: *vitaly.nowikov2017@yandex.ru; **ksm-rabochi@rambler.ru; ***muratows@mail.ru; ****parahinas@tyuiu.ru

Поступила в редакцию 12.02.2022; после доработки 15.04.2022

Принята к публикации 29.04.2022

Посвящается памяти нашего земляка академика Горкунова Эдуарда Степановича, начинавшего свою научную и педагогическую деятельность в индустриальном институте г. Тюмени. Эдуард Степанович был одним из инициаторов разрабатываемого в предлагаемой статье направления [1].

Проведены исследования магнитоупругого размагничивания сталей 60Г и 65Г после закалки и отпуска при их статическом и динамическом механическом напряжении. По результатам исследований определена магнитоупругая чувствительность к прикладываемым нагрузкам и ее зависимость от режима термообработки стали. Измерены магнитострикция и коэрцитивная сила сталей 60Г и 65Г. Установлена связь магнитоупругой чувствительности исследуемых сталей, уровня упругих напряжений с их коэрцитивной силой и магнитострикцией. Предложена методика оценки магнитострикции конструкционной стали по величине коэрцитивной силы и уровню магнитоупругого размагничивания при механическом воздействии на сталь. Полученные результаты могут способствовать повышению точности оценки упругих напряжений в стальной конструкции магнитоупругими методами.

Ключевые слова: магнитоупругое размагничивание, магнитострикция, смещение доменных границ, магнитное вращение магнитных моментов, ферромагнетик, упругие напряжения, ударное нагружение.

DOI: 10.31857/S0130308222060069; EDN: BNBGTA

ВВЕДЕНИЕ

Константы магнитострикции ферромагнитной стали определяются химическим составом и фазово-кристаллической структурой ферромагнетика. Положительная составляющая магнитострикции определяется пространственным распределением магнитных фаз и ее величина для одного и того же материала может иметь значение близкое к нулю или к константе в зависимости от ее текстуры [2—5]. Поэтому магнитострикция является самым структурно чувствительным магнитным параметром механических напряжений [6—10], пластической [11, 12], усталостной деформации [11—15] и уровня термомагнитной обработки. Она входит в формулу для магнитоупругой энергии и определяет магнитоупругие явления, в том числе магнитоупругую чувствительность коэрцитивной силы, остаточной намагниченности к напряжениям [11, 16, 17] и пьезомагнитный эффект остаточно намагниченного состояния [15]. Поэтому, несмотря на сложность ее измерения, изучение магнитострикции является актуальным.

Относительную чувствительность магнитоупругого материала можно характеризовать, как и у тензорезисторов, коэффициентом тензочувствительности [18]. Магнитоупругие свойства материала характеризуются также относительной магнитоупругой чувствительностью [19—21].

Применение магнитоупругих явлений в неразрушающем контроле слабо развито, так как их реализация предполагает воздействие на ферромагнетик не только магнитного поля, но и внешнего механического напряжения. В лабораторных условиях для отдельного образца стали его легко осуществить не только в одноосном, но и трехосном вариантах. Контролируемое нагружение конструкции и ее элементов возможно далеко не всегда. Однако локальную нагрузку можно осуществлять с помощью таких устройств силового воздействия как струбцина, домкрат и пружинный ударник [22—24]. При этом измеряется напряженность магнитного поля рассеяния локальной намагниченности и оценивается такой комплексный параметр, как магнитоупругая

чувствительность Λ остаточного намагниченного состояния стали (МУЧ), зависящая главным образом от ее магнитной жесткости и магнитострикции:

$$\Lambda = \frac{H_0 - H_\sigma}{H_0 \cdot \sigma} = \frac{\delta H}{\sigma}, \quad (1)$$

где H_0 , H_σ — напряженность магнитного поля рассеяния локальной намагниченности стали до и после ее нагружения—разгрузки соответственно; σ — амплитуда приложенных к стали механических напряжений.

Использование полевой зависимости магнитострикции для объяснения магнитоупругих явлений в низкоуглеродистой стали не всегда корректно, так как она является разностью двух составляющих магнитострикции: магнитострикции смещения и магнитострикции вращения [5, 11, 25]. Например, ноль на полевой кривой магнитострикции (рис. 1) значит лишь, что магнитострикция смещения скомпенсирована магнитострикцией вращения, и не факт, что магнитоупругая энергия при этом поле H равна нулю. Разделение на составляющие магнитострикции железа рассматривалось в работе [5] теоретически. В работе [11] использовали графический подход, а в исследованиях [25—27] — аппроксимирующую функцию Ланжевена.

Целью работы явилось исследование зависимости магнитоупругой чувствительности (МУЧ) магнитоупругого размагничивания сталей 60Г и 65Г от температуры отпуска и уровня упругих напряжений и ее связи с коэрцитивной силой и магнитострикцией смещения.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБРАЗЦЫ

Исследовали сталь 60Г в виде стандартных образцов для механических испытаний длиной 100 мм, диаметром рабочей части 10 мм и сталь 65Г в виде дисков диаметром 75 мм, толщиной 9,8 мм. Намагниченность M_r исследуемых сталей определяли по напряженности магнитного поля рассеяния $H \sim M_r$ феррозондовым магнитометром и микроберметром Ф191, а коэрцитивную силу — по петле гистерезиса в полях 140 кА/м. Магнитострикцию измеряли мостовым методом в магнитном поле соленоида на образцах для механических испытаний (сталь 60Г) с помощью наклеиваемых тензорезисторов. Калибровку магнитострикции осуществляли на никелевом стандартном образце. В ходе проводимых исследований вычисляли магнитоупругую чувствительность стали 60Г к напряжениям осевого растяжения и стали 65Г к напряжениям локального сжатия после ударного воздействия. Образцы стали 60Г растягивались 10—30 раз в стенде на основе машины ЦД-20ПУ вдоль направления их намагничивания магнитным полем соленоида. Образцы из стали 65Г в виде дисков намагничивали путем многократных (до 10 раз) пропусков импульсов тока через витки намагничивающей катушки диаметром 30 мм, располагаемой на их поверхности. В результате в образцах создавалась область локальной остаточной намагниченности (ЛОН). С помощью феррозондовых датчиков магнитного поля магнитометра ИКНМ-2ФП определяли в максимуме тангенциальную составляющую напряженности магнитного поля рассеяния H_0 ЛОН. Создавались напряжения локального сжатия дисков вдоль нормали в центре ЛОН с помощью ударного воздействия на них, после чего снова измерялась напряженность H_σ магнитного поля рассеяния ЛОН. Величину магнитоупругой чувствительности Λ стали 65Г к напряжениям сжатия σ ударом рассчитывали по формуле (1). Ударное локальное нагружение разного уровня (пять раз), соосное с ним намагничивание дисков из стали 65Г и магнитные измерения проводили в устройстве, подробно описанном в работе [24].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полевая зависимость магнитострикции $\lambda_{\text{экс}}(H)$ стали 60Г представлена на рис. 1. Согласно [5, 11, 25], она является суммой двух монотонных функций:

$$\lambda_{\text{экс}}(H) = \lambda_{\text{см}}(H) + \lambda_{\text{вр}}(H), \quad (2)$$

где $\lambda_{\text{см}}(H)$ и $\lambda_{\text{вр}}(H)$ пропорциональны константам λ_{100} и λ_{111} соответственно.

В полях на порядок больших, чем коэрцитивная сила стали 60Г (200—4000 А/м), процессы смещения практически заканчиваются, магнитострикция смещения достигает насыщения и перестает вносить изменения в кривую экспериментальной магнитострикции. В этом случае

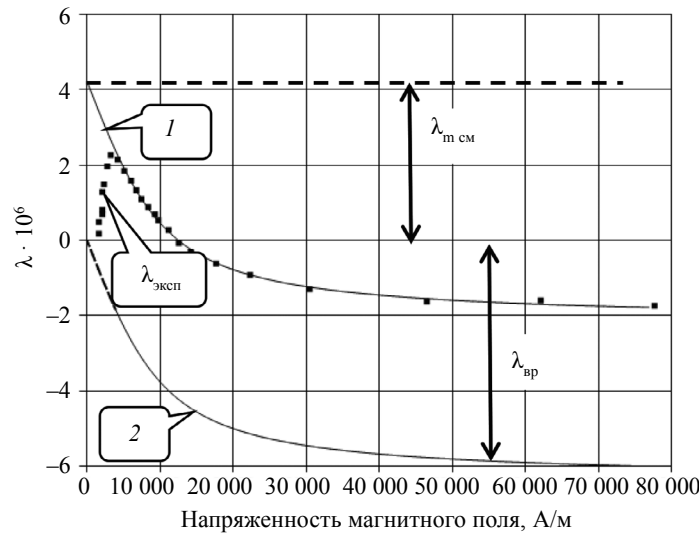


Рис. 1. Полевая зависимость (маркер ■) магнитоэлектрики закаленной стали 60Г, отпущенной при 700 °С с аппроксимирующей функцией Ланжевена (1) и кривой $\lambda_{вр}$ (2).

зависимость $\lambda_{эксп}(H)$ (кривая маркера ■ на рис. 1) будет являться зависимостью $\lambda_{вр}(H)$ (кривая 2 на рис. 1) отрицательной составляющей магнитоэлектрики, сдвинутой в вверх на величину $\lambda_{м см}$. Для ее описания в качестве аппроксимирующей использовалась функция Ланжевена (3) (кривая 1 на рис. 1) [25—27], которая, как видно из рис. 1, хорошо согласуется с экспериментом при следующих постоянных: $C_1 = -6,2389$, $C_2 = 4,0963$, $\alpha_1 = 0,02355$. Результат экстраполяции $\lambda_{м см} = 4,1 \cdot 10^{-6}$ и $\lambda_{вр} = -6,2 \cdot 10^{-6}$ при отклонении 0,013:

$$\lambda = C_1 L(\alpha_1 H) + C_2, \quad (3)$$

$$L(x) = \text{cth}(x) - \frac{1}{x}.$$

При $H = 0$ она начинается с координаты $\lambda_{м см}$, равной $\sim 4 \cdot 10^{-6}$ (см. рис. 1). Кривая $\lambda_{вр}(H)$, сдвинутая вниз на $\lambda_{м см}$, т.е. в начало координат, будет представлять собой магнитоэлектрику вращения — отрицательную составляющую магнитоэлектрики. В этом случае мы исключаем вклад в результирующую (экспериментальную) магнитоэлектрику процессов смещения.

Положительная составляющая магнитоэлектрики смещения выразится кривой $\lambda_{см}(H) = \lambda_{эксп}(H) - \lambda_{вр}(H)$ для полей, обеспечивающих насыщение процессов смещения.

По результатам разложения экспериментальных кривых $\lambda_{эксп}(H)$ для стали 60Г в отпущенном состоянии были построены последовательно четыре зависимости (рис. 2): расчетного значения $\lambda_{м}$ для наибольшего поля, положительных (пиковых) $\lambda_{п}$ значений магнитоэлектрики в максимуме, отрицательных экспериментальных значений магнитоэлектрики, в максимальном поле $\lambda_{с}$ и отрицательной составляющей магнитоэлектрики, полученной для тех же полей $\lambda_{вр}$ в зависимости от температуры отпуска закаленной стали 60Г (без учета размагничивающего фактора формы).

Видно, что составляющие $\lambda_{м}$ и $\lambda_{вр}$ с ростом температуры отпуска стали увеличились по абсолютной величине в 8 раз. Темп роста магнитоэлектрики $\lambda_{м}$ и $\lambda_{вр}$ больше всего в диапазоне температур 300—400 °С. На рис. 3 показана зависимость намагниченности $M_{рс}$ после приложения и снятия напряжений растяжения 25, 65, 130, 195, 325 МПа, а на рис. 4 — величины коэрцитивной силы H_c стали 60Г от температуры отпуска $T_{отп}$.

Величина намагниченности $M_{рс}$ во всем температурном интервале отпуска изменилась в (4—20) раз, а H_c в 3,7 раз. На кривых $M_{рс}(T_{отп})$ и $H_c(T_{отп})$ в диапазоне температур 450—550 °С наблюдается характерный пик этих величин. Он связан с выделением карбидов, дроблением доменной структуры и возникновением замыкающих доменов [28].

Изменение магнитоупругой чувствительности стали 60Г, определяемой вследствие пропорциональности $H \sim M_r$ соотношением $\Lambda = (M_{r0} - M_{рс}) / (M_{r0} \cdot \sigma)$, показана на рис. 5. Видно, что ее монотонный рост прерывается резким скачком вниз в диапазоне температур 450—550 °С.

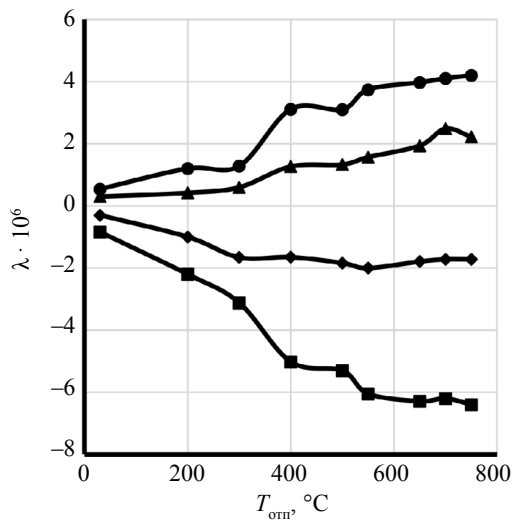


Рис. 2. Зависимость составляющих: $\lambda_{вп}$ (■), $\lambda_{с}$ (◆), $\lambda_{н}$ (▲), $\lambda_{м}$ (●) магнотрикции стали 60Г от температуры $T_{отп}$ ее отпуска.

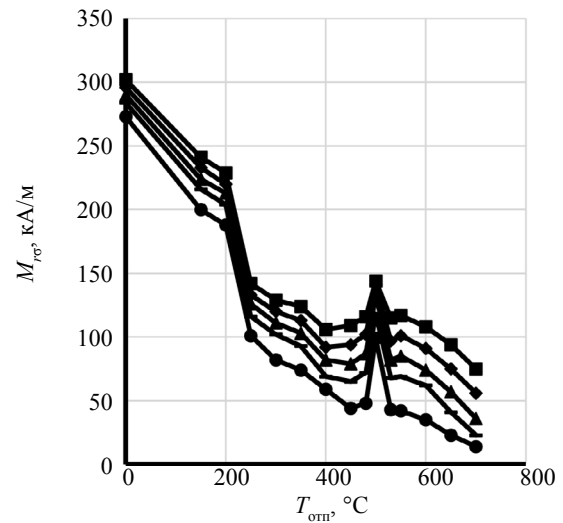


Рис. 3. Зависимость остаточной намагниченности $M_{рс}$ стали 60Г после приложения—снятия напряжений растяжения σ : 25(■), 65(◆), 130(▲), 195(-), 325(●) МПа от температуры отпуска $T_{отп}$.

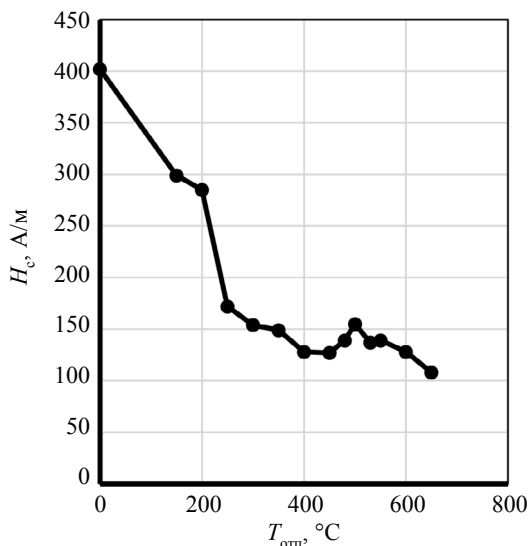


Рис. 4. Зависимость коэрцитивной силы H_c стали 60Г от температуры отпуска $T_{отп}$.

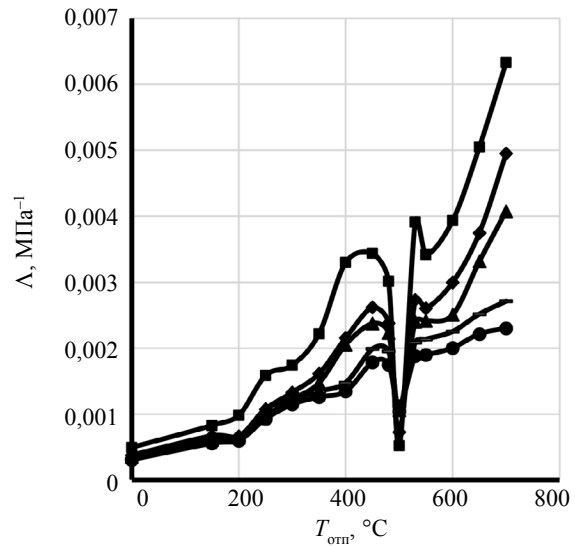


Рис. 5. Зависимость магнитоупругой чувствительности Λ стали 60Г от температуры отпуска $T_{отп}$ для напряжений σ : 25(■), 65(◆), 130(▲), 195(-), 325(●) МПа, создаваемых осевым растяжением.

