

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-9-41-47>

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОУПРУГОГО РАЗМАГНИЧИВАНИЯ ЛОКАЛЬНО НАМАГНИЧЕННОЙ СТАЛИ

© **Виталий Фёдорович Новиков, Сергей Михайлович Кулак*,
Камиль Рахимчанович Муратов, Владимир Викторович Проботюк**

Тюменский индустриальный университет, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38; *e-mail: kulaksm@tyuiu.ru

*Статья поступила 25 марта 2023 г. Поступила после доработки 31 марта 2023 г.
Принята к публикации 24 июля 2023 г.*

Для повышения точности определения механических напряжений в стали методом магнитоупругого размагничивания (магнитоупругой памяти) дополнительно измеряют магнитоупругую чувствительность материала к упругим напряжениям путем приложения или снятия дополнительной нагрузки известной величины. В работе представлены результаты исследования магнитоупругого размагничивания локально намагниченной стали путем вариаций напряжений одноосного растяжения или сжатия на фоне базовой нагрузки. Проведена оценка магнитоупругой чувствительности исследуемой стали в нагруженном состоянии к вариативным напряжениям. Показано, что определение магнитоупругой чувствительности стали к вариативным нагрузкам позволяет повысить точность оценки базовых напряжений в стальной конструкции магнитоупругими методами. Установлено, что уменьшение напряженности магнитного поля рассеяния локальной остаточной намагниченности стали после вариативного нагружения (или разгрузки) экспоненциально зависит от величины испытываемых ею базовых напряжений. Показана возможность контроля одноосных механических напряжений в стальных конструкциях в режиме магнитоупругой памяти, основанном на зависимости напряженности магнитного поля рассеяния локальной остаточной намагниченности стали от испытываемых ею одноосных напряжений. Предложен способ контроля одноосных напряжений в элементах стальных конструкций методом магнитоупругой памяти с учетом измеренной магнитоупругой чувствительности материала. Полученные результаты могут быть использованы при разработке методики контроля напряженно-деформированного состояния стальных конструкций, испытывающих в процессе эксплуатации одновременно статические и динамические нагрузки.

Ключевые слова: магнитоупругое размагничивание; напряженное состояние; варьируемые напряжения; локальное намагничивание.

STUDY OF MAGNETOELASTIC DEMAGNETIZATION OF LOCALLY MAGNETIZED STEEL

© **Vitaly F. Novikov, Sergey M. Kulak*, Kamil R. Muratov, Vladimir V. Probotyuk**

Tyumen Industrial University, 38, ul. Volodarskogo, Tyumen, 625000, Russia; *e-mail: kulaksm@tyuiu.ru

Received March 25, 2023. Revised March 31, 2023. Accepted July 24, 2023.

To improve the accuracy of determining mechanical stresses in steel by the method of magnetoelastic demagnetization (magnetoelastic memory), the magnetoelastic sensitivity of the material to elastic stresses is additionally measured by applying or removing an additional load of a known value. We present the results of studying the magnetoelastic demagnetization of locally magnetized steel by varying stresses of the uniaxial tension or compression against a background of the base load. The magnetoelastic sensitivity of the steel in a loaded state to variable stresses has been assessed. It is shown that the determination of the magnetoelastic sensitivity of the steel to variable loads makes it possible to improve the accuracy of estimating base stresses in the steel structure using magnetoelastic methods. It is revealed that a decrease in the strength of the magnetic scattering field of the local residual magnetization (LRM) of the steel after variable loading (or unloading) exponentially depends on the magnitude of the base stresses. The possibility of controlling the uniaxial mechanical stresses in steel structures in the magnetoelastic memory mode which is based on the dependence of the strength of magnetic scattering field of the local residual magnetization of the steel on the uniaxial stresses is shown. A method for monitoring uniaxial stresses in the elements of steel structures by the method of magnetoelastic memory is proposed using the measured magnetoelastic sensitivity of the material. The results obtained can be used in the development of a

method for monitoring the stress-strain state of steel structures during operation under the simultaneous effect of static and dynamic loads.

Keywords: magnetoelastic demagnetization; stress state; variable stresses; local magnetization.

Введение

Параметры петли гистерезиса ферромагнетика под действием упругой деформации заметно меняются. На этой основе разработаны методы и приборы для контроля напряженно-деформированного состояния (НДС) сталей, работа которых базируется на анизотропии магнитной проницаемости, коэрцитивной силы, остаточной намагниченности, продольной и поперечной магнито-стрикции, наводимой упругой одноосной деформацией [1 – 9]. Для контроля НДС используют также методы магнитоупругого намагничивания (магнитной памяти) (ГОСТ Р 52005–2003) [10] и магнитоупругого размагничивания (магнитоупругой памяти — МУП). Метод МУП заключается в необратимом уменьшении напряженности магнитного поля рассеяния ее локальной остаточной намагниченности M_r при силовом воздействии [11 – 15]. Отметим, что в случае сложного нагружения анизотропия магнитных свойств стали может сглаживаться, а выходной сигнал уменьшаться [1].

На точность контроля напряжений в стали влияет разброс магнитных и магнитоупругих свойств, связанный с химическим составом, технологией изготовления и режимом термической обработки материала. Для уменьшения погрешностей применяют двухпараметровый подход, включающий дополнительное нагружение (вариации напряжений) [9]. Заметим, что напряжения в нагруженном объекте могут дозированно увеличиваться или уменьшаться (метод тензодобавок). Так, для контроля осевых напряжений, например, трубопровода методом МУП дозированная нагрузка, требуемая для определения основного напряжения, достигается уменьшением/восстановлением внутреннего давления в трубе [11]. Дополнительное динамическое нагружение (в случае, например, несущей балки моста) может обеспечиваться с помощью пружинного ударника [14, 15].

Вместе с тем применение известных магнитных методов контроля НДС стали ограничено существенной систематической ошибкой, связанной с разбросом магнитных свойств материала. Отличающиеся исходная магнитная и кристаллографическая анизотропии приводят к разбросу магнитоупругой чувствительности даже в рамках одной марки стали [15]. Поэтому разработка новых методов контроля НДС для обеспечения большей достоверности получаемых результатов актуальна.

Цель работы — исследование магнитоупругого размагничивания локально намагниченной стали путем вариаций напряжений на фоне базовой нагрузки.

Материалы, методика, оборудование

Исследовали образцы стали 09Г2С в состоянии поставки [15]. Из двух стальных пластин (толщина — 6 мм), разделенных дюралевой пластиной, с помощью заклепок изготавливали трехслойную сборку размером $16,5 \times 29 \times 255$ мм. Локальная остаточная намагниченность (ЛОН) формировалась контактом одного из полюсов постоянного магнита с поверхностью стали или коротким импульсом разрядного тока конденсаторов через намагничивающую катушку (диаметр — 50 мм). Максимальная напряженность импульса магнитного поля в намагничивающей катушке составляла порядка 10^5 А/м. Нормальную составляющую напряженности магнитного поля рассеяния H на поверхности пластин измеряли с помощью феррозондового датчика, помещенного в центр ЛОН. Напряжения растяжения и сжатия σ образцов, формируемые трехточечным изгибом, определяли с использованием тензомера и тензодатчика, наклеиваемого вблизи зоны намагничивания. Параметры H и σ регистрировали на компьютере с помощью АЦП и пакета программ LabVIEW [15].

При испытаниях в образце создавали базовую нагрузку σ (400 МПа), проводили локальное намагничивание выбранного участка (до 5 раз), измеряли величину напряженности магнитного поля рассеяния ЛОН H_0 . Затем нагрузку меняли (в частности, уменьшали по абсолютному значению на $\Delta\sigma_b = 50, 100$ и 150 МПа) и возвращали к исходному уровню, повторно регистрируя H .

Обсуждение результатов

На рис. 1 для стали 09Г2С приведено изменение напряженности магнитного поля рассеяния ЛОН ($\Delta\sigma_b = 50$ МПа) при различных значениях основного (базового) напряжения растяжения σ в диапазоне 400 – 0 МПа.

Видно, что нормальная составляющая напряженности магнитного поля рассеяния H локально намагниченного участка стали (высота пиков) с ростом нагрузки σ вначале практически не меняется, а затем уменьшается. Снижение σ с 400 до 350 МПа приводит к уменьшению величины H

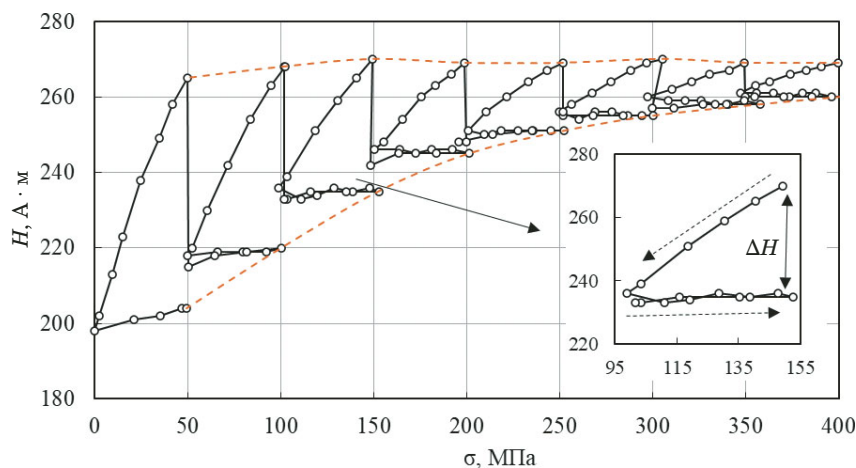


Рис. 1. Зависимость напряженности магнитного поля рассеяния ЛОН H от напряжения растяжения σ (на врезке — локальный сегмент изменения H при уменьшении базовой нагрузки σ от 150 до 100 МПа и ее последующем восстановлении на прежний уровень)

Fig. 1. Dependence of the strength H of the magnetic scattering field of LRM on the tensile stress σ (on the inset — a local segment of changes in H with a decrease in the base load σ from 150 to 100 MPa and its subsequent restoration to the previous level)

до 261 А/м. При возврате к прежней нагрузке (400 МПа) H практически не меняется (260 А/м).

Последующие аналогичные циклы (разгрузка — возврат к исходному уровню) по характеру изменения $H(\Delta\sigma_b)$ качественно похожи, но количественно заметно отличаются тем, что при уменьшении базовых напряжений σ увеличивается абсолютная величина изменения напряженности поля $\Delta H = H_0 - H$ при одинаковой амплитуде вариации напряжений ($\Delta\sigma_b = 50$ МПа).

На рис. 2 представлены зависимости изменения амплитуды напряженности поля ΔH от величины базовой (исходной) нагрузки растяжения (сжатия) σ после ее снятия и возврата к исходному значению ($\Delta\sigma_b = 50$ и 100 МПа). Видно, что чем больше значение $\Delta\sigma_b$, тем выше расположение кривой. В целом чувствительность стали к размагничиванию при растяжении несколько выше, чем при сжатии.

Заметим, что при положительных вариациях напряжения (увеличение базовой нагрузки и возврат к ней) в случае растяжения и сжатия напряженность поля ЛОН меняется немонотонно и поэтому не рассматривалась с точки зрения возможности применения для контроля НДС.

Экспоненциальная зависимость для $H(\sigma)$, наблюдающаяся при нагружении растяжением и сжатием от нулевого значения, имеет следующий вид [16]:

$$H = Ae^{-\alpha\sigma} + B, H_0 = A + B,$$

где H — напряженность магнитного поля рассеяния ЛОН после приложения и снятия нагрузки от нулевого значения; H_0 — напряженность магнитного поля рассеяния ЛОН после намагничи-

вания стали; A, B — постоянные для каждой марки стали (определяются эмпирически); α — дифференциальная магнитоупругая чувствительность стали; σ — базовое напряжение.

Параметры уравнения, полученные для описания убыли ΔH магнитного поля рассеяния ЛОН стали 09Г2С при растяжении, составили: $A = 93,06$ А/м, $B = 1,52$ А/м, $\sigma = 0,0068$ МПа⁻¹ — для $\Delta\sigma_b = 50$ МПа; $A = 128,26$ А/м, $B = 3,35$ А/м, $\sigma = 0,005681$ МПа⁻¹ — для $\Delta\sigma_b = 100$ МПа.

Теоретические экспоненциальные зависимости изменения напряженности магнитного поля рассеяния ЛОН, вызванного отрицательной вариацией базовых напряжений растяжения и сжатия на величину $\Delta\sigma_b = 50$ и 100 МПа соответственно (см. рис. 2, сплошная и пунктирная линии), показывают, что аппроксимация данных эксперимента экспоненциальной зависимостью удовлетворительна. Относительное отклонение полученных результатов — 5,8 %.

ЛОН — замкнутая магнитная структура, имеющая магнитный момент и пространственное распределение силовых линий магнитной индукции внутри и вне ферромагнетика (напряженность магнитного поля рассеяния) [16]. Состояние ЛОН ферромагнетика можно считать метастабильным, оно разрушается под действием механических напряжений.

При приложении напряжений в стали создается наведенная анизотропия магнитных свойств, обусловленная магнитоупругой энергией. При этом происходит перестройка доменной структуры. Например, при растяжении ($\lambda_{100} > 0$) формируется структура доменов типа «легкого конуса» (легкой оси), при сжатии образуется текстура типа «легкая плоскость». При локальном

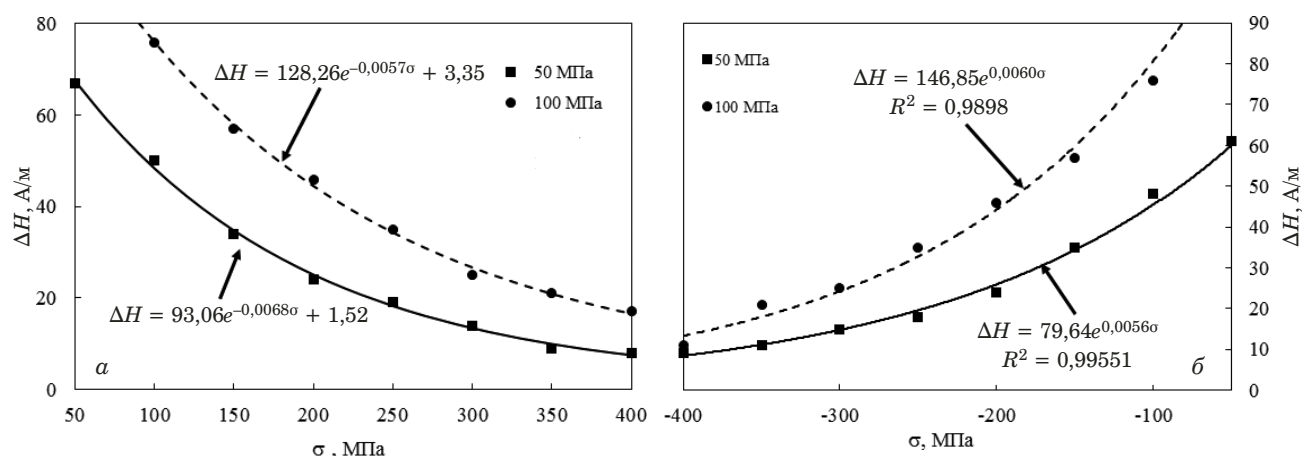


Рис. 2. Зависимости изменения напряженности магнитного поля рассеяния ΔH ЛОН от базовой нагрузки σ растяжения (а) и сжатия (б) при $\Delta\sigma_b = 50$ (■) и 100 МПа (●)

Fig. 2. Dependence of changes in the strength ΔH of the magnetic scattering field of LRM on the base load σ (tensile (a) and compression (b)) for $\Delta\sigma_b = 50$ (■) and 100 MPa (●)

намагничивании магнитная текстура стали меняется с учетом изменений магнитостатической и магнитоупругой энергий. Достигается новый минимум энергии системы.

Благодаря гистерезису создается остаточное намагниченное метастабильное состояние стали (ферромагнетика). При изменении механических напряжений в ферромагнетике равновесие сил, связанных с его магнитоупругой и магнитостатической энергиями, нарушается. Часть доменных границ выходит из локальных минимумов энергии, преодолевает энергетический барьер и под действием давления внутреннего размагничивающего поля свободно перемещается, пока не встретит новый более высокий энергетический барьер. В результате происходит размагничивание ферромагнетика и убыль его магнитостатической энергии. Эффект размагничивания будет определяться исходной магнитной текстурой и соотношением базовых (σ) и вариативных ($\Delta\sigma_b$) напряжений. Магнитная текстура при небольших базовых нагрузках легко перестраивается при вариативных напряжениях и медленнее (тяжелее) при их увеличении. Поэтому чем больше базовая нагрузка σ и меньше отношение вариативной к базовой нагрузке $\Delta\sigma_b/\sigma$, тем меньше изменение напряженности ΔH поля рассеяния ЛОН ферромагнетика.

Экспериментально установленное изменение напряженности магнитного поля рассеяния ЛОН от базовых напряжений растяжения и сжатия $\Delta H(\sigma)$ хорошо описывается экспоненциальной зависимостью (см. рис. 2). Ярко выраженная закономерность изменения напряженности магнитного поля рассеяния ЛОН, вызванного механическими напряжениями, хорошая повторяемость результатов позволяют использовать данное явление для контроля напряжений с помощью гра-

дуировочной кривой определенной марки стали, снятой в лаборатории.

Для практического применения наблюдаемого явления (определения базовой нагрузки σ на выбранную опору, сваю, балку и др.) необходимо использовать тензодатчики или чувствительные датчики деформации, снять начальные показания тензометра. При применении отрицательной вариативной нагрузки локальное намагничивание проводится в момент максимального нагружения исследуемой конструкции. Например, тензометр зафиксировал изменение нагрузки $\Delta\sigma_b$ на несущую опору или балку конструкции. В это время на выбранном элементе конструкции проводится локальное намагничивание, и затем измеряется начальное значение напряженности H_0 магнитного поля рассеяния ЛОН. При разгрузке на контролируемую величину $\Delta\sigma_b$, являющуюся частью максимальной $\sigma_{\max}$, снимаются показания магнито- и тензометра. Так как при возврате нагрузки к первоначальному значению поле рассеяния ЛОН практически не меняется (см. рис. 1), измеренное изменение напряженности поля ΔH после снятия нагрузки и будет вариативным полем для нагрузки ($\sigma_{\max} = \sigma + \Delta\sigma_b$). Далее по измеренным ΔH и $\Delta\sigma_b$ вычисляется абсолютная ($\Delta H/\Delta\sigma_b$) или относительная ($\Delta H/(H_0\Delta\sigma_b)$) магнитоупругая чувствительность стали. После построения части экспоненциальной кривой размагничивания по приведенной формуле вычисляются коэффициенты A и B . Оценивается соответствие магнитоупругих свойств градуировочному графику стали, определяется базовая нагрузка σ на опору или балку.

На практике вариативная нагрузка $\Delta\sigma_b$ может быть разной, а величина $\Delta H/(H_0\Delta\sigma_b)$ нелинейно зависит от напряжения σ . Поэтому необходимо выяснить, как скажется изменение $\Delta\sigma_b$ на

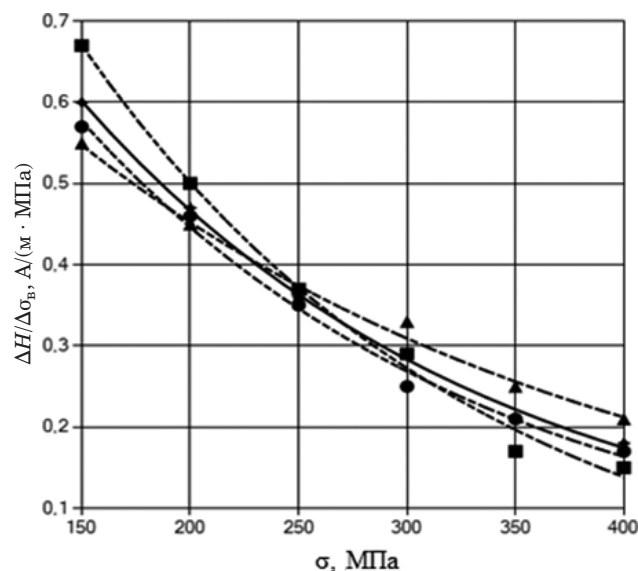


Рис. 3. Зависимости абсолютной магнитоупругой чувствительности $\Delta H/\Delta\sigma_v$ от базовой нагрузки растяжения σ при $\Delta\sigma_v = 50$ (■), 100 (●) и 150 МПа (▲) (усредненные (◆) и расчетные (сплошная линия) значения)

Fig. 3. Dependence of the absolute magnetoelastic sensitivity $\Delta H/\Delta\sigma_v$ on the base tensile load σ for $\Delta\sigma_v = 50$ (■), 100 (●), and 150 МПа (▲) (averaged (◆) and calculated (solid line) values)

относительной магнитоупругой чувствительности $\Delta H/(H_0\Delta\sigma_v)$. Для этого на стальных образцах исследовали зависимость $\Delta H/\Delta\sigma_v$ от величины основной базовой нагрузки σ при различных значениях вариативной нагрузки $\Delta\sigma_v$ (50, 100 и 150 МПа).

На рис. 3 приведены зависимости абсолютной магнитоупругой чувствительности $\Lambda = \Delta H/\Delta\sigma_v$ от базовой нагрузки растяжения σ для $\Delta\sigma_v = 50$ и 100 МПа (диапазон σ — 50 – 400 МПа) и 50, 100 и 150 МПа (диапазон σ — 150 – 400 МПа).

Видно, что чем меньше вариативная нагрузка $\Delta\sigma_v$, тем круче кривая зависимости. При $\sigma = 250$ МПа значения $\Delta H/\Delta\sigma_v$ практически совпадают, а при начальных и максимальных нагрузках наблюдается их существенный разброс. Поэтому чем меньше диапазон изменения вариативной нагрузки $\Delta\sigma_v$, тем меньше погрешность определения базовой нагрузки σ .

Для построения зависимостей усредненных экспериментальных и теоретических (расчетных) значений абсолютной магнитоупругой чувствительности от напряжений растяжения σ провели усреднение величин Λ для вариативных нагрузок растяжения $\Delta\sigma_v = 50, 100$ и 150 МПа при равных значениях σ в диапазоне 150 – 400 МПа. Параметры расчетных экспоненциальных зависимостей магнитоупругой чувствительности $\Lambda = \Delta H/\Delta\sigma_v$ стали 09Г2С от базовой нагрузки растяжения σ составили: $A = 1,61$ А/(м · МПа), $B =$

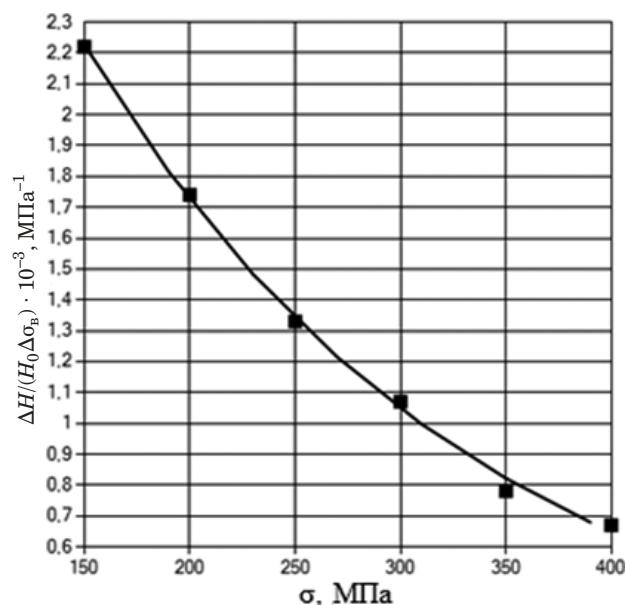


Рис. 4. Зависимость относительной магнитоупругой чувствительности $\Delta H/(H_0\Delta\sigma_v)$, усредненной по трем значениям амплитуды разгружающих вариаций $\Delta\sigma_v = 50, 100$ и 150 МПа, от базовой растягивающей нагрузки σ

Fig. 4. Dependence of the relative magnetoelastic sensitivity $\Delta H/(H_0\Delta\sigma_v)$ (averaged over three values of the amplitude of unloading variations $\Delta\sigma_v = 50, 100, 150$ МПа) on the base tensile load σ

$= -0,051$ А/(м · МПа), $\alpha = 0,0053$ МПа⁻¹ — для $\Delta\sigma_v = 50$ МПа; $A = 1,24$ А/(м · МПа), $B = 0,011$ А/(м · МПа), $\alpha = 0,0052$ МПа⁻¹ — для $\Delta\sigma_v = 100$ МПа; $A = 0,97$ А/(м · МПа), $B = 0,0063$ А/(м · МПа), $\alpha = 0,0039$ МПа⁻¹ — для $\Delta\sigma_v = 150$ МПа. Для усредненной экспоненты: $A = 1,28$ А/(м · МПа), $B = 0,017$ А/(м · МПа), $\alpha = 0,0052$ МПа⁻¹.

Зависимость усредненной по трем значениям вариативной нагрузки $\Delta\sigma_v = 50, 100, 150$ МПа относительной магнитоупругой чувствительности $\Delta H/(H_0\Delta\sigma_v)$ от напряжений осевого растяжения σ представлена на рис. 4. Она может быть использована в качестве градуировочной зависимости при контроле напряжений в стали при растяжении. Сплошной линией показана аппроксимация экспериментального результата экспоненциальной зависимостью с параметрами: $A = 4,76 \times 10^{-3}$ МПа⁻¹, $B = 0,080 \cdot 10^{-3}$ МПа⁻¹, $\alpha = 0,0053$ МПа⁻¹. Относительное отклонение экспериментальных данных от аппроксимирующей кривой — 1,8 %.

Отметим, что по результатам исследования магнитоупругого размагничивания сталей 60Г, 65Г, 17Г1С, Ст3 и 15ХСНД при их статическом и динамическом вариативном нагружении была определена магнитоупругая чувствительность к прикладываемым нагрузкам и ее зависимость от режима термообработки, уровня испытываемых напряжений [15, 17, 18]. Установлена связь маг-

нитоупругой чувствительности сталей, уровня упругих напряжений с коэрцитивной силой и магнитоотрицательностью. Предложенный способ контроля механических напряжений в режиме МУП с учетом измеренной магнитоупругой чувствительности при вариативном нагружении был применен на действующей стальной конструкции [14].

Заключение

Таким образом, проведенные испытания показали, что магнитоупругая чувствительность вариативного магнитоупругого размагничивания ЛОН стали 09Г2С монотонно убывает с увеличением базового напряжения. Зависимость изменения вариативной магнитоупругой чувствительности от величины базовой нагрузки носит экспоненциальный характер. Предложен метод определения базовой эксплуатационной нагрузки элемента стальной конструкции с помощью ее вариации. Такое вариативное изменение нагрузки контролируемой локально намагниченной стальной конструкции позволяет измерить магнитоупругую чувствительность стали к упругим напряжениям. При учете магнитоупругой чувствительности стали точность оценки ее механических напряжений магнитоупругим методом повышается на 20 – 30 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горкунов Э. С., Мушников А. Н. Магнитные методы оценки упругих напряжений в ферромагнитных сталях (обзор) / Контроль. Диагностика. 2020. Т. 23. № 12. С. 4 – 23. DOI: 10.14489/td.2020.12.pp.004-023
2. Горкунов Э. С., Задворкин С. М., Смирнов С. В. и др. Взаимосвязь между параметрами напряженно-деформированного состояния и магнитными характеристиками углеродистых сталей / Физика металлов и металловедение. 2007. Т. 103. № 3. С. 322 – 327.
3. Новиков В. Ф., Бахарев М. С. Магнитная диагностика механических напряжений в ферромагнетиках. — Тюмень: Вектор Бук, 2001. — 220 с.
4. Матюк В. Ф., Кулагин В. Н. Контроль структуры, механических свойств и напряженного состояния ферромагнитных изделий методом коэрцитиметрии / Неразрушающий контроль и диагностика. 2010. № 3. С. 1 – 14.
5. Мужицкий В. Ф., Попов Б. Е., Безлюдько 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.
6. Губский С. А., Сухомлин В. И., Волох В. И. Контроль напряженного состояния сталей по коэрцитивной силе / Машинобудованье. 2014. № 13. С. 6 – 10.
7. Мирошников В. В., Завальнюк О. П. Исследование возможностей контроля упругих напряжений по величине остаточной намагниченности металла / Вестник НТУ «ХПИ». 2013. № 34. С. 12 – 17.
8. Деордиев Г. И., Бикташев Т. К. Магнитоотрицательный способ контроля напряжений в элементах металлоконструкций / Дефектоскопия. 1977. № 3. С. 82 – 92.

9. Правдин Л. С., Бурцева В. А. Особенности изменения намагниченности и магнитоотрицательности от малых приращений упругих напряжений и магнитного поля на примере малоуглеродистой стали / Дефектоскопия. 1992. № 4. С. 29 – 38.
10. Дубов А. А. Диагностика котельных труб с использованием магнитной памяти металла. — М.: Энергоатомиздат, 1995. — 111 с.
11. Новиков В. Ф., Важенни Ю. И., Бахарев М. С. и др. Диагностика мест повышенной разрушаемости трубопровода. — М.: Недра-Бизнесцентр, 2009. — 200 с.
12. Kulak S. M., Novikov V. F., Baranov A. V. Control of Mechanical Stresses of High Pressure Container Walls by Magnetoelastic Method / Transport and Storage of Hydrocarbons IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 154. P. 012004. DOI: 10.1088/1757-899X/154/1/012004
13. Novikov V. F., Muratov K. R., Kulak S. M., et al. On controlling stresses in a complexly loaded steel construction by magnetoelastic demagnetization / Russian journal of nondestructive testing. 2016. Vol. 52. N 6. P. 357 – 361.
14. Новиков В. Ф., Кулак С. М., Андреев В. О. О контроле напряженно-деформированного состояния стальных мостовых конструкций методом магнитоупругого размагничивания / Строительная механика и расчет сооружений. 2020. № 4(291). С. 3 – 7. DOI: 10.37538/0039-2383.2020.4.3.7
15. 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. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-6-54-62
16. Мельгуй М. А. Магнитный контроль механических свойств сталей. — Минск: Наука и техника, 1980. — 184 с.
17. Novikov V. F., Kulak S. M., Muratov K. R., Parakhin A. S. Relationship between Magnetoelastic Sensitivity of Magnetoelastic Demagnetization of Steels 60G and 65G and Coercive Force and Magnetostriction / Russian Journal of Nondestructive Testing. 2022. Vol. 58. N 6. P. 479 – 487. DOI: 10.1134/S1061830922060079
18. 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. Vol. 57. N 4. P. 310 – 319. DOI: 10.1134/S1061830921040082

REFERENCES

1. Gorkunov E. S., Mushnikov A. N. Magnetic methods for estimating elastic stresses in ferromagnetic steels (review) / Kontrol'. Diagn. 2020. Vol. 23. N 12. P. 4 – 23 [in Russian]. DOI: 10.14489/td.20.12.pp.004-023
2. Gorkunov E. S., Zadvorkin S. M., Smirnov S. V., et al. The relationship between the parameters of the stress-strain state and the magnetic characteristics of carbon steels / Fiz. Met. Metalloved. 2007. Vol. 103. N 3. P. 322 – 327 [in Russian].
3. Novikov V. F., Bakharev M. S. Magnetic diagnostics of mechanical stresses in ferromagnets. — Tyumen: Vektor Book, 2001. — 220 p. [in Russian].
4. Matyuk V. F., Kalugin V. N. Control of structure, mechanical properties and stress state of ferromagnetic products by the method of coercitometry / Nerazr. Kontrol' Diagn. 2010. N 3. P. 1 – 14 [in Russian].
5. Muzhitsky V. F., Popov B. E., Bezlyudko G. Ya. Magnetic control of the stress-strain state and residual life of steel metal structures of lifting structures and vessels operating under pressure / Defektoskopiya. 2001. N 1. P. 38 – 46 [in Russian].
6. Gubsky S. A., Sukhomlin V. I., Volokh V. I. Control of the stressed state of steels by coercive force / Mashinobudovannya. 2014. N 13. P. 6 – 10 [in Russian].
7. Miroshnikov V. V., Zavalnyuk O. P. Investigation of the possibilities of controlling elastic stresses by the magnitude of the residual magnetization of the metal / Vestn. NTU "XPII". 2013. N 34. P. 12 – 17 [in Russian].

8. **Deordiev G. I., Biktashev T. K.** Magnetostatic method for controlling stresses in elements of metal structures / Defektoskopiya. 1977. N 3. P. 82 – 92 [in Russian].
9. **Pravdin L. S., Burtseva V. A.** Peculiarities of change in magnetization and magnetostriction from small increments of elastic stresses and magnetic field on the example of mild steel / Defektoskopiya. 1992. N 4. P. 29 – 38 [in Russian].
10. **Dubov A. A.** Diagnosis of boiler pipes using metal magnetic memory. — Moscow: Énergoatomizdat, 1995. — 111 p. [in Russian].
11. **Novikov V. F., Vazhenin Yu. I., Bakharev M. S., et al.** Diagnosis of areas of increased pipeline destructibility. — Moscow: Nedra-Business Center, 2009. — 200 p. [in Russian].
12. **Kulak S. M., Novikov V. F., Baranov A. V.** Control of Mechanical Stresses of High Pressure Container Walls by Magnetoelastic Method / Transport and Storage of Hydrocarbons IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 154. P. 012004. DOI: 10.1088/1757-899X/154/1/012004
13. **Novikov V. F., Muratov K. R., Kulak S. M., et al.** On controlling stresses in a complexly loaded steel construction by magnetoelastic demagnetization / Russian journal of nondestructive testing. 2016. Vol. 52. N 6. P. 357 – 361.
14. **Novikov V. F., Kulak S. M., Andreev V. O.** On the control of the stress-strain state of steel bridge structures by the method of magnetoelastic demagnetization / Structural mechanics and calculation of structures. 2020. N 4(291). P. 3 – 7 [in Russian]. DOI: 10.37538/0039-2383.2020.4.3.7
15. **Novikov V. F., Kulak S. M., Parakhin A. S.** Determination of axial stresses of steel in the memory mode according to the exponential law of magnetoelastic demagnetization / Industr. Lab. Diagn. Mater. 2021. Vol. 87. N 6. P. 54 – 62 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-6-54-62
16. **Melgui M. A.** Magnetic control of mechanical properties of steels. — Minsk: Nauka i tekhnika, 1980. — 184 p. [in Russian].
17. **Novikov V. F., Kulak S. M., Muratov K. R., Parakhin A. S.** Relationship between Magnetoelastic Sensitivity of Magnetoelastic Demagnetization of Steels 60G and 65G and Coercive Force and Magnetostriction / Russian Journal of Nondestructive Testing. 2022. Vol. 58. N 6. P. 479 – 487. DOI: 10.1134/S1061830922060079
18. **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. Vol. 57. N 4. P. 310 – 319. DOI: 10.1134/S1061830921040082