

УДК 620.179.14

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ МЕХАНИЧЕСКИХ СЖИМАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБРАЗЦАХ ИЗ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПО МАГНИТНЫМ ПАРАМЕТРАМ БЕЗ ПРОВЕДЕНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ КАЛИБРОВКИ

*А. Н. СТАШКОВ, А. П. НИЧИПУРУК, В. Г. КУЛЕЕВ, Т. П. ЦАРЬКОВА*  
ФГБУН «Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН»  
Екатеринбург, Россия

UDC 620.179.14

## DETERMINATION OF MECHANICAL COMPRESSION STRAIN IN LOW-CARBON STEEL SAMPLES USING THE MAGNETIC PARAMETERS WITHOUT PRELIMINARY CALIBRATION

*A. N. STASHKOV, A. P. NICHIPURUK, V. G. KULEEV, T. P. TSAR'KOVA*

### Аннотация

В работе измерены зависимости изменений обратимой намагниченности от внутреннего поля при одновременном воздействии на образец двух магнитных полей – квазистатического намагничивающего и переменного подмагничивающего. Установлено, что в пластически деформированных растяжением и упруго сжатых образцах из низкоуглеродистых сталей вид зависимостей резко изменяется по сравнению с зависимостями, полученными на исходных недеформированных образцах – вместо одного максимума появляется три максимума или один максимум и два перегиба. На основе экспериментальных данных предложен алгоритм расчета значений средних механических напряжений в образце. Проведено сравнение рассчитанных значений напряжений с действующими напряжениями при упругом сжатии.

### Ключевые слова:

механические напряжения сжатия, магнитная анизотропия, намагничивающее поле, подмагничивающее поле, обратимая намагниченность.

### Abstract

The dependences of reversible magnetization from the internal field upon condition action of two magnetic fields (quasi-static and variable) were measured in this work. It has been found that for plastically deformed and elastic compression of low-carbon steel samples the curves shape were absolutely different comparably with curves shape obtained on undeformed samples - instead of one maximum has been obtained three maxima or one maximum and two bends. There was offered the algorithm of calculation the average mechanical stresses in a samples on the basis of experimental data. The calculated values of the stresses were compared with the acting stresses under elastic compression.

### Key words:

mechanical stresses of compression, magnetic anisotropy, magnetizing field, variable magnetic field, reversible magnetization.

В настоящее время для контроля механических напряжений применяется ряд методов, в том числе неразрушающих [1]. Из неразрушающих методов для контроля напряжений в стальных изделиях и конструкциях наиболее распространены на практике ультразвуковые, магнитные и рентгеновские. Однако для применения всех известных методов неразрушающего контроля (НК) необходима предварительная калибровка аппаратуры на стандартных образцах в лабораторных или цеховых условиях, что является трудоемкой и дорогостоящей задачей. К тому же далеко не всегда после калибровки удастся получить удовлетворительные результаты при измерениях на реальных объектах. Поэтому цель данной работы заключалась в разработке методики НК механических сжимающих напряжений в низкоуглеродистых сталях без проведения предварительного нахождения корреляционных связей между магнитными параметрами и механическими напряжениями, т. е. без предварительной калибровки.

В работе [2] на проволочных образцах из низкоуглеродистой стали Ст1кп были впервые проведены эксперименты по определению магнитного параметра, связанного с полем наведенной магнитной анизотропии и позволяющего экспериментально оценить уровень остаточных напряжений в пластически деформированных проволоках. В эксперименте на образец одновременно действовали два внешних магнитных поля – квазистатическое намагничивающее и, ортогональное ему, переменное подмагничивающее.

Намагничивающим полем, создаваемым соленоидом, проводилось медленное перемагничивание образца по предельной петле гистерезиса. Переменное поле создавалось путем пропускания переменного тока через проволочный образец. С помощью дифференциальной катушки, размещенной в центральной части испытуемого образца, измерялся сигнал, пропорциональный обратимой намагниченности проволоки. На рис. 1 приведены полевые зависимости сигнала измерительной катушки для двух образцов: недеформированного и пластически деформированного растяжением (образец с относительным удлинением  $\Delta l/l = 15\%$ ).

а)

б)

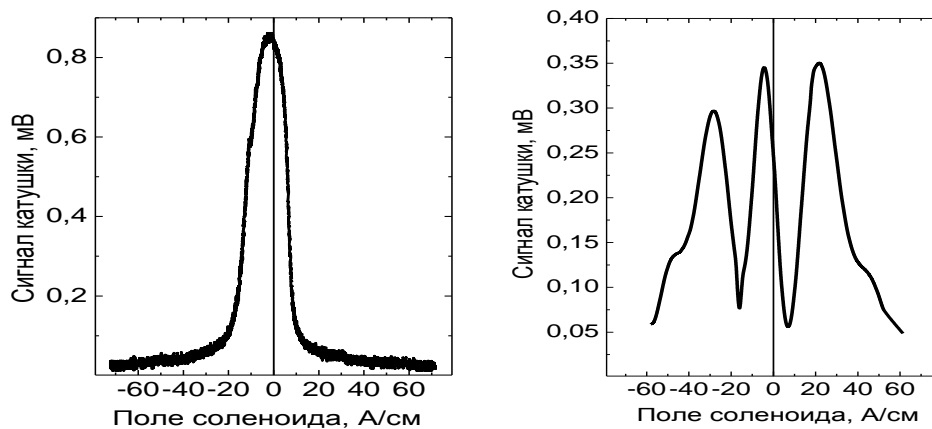


Рис. 1. Полевые зависимости сигнала измерительной катушки для недеформированного образца (а) и образца с относительным удлинением  $\Delta l/l=15\%$  (б). Перемагничивание проводилось от  $+H_{max}$  до  $-H_{max}$

Для недеформированного образца характерно наличие одного максимума вблизи нулевого поля (рис. 1, а), а для пластически деформированного – трех максимумов (рис. 1, б). Такое поведение кривых объясняется следующим образом. После пластической деформации растяжением в проволоке возникают остаточные сжимающие макронапряжения, которые формируют магнитную текстуру типа легкая плоскость (ЛП) [3], поверхность которой перпендикулярна оси предварительного растяжения. Наличие магнитной текстуры типа ЛП влияет на перемагничивание образца. На рис. 2 для наглядности изображена схема необратимых изменений намагниченности в пластически деформированных образцах при изменении поляризующего поля от  $+H_{\max}$  до  $-H_{\max}$  и наличии в образце магнитной текстуры типа ЛП. При уменьшении поляризующего поля от  $+H_{\max}$  до 0 происходит необратимое изменение намагниченности, вызванное наличием в материале текстуры, созданной остаточными сжимающими напряжениями (необратимое смещение 90-градусных доменных границ, схематически изображенных на рис. 2, б). При изменении знака поля происходит необратимое изменение намагниченности, связанное со смещением 180-градусных доменных границ (рис. 2, в). Данное изменение намагниченности никак не связано с остаточными напряжениями, поскольку угол между магнитными моментами и легкой плоскостью не изменяется. При уменьшении намагничивающего поля до  $-H_{\max}$  происходит необратимое изменение намагниченности с поворотом векторов на  $90^\circ$  (рис. 2, г), при этом главную роль играет ЛП. В соответствии с тем, что максимум обратимых изменений намагниченности, сигнал от которых фиксируется измерительной катушкой, возникает при необратимых скачках доменных границ, и наблюдаются три максимума (рис. 1, б).