Магнитоупругая чувствительность возросла в конечном результате в 7—12 раз, так же, как магнотрикция смещения (см. рис. 2). При используемом типе силового воздействия (нагружение—разгружение) размагничивание осуществляется в основном за счет процессов смещения, которое определяет гистерезис в сталях. Мы исходили из того, что гистерезис процессов вращения при используемых нагрузках и соответственно магнитоупругой энергии невелик и роль магнотрикции вращения практически не влияет на магнитоупругое размагничивание.

Практически, важно было выяснить, как изменяются магнитные и магнитоупругие параметры при переходе от остаточно намагниченного образца конечных размеров к локальной намагниченности (ЛОН), создаваемой импульсом тока катушки диаметром 30 мм на дисках диаметром 75 мм. Нагружение части локальной намагниченности осуществлялось ударом бойка диаметром 11 мм о поверхность стали. На рис. 6 и 7 показана зависимость напряженности магнитного поля рассеяния

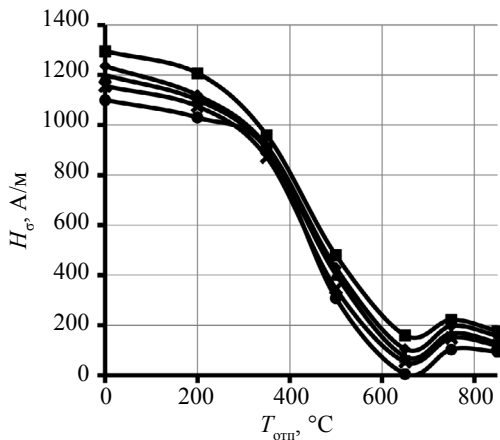


Рис. 6. Зависимость напряженности магнитного поля рассеяния H_σ ЛОН образца стали 65Г в виде диска после приложения напряжений σ ударами: 12 (■), 25 (◆), 38 (▲), 51(x) и 76 (●) МПа от температуры ее отпуска $T_{отп}$.

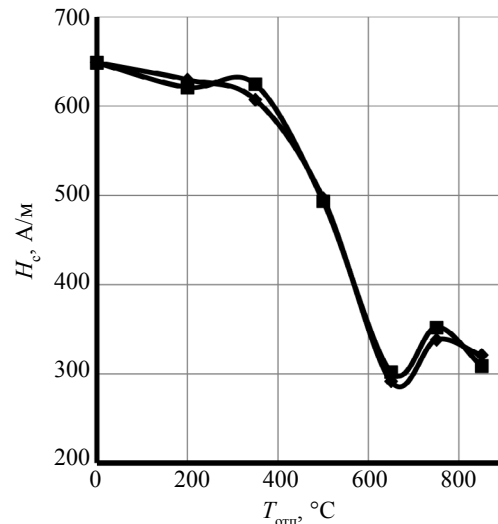


Рис. 7. Зависимость коэрцитивной силы H_c стали 65Г, измеренной в продольном (◆) и поперечном (■) направлениях, от температуры отпуска $T_{отп}$.

локальной намагниченности H_σ стали 65Г после воздействия ударными напряжениями 12, 25, 38, 51 и 76 МПа и величины ее коэрцитивной силы H_c от температуры отпуска соответственно. Видно, что коэрцитивная сила закаленной стали 65Г в 1,6 раз больше, чем стали 60Г, напряженность поля H_σ больше в 4—4,2 раза.

Величина напряженности магнитного поля рассеяния H_σ ЛОН во всем температурном интервале отпуска изменилась в 10—11 раз, а H_c — в 2,1 раза. На кривых $H_\sigma(T_{отп})$ и $H_c(T_{отп})$ в диапазоне температур 650—775 °С так же наблюдается ярко выраженный пик этих величин, связанный с выделением карбидов, дроблением доменной структуры и возникновением замыкающих доменов. Магнитоупругая чувствительность Λ стали 65Г к ударным напряжениям в диапазоне температур до 200 °С не изменяется, затем резко увеличивается вплоть до 650 °С. В целом, МУЧ возросла в конечном результате в 7,6 раза (рис. 8).

