ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОБРАЗЦОВ МАГНИТОШУМОВЫМ МЕТОДОМ

Measurement of stress-strain state of specimens by magnetic noise method

УДК 537.877

Винтов Д.А., д-р техн. наук, проф. Венгринович В.Л.
(Институт прикладной физики НАН Беларуси», Минск)
Прудников А.Н. (Белорусско-Российский университет, Могилев)

Vintov D.A., D.Sc., Prof. Vengrinovich V.L. (Institute of Applied Physics, NAS of Belarus, Minsk)
Prudnikov A.N. (Belarusian-Russian University, Mogilev)

Исследование методом шума Баркгаузена двухосного напряженно-деформированного состояния в стальных образцах

Investigation of the Biaxial Stress-Strain State in Steel Specimens by the Barkhausen Noise Method

Представлено экспериментальное исследование двухосной деформации стали с использованием установки для двухосного нагружения. Основным выводом, полученным из приведенных результатов, является условие инвариантности интенсивности шума Баркгаузена относительно любых изменений сферического (изотропного) тензора напряжений (деформации), на что влияет микроструктура материала. Этот вывод подтверждается независимыми измерениями интенсивности шума Баркгаузена на крестообразных образцах оптимизированной формы с использованием двухосного нагружающего оборудования, а также на образцах типа «труба» и «баллон», находящихся под нагрузкой давления

масла. Также было выполнено моделирование составляющих тензора напряжения методом конечных элементов. Таким образом, интенсивность шума Баркгаузена зависит только от величины тензора девиаторных (сдвиговых) напряжений. Наличие такого симметричного эффекта дает слишком много неопределенностей в оценке напряжения (деформации) с помощью шума Баркгаузена. Дальнейшие исследования должны определить, присутствует ли это условие в других магнитных параметрах, таких как коэрцитивная сила, остаточная намагниченность, магнитная проницаемость, связанные с шумом Баркгаузена. В статье представлены результаты исследования двухосного напряженно-деформированного состояния методом дифракции нейтронов, как отдельно, так и совместно с методом шума Баркгаузена. Проведена оценка возможности использования двухосного нагрузочного устройства в качестве эталона напряжений.

Experimental investigation of bi-axial steel deformation is presented using equipment for bi-axial loading. Main conclusion obtained from displayed results is the condition of the invariance of Barkhausen noise intensity relative to any changes of spherical (isotropic) strain/stress tensor, the last being influenced only by material microstructure. This conclusion is supported by independent measurement of Barkhausen noise intensity on cross-shaped specimens of optimized shape using biaxial loading equipment, and tubular specimens like pipe and a balloon loaded by means of oil pressure. The modeling of the components of the stress tensor by the finite element method was also investigated. Thus the Barkhausen noise intensity depends only on the deviatoric (shear) stress tensor value. The presence of this symmetric effect yields too many uncertainties in strain/stress evaluation via Barkhausen noise. Further investigation should identify whether this condition is also present in other magnetic parameters, such as coercive force, remanence, permeability, associated with Barkhausen noise. The article presents the results of a study of a biaxial stress-strain state as by the neutron diffraction method, so and in conjunction with the Barkhausen noise method. An assessment was made of the possibility of using a biaxial load device as a stress standard.

Введение

Для существующих методов неразрушающего контроля (НК) (магнитный, ультразвуковой, вихретоковый, рентгеновский) внутренних механических напряжений в материале необходима отдельная калибровка для последующего преобразования измеренных величин физических параметров в численное значение механического напряжения [1]. Поэтому, калибровка прибора НК является ключевым этапом в оценке величины напряженно-деформированного состояния (НДС). Как правило, обычной практикой является экспериментальное установление на разрывной машине зависимости измеряемого параметра (например, коэрцитивной силы, акустической скорости, вихретокового импеданса или градиента межплоскостного расстояния от кривой sin2ψ) по отношению к величине механического напряжения с использованием одноосной нагрузки. Это касается и влияния величины напряжения на магнитный шум Баркгаузена (ШБ). Такие исследования проводились преимущественно только при одноосном деформировании образца [2-9], за исключением [10] и его цитируемых предшественников.