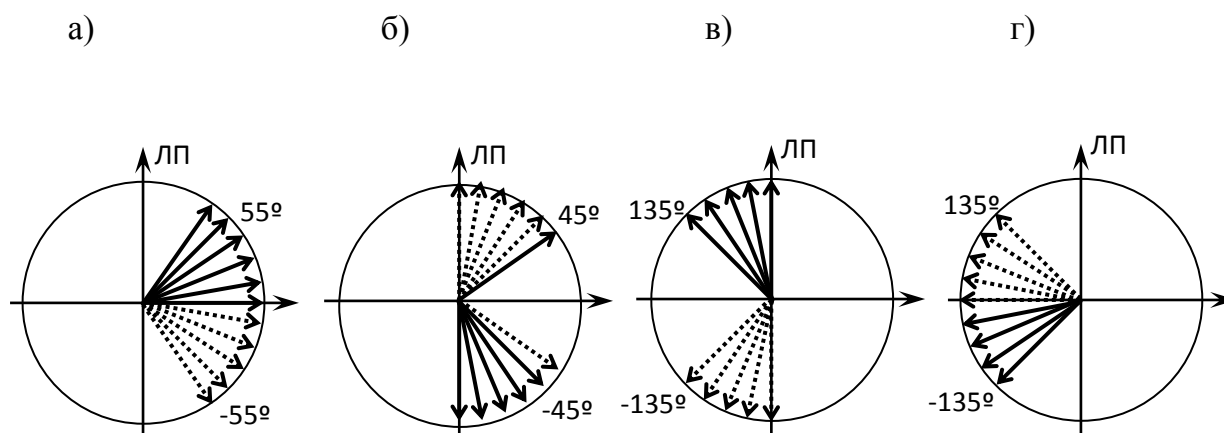


Рис. 2. Схематическое расположение векторов намагниченности (без учета процессов вращения) в разных намагничивающих полях  $H$ : а –  $H = +H_{\max}$ ; б –  $0 < H < H_\sigma$ ; в –  $-0 < |H| < H_\sigma$ ; г –  $H = -H_{\max}$

Поля, в которых должны находиться левый и правый максимумы, можно оценить из соотношения магнитоупругой и магнитостатической энергий для конкретного зерна, испытывающего сжимающие напряжения, с углом  $\theta_0$  между направлением поля и ближайшей легкой осью данного зерна.

Выражение для полной энергии с учетом пренебрежения процессами вращения магнитных моментов можно представить следующим образом:

$$E = -H_s [\cos \theta_0] - \frac{3}{2} \lambda_{100} \sigma_i \left[ \cos^2 \theta_0 - \frac{1}{3} \right], \quad (1)$$

где  $M_s$  – намагниченность насыщения;  $\lambda_{100}$  – константа магнитоупругости в направлении (100);  $\sigma_i$  – средние механические напряжения.

Введем величину эффективного поля  $H_\sigma$ :

$$H_\sigma = 1,5 \cdot \lambda_{100} \cdot \sigma_i / M_s. \quad (2)$$

Угол  $\theta_0$  для левого максимума изменяется из диапазона  $90-135^\circ$  на  $+90^\circ$ , для правого – из диапазона  $0-(-55^\circ)$  в угол  $45-90^\circ$ . Условием необратимого изменения намагниченности является равенство разности начальной и конечной энергий величине потенциального барьера доменной границы ( $H_{кр}$ ). Далее определяется разность энергий начального и конечного состояния для левого и правого максимума, нормируется на намагниченность насыщения, усредняется по  $\theta_0$  в указанных выше интервалах углов. В итоге выражение для поля правого максимума имеет вид:

$$H_{пр}^{max} = 0,91 \cdot H_\sigma - 1,89 \cdot H_{кр}. \quad (3)$$

Для поля левого максимума получается аналогичное выражение:

$$| H_{л}^{max} | = 0,82 \cdot H_\sigma + 1,89 \cdot H_{кр}. \quad (4)$$

Из выражений (3) и (4) следует, что среднее арифметическое полей  $H_{пр}^{max}$  и  $H_{л}^{max}$  равно  $0,87 H_\sigma$ . Таким образом, экспериментально определив поля максимумов  $H_{пр}^{max}$  и  $H_{л}^{max}$ , возможно найти значение эффективного поля  $H_\sigma$  и из формулы (2) найти значение средних механических напряжений  $\sigma_i$  в образце (табл. 1).

Табл. 1. Значения средних механических напряжений в образце

|                        |      |       |       |       |       |
|------------------------|------|-------|-------|-------|-------|
| $\Delta l/l, \%$       | 2    | 4     | 10    | 15    | 23    |
| $\sigma_i, \text{МПа}$ | 46,3 | 142,7 | 162,2 | 201,2 | 162,2 |

Намагничивающее и переменное подмагничивающее поля могут быть не ортогональны друг другу. Способы создания подмагничивающего поля также могут быть различны. В подтверждение этого утверждения авторами были проведены эксперименты, в которых образец из стали Ст3 длиной 250 мм и сечением  $6 \text{ мм}^2$  помещался в соленоид. В средней части образца

располагались две катушки. С помощью одной из катушек возбуждалось переменное магнитное поле, параллельное намагничивающему полю соленоида, а с помощью второй проводилось измерение сигнала. Во время измерений образец подвергался упругому сжатию. Результаты представлены на рис. 3.

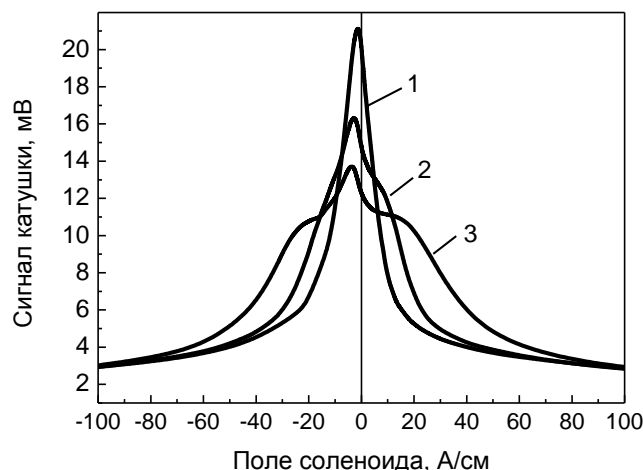


Рис. 3. Полевые зависимости сигнала измерительной катушки, полученные на образце из Ст3: 1 – кривая без нагрузки; 2 – кривая, полученная на упруго сжатом образце (напряжения 98,1 МПа); 3 – кривая, полученная на упруго сжатом образце (напряжения 196,2 МПа). Перемагничивание проводилось от  $+H_{\max}$  до  $-H_{\max}$

Из рис. 3 видно, что при возникновении сжимающих напряжений в образце на кривых 2 и 3 возникают перегибы в положительном и отрицательном полях. Чтобы определить поля левого и правого максимумов, была применена математическая обработка экспериментальных данных с помощью функций псевдо-Фойгта (pseudo-Voigt), широко применяемых для обработки спектральных данных. Для этого исходную кривую разложили на 3 кривых с единственными максимумами и определили поля этих максимумов. Результаты аппроксимации и нахождения величин расчетных механических напряжений  $\sigma_i^{\text{расч}}$ , а также сравнение с действующими  $\sigma_i$  приведены в табл. 2.

Табл. 2. Расчётные механические напряжения в образце и их сравнение с действующими напряжениями

| $\sigma_i$ , МПа | $\sigma_i^{\text{расч}}$ , МПа | $\Delta\sigma/\sigma_i^{\text{расч}}$ , % |
|------------------|--------------------------------|---|
| 98,1             | 91,2                           | 7   |
| 196,2            | 184,9                          | 5,8                                       |

Как видно из табл. 2, относительная разность между действующими и экспериментально определенными напряжениями не превышает 7 %.

Для практического применения методики экспериментального определения механических сжимающих напряжений в массивных конструкциях из низкоуглеродистых сталей в качестве намагничивающего устройства целесообразно применять П-образные электромагниты, а для возбуждения подмагничивающего переменного поля и измерения полезного сигнала возможно использовать накладной вихретоковый преобразователь, размещенный в межполюсном пространстве электромагнита.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Диагностика», № г.р. 01201463329) при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-58-00027 Бел\_a).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Gary, S.** Practical residual stress measurement methods / Gary S. Schajer. Vancouver, Canada: John Wiley & Sons Ltd. – 2013. – P. 310.
2. Экспериментальный метод оценки критических полей смещающихся доменных границ в пластически деформированных растяжением проволоках из низкоуглеродистой стали / А. П. Ничипурук [и др.] // Дефектоскопия. – 2014. – №10. – С. 18–26.
3. Возможности магнитного контроля предшествующих разрыву пластических деформаций в конструкциях из низкоуглеродистых сталей / А. П. Ничипурук [и др.] // Дефектоскопия. – 2009. – № 9. – С. 31–38.

E-mail: [stashkov@imp.uran.ru](mailto:stashkov@imp.uran.ru)