Сопоставление магнитных и магнитоупругих свойств стандартных образцов из стали 60Г для механических испытаний (практически цилиндра) намагничиваемого целиком вдоль оси в магнитном поле соленоида, подвергаемого одноосным (однородным) растяжениям, и образцов из стали 65Г в форме дисков, намагничиваемых локально импульсом магнитного поля накладной катушки нормально к поверхности и нагружаемых сжимающим ударом, показывает, что исследуемые явле-

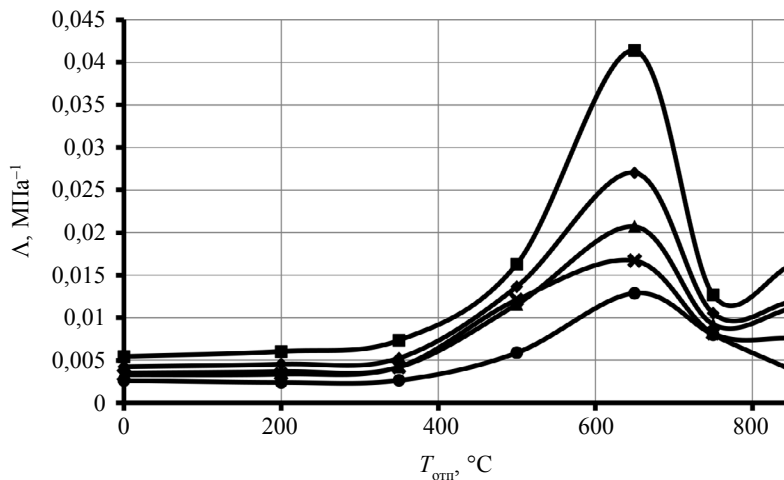


Рис. 8. Зависимость магнитоупругой чувствительности Λ дискового образца стали 65Г от температуры отпуска $T_{отп}$ при различных ударных напряжениях: 12(■), 25(◆), 39(▲), 51(x), 76(●) МПа.

ния не только качественно похожи: пропорциональность коэрцитивной силы H_c напряженности магнитного поля рассеяния H локальной намагниченности, но и близкие значения магнитоупругой чувствительности Λ к различным видам нагружения. Примечательно, что локальная намагниченность стали 65Г наводится на площадь круга диаметром 30 мм, ударная нагрузка прикладывается непосредственно на часть намагниченной площади (диаметр ударника 11 мм), но изменение напряженности магнитного поля локальной намагниченности стали 65Г практически такое же, как и всего цилиндрического образца из стали 60Г при его нагружении осевым растяжением, т.е. ударная волна, пробегающая по образцу, осуществляет его магнитоупругое размагничивание. Это вселяет надежду на возможное техническое применение способа локального нагружения для изучения магнитоупругих явлений в сталях. Так, разброс в показаниях при повторяющихся измерениях напряженности поля H_c после ударного нагружения и ошибка при определении таким способом магнитоупругой чувствительности составляет 5—9 %

Связь между магнитоупругой чувствительностью Λ , коэрцитивной силой H_c и соответствующей магнитострикцией λ (λ_m или λ_n) стали может быть получена из гиперболического [11] и экспоненциального [24, 28] законов магнитоупругого размагничивания соответственно.

При гиперболическом приближении [11]:

$$\beta_i \frac{H_c \cdot \Delta H}{H_0 \cdot H_c \cdot \Delta \sigma} = \Lambda \frac{H_c}{H_c} = \lambda. \quad (4)$$

При экспоненциальном приближении [24, 28]:

$$\gamma_i \frac{H_c \cdot \Delta H}{H_0 \cdot \Delta \sigma} = \Lambda \cdot H_c = \lambda, \quad (5)$$

где Λ — магнитоупругая чувствительность остаточно намагниченного образца (элемента образца) (1), β_i и γ_i — коэффициенты пропорциональности.

Графически эта связь для стали 60Г показана на рис. 9 и 10. Видно, что пиковое значение магнитострикции λ_n лучше коррелирует с предложенными уравнениями регрессии, чем λ_m . Согласно приведенным на рис. 9 и 10 результатам, используя предложенную связь коэрцитивной силы и магнитоупругой чувствительности, можно оценивать магнитоупругим методом магнитострикцию λ_m и λ_n с погрешностью от 4 до 15 %.

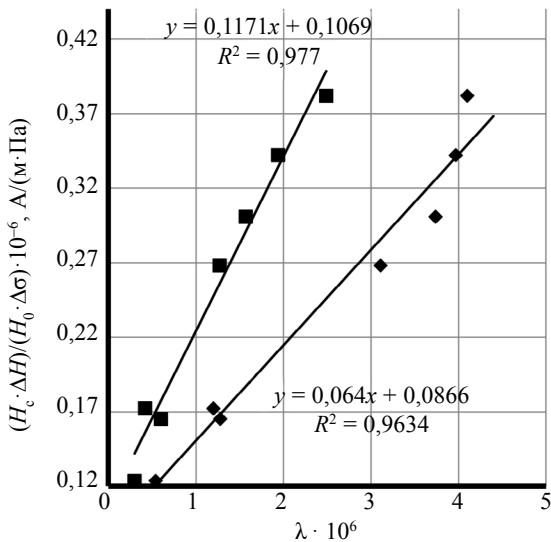


Рис. 9. Зависимость произведения магнитоупругой чувствительности Λ стали 60Г и ее коэрцитивной силы H_c от магнитострикции λ_m (♦) и λ_n (■) соответственно.

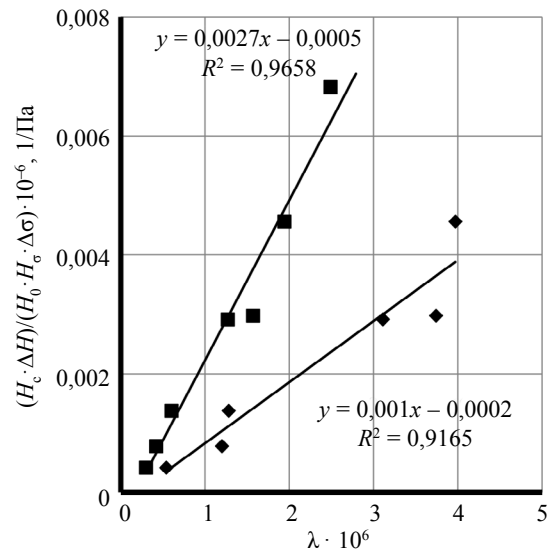


Рис. 10. Зависимость отношения произведения магнитоупругой чувствительности Λ стали 60Г и ее коэрцитивной силы H_c к напряженности магнитного поля рассеяния H_c после нагружения — разгрузки от магнитострикции λ_m (♦) и λ_n (■) соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведено разделение экспериментальной полевой зависимости магнитоэлектрической отпущенной стали 60Г на положительную составляющую, обусловленную процессами смещения междоменных границ, и отрицательную, связанную с процессами вращения.

2. Установлена связь магнитоэлектрической смещения и коэрцитивной силы с чувствительностью сталей 60Г и 65Г к упругим напряжениям при магнитоупругом размагничивании. Высказано предположение, что оно реализуется главным образом процессами необратимого смещения междоменных границ.

3. Предложена методика косвенной оценки магнитоэлектрической конструкционной стали по величине магнитоупругого размагничивания при механическом воздействии на сталь и коэрцитивной силы. Полученные результаты могут способствовать повышению точности оценки упругих напряжений в стальной конструкции магнитоупругими методами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горкунов Э.С., Новиков В.Ф., Ничипурук А.П., Нассонов В.В., Кадров А.В., Татлыбаева И.Н. Устойчивость остаточной намагниченности термически обработанных стальных изделий к действию упругих деформаций // Дефектоскопия. 1991. № 2. С. 68—76.

2. Акулов Н.С. Ферромагнетизм. М.—Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1939. 188 с.

3. Вонсовский С.В., Шур Я.С. Ферромагнетизм. М.—Л.: ГИТТЛ, 1948. 816 с.

4. Бозорт Р. Ферромагнетизм. М.: ГИТТЛ, 1956. 784 с.

5. Takagi M. On a statistical Domain theory of Ferromagnetic crystals. Part II //Sci. Rep. Tohoku Imp. Univ. 1939. V. 28. P. 85—127.

6. Деордиев Г.И., Бикташев Т.Х. Магнитоэлектрический способ измерения напряжений в элементах металлоконструкций // Дефектоскопия. 1977. № 3. С. 82—91.

7. Горкунов Э.С., Субачев Ю.В., Поволоцкая А.М., Задворкин С.М. Влияние упругой одноосной деформации среднеуглеродистой стали на ее магнитоэлектрическую в продольном и поперечном направлениях // Дефектоскопия. 2013. № 10. С. 40—52.

8. Горкунов Э.С., Поволоцкая А.М., Соловьев К.Е., Задворкин С.М. Влияние магнитоупругого эффекта на гистерезисные свойства среднеуглеродистой стали при одноосном нагружении // Дефектоскопия. 2010. № 9. С. 17—25.

9. Горкунов Э.С., Мушников А.Н. Магнитные методы оценки упругих напряжений в ферромагнитных сталях (обзор) // Контроль. Диагностика. 2020. № 12. С. 4—23.

10. Сербин Е.Д., Костин В.Н. О возможности оценки магнитоэлектрических характеристик объемных ферромагнетиков по их магнитным свойствам // Дефектоскопия. 2019. № 5. С. 31—36.

11. Новиков В.Ф., Бахарев М.С. Магнитная диагностика механических напряжений в ферромагнетиках. Тюмень: Вектор Бук, 2001. 219 с.

12. Новиков В.Ф., Кострюкова Н.К., Нассонов В.В., Федоров Б.В., Рыбникова О.И. Изменение магнитоэлектрической некоторых сталей на начальных стадиях пластической деформации // Дефектоскопия. 1995. № 7. С. 105—110.

13. Новиков В.Ф., Тихонов В.Ф. К изучению усталостных изменений в металле при изгибных колебаниях лопаток турбин магнитными и магнитоупругими методами // Проблемы прочности. 1981. № 5. С. 13—17.

14. Горкунов Э.С., Поволоцкая А.М., Задворкин С.М., Путилова Е.А., Мушников А.Н., Базулин Е.Г., Вопилкин А.Х. Особенности поведения магнитных и акустических характеристик горячекатаной стали 08Г2Б при циклическом нагружении // Дефектоскопия. 2019. № 11. С. 21—31.

15. Новиков В.Ф., Яценко Т.А., Бахарев М.С. К природе пьезомагнитного эффекта остаточного намагниченного состояния магнетика // Известия ВУЗов. Нефть и газ. 1998. № 4. С. 96—102.

16. Загидулин Р.В., Загидулин Т.Р., Осипов К.О. Исследование влияния структуры и элементного состава сплава на результаты магнитного контроля напряженного состояния металла // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84. № 7. С. 55—61.

17. Мушников А.Н. Влияние объемного напряженного состояния на магнитные характеристики конструкционных сталей / Дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2021. 163 с.

18. ГОСТ Р 55612—2013 Национальный стандарт Российской Федерации. Контроль неразрушающий магнитный Термины и определения. Magnetic non-destructive inspection. Terms and definitions ОКС 01.040.19 19.100. Дата введения 2015-01-01.

19. Гольдштейн Ю.Б. Основы механики твердого деформируемого тела / Учебное пособие. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2005. 872 с.

20. Кошелев А.И. Механика деформируемого твердого тела / Электронный учебник. Санкт-Петербург: С.-Петерб. гос. ун-т, 2005. 287 с.

21. *Елисеев В.В.* Механика деформируемого твердого тела. Санкт-Петербург: С.-Петербург. гос. ун-т, 2006. 231 с.
22. *Новиков В.Ф., Кулак С.М., Парахин А.С.* Определение осевых напряжений стали в режиме памяти по экспоненциальному закону магнитоупругого размагничивания // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. Т. 87. № 6. С. 54—62.
23. *Муратов К.Р., Новиков В.Ф., Нерадовский Д.Ф., Казаков Р.Х.* Магнитоупругое размагничивание стали под действием циклического нагружения // Физика металлов и металловедение. 2018. Т. 119. № 1. С. 19—25.
24. *Novikov V.F., Kulak S.M., Parakhin A.S.* Testing Uniaxial Stresses in Steels with Allowance for Their Magnetoelastic Sensitivity // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 4. P. 310—319.
25. *Novikov V.F., Muratov K.R., Kulak S.M., Parakhin A.S., Sokolov R.A.* Features of Magnetostriction in Carbon Steels // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2021. Is. 5. P. 6—14.
26. *Калиткин Н.Н.* Численные методы. М.: Наука, 1978. 508с.
27. *Парахин А.С.* ЭВМ в лабораторном практикуме / Учебное пособие. Курган: Изд-во Кург. гос. ун-та, 2000. 109 с.
28. *Михеев М.Н., Горкунов Э.С.* Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. М.: Наука, 1993. 252 с.