Однако, требование одноосной калибровки противоречит некоторым основам теории упругости:

1. Одноосная калибровка не учитывает фундаментальное следствие классической теории упругости о взаимозависимости компонент главных напряжений, а именно:

$$\sigma_1 = E\varepsilon_1 + \lambda\sigma_2 \quad (1)$$
$$\sigma_2 = E\varepsilon_2 + \lambda\sigma_1, \quad (2)$$

где σ_1, σ_2, ε_1 и ε_2 – величины главных напряжений и деформаций соответственно, λ и E – константы упругости материала. Уравнения (1) и (2) означают, что для того, чтобы знать одно из главных напряжений (деформаций), необходимо знать соответствующее перпендикулярное напряжение. Игнорирование этого условия может привести к ошибке в определении напряжения даже по знаку.

2. Напряжение сдвига по фон Мизесу, как основной параметр теории прочности в этом случае не может быть определен. Применение устройства для двухосного растяжения, основанного на значениях фиксирующих усилий во взаимно перпендикулярных главных направлениях, позволяет вычислить разность напряжений, а не их величины [11].

3. Методы НК чувствительны к состоянию поверхностного слоя, которое обычно отличается от объема материала, что приводит к погрешности, равной или даже превышающей измеренное значение напряжения; микроструктура испытуемого материала и остаточная пластическая деформация, обычно неизвестная, также вносят свой вклад в измеряемую величину.

4. Геометрические факторы, которые обычно не согласовываются друг с другом при калибровке и измерении, также становятся дополнительным источником погрешности измерения.

Таким образом, в рамках современных методик, при калибровке измеряемая величина физических параметров, зависящая от механического напряжения, не является независимой частью образца, а зависит от ми-

кроструктуры и состояния поверхности. Поэтому последующее «слепое» определение величины напряжения (деформации) методами НК в материале с неизвестной микроструктурой содержит непредсказуемую погрешность измерения. Исследования влияния двухосного НДС на параметр интенсивности ШБ ограничены. Все это мотивирует к изучению двухосного напряжения [12].

Основной целью данной статьи является представление исследований двухосного НДС, его влияние на параметр интенсивности ШБ и демонстрация нейтронного дифрактометра как прототипа эталонного прибора для измерения механического напряжения и апробация на нем метода ШБ.

Влияние механического напряжения на магнитные параметры

В материале с двухосной геометрией (предполагается, что нормальное напряжение в направлении Z равно нулю) даже одноосное нагружение приводит к возникновению двухосного напряжения (присутствуют три компоненты тензора напряжений: σ_{xx}, σ_{yy} *и* σ_{xy}) в любой части материала образца. Поэтому, со ссылкой на [13] и уравнения (1), (2), следует рассмотреть взаимосвязь компонент главного напряжения. От этого зависит изменение магнитоупругой энергии. Это следует из закона магнитной анизотропии Акулова [14], и для кубической кристаллической решетки описывается изменением свободной энергии F_σ под действием внешнего упругого напряжения, определяемого как σ_{ij}. Ее общий вид для монокристалла представляется как:

$$F_\sigma = -3\left[\lambda_{100} \sum_i \left(\alpha_i^2 - \frac{1}{3}\right)\sigma_{ii} - 3\lambda_{111} \sum_{i,k} \sigma_{i,k}\alpha_i\alpha_k\right], \qquad (3)$$

где λ_{100}, λ_{111} – магнитострикционные константы, представляющие собой магнитострикционное удлинение при магнитном насыщении в соответствующем направлении; α_1, α_2, α_3 – направляющие косинусы вектора намагниченности кристалла.

В изотропном случае однородного напряжения, приложенного в направлении γ_1, γ_2, γ_3, $\lambda_{100} = \lambda_{111} = \lambda_s$, магнитострикция насыщения образца приводит к:

$$F_\sigma = -\frac{3}{2}\lambda_s \sigma \cos^2\varphi = -Hl, \qquad (4)$$

где φ – угол между вектором (α_1, α_2, α_3) и направлением (γ_1, γ_2, γ_3); H – напряженность магнитного поля, создаваемая в материале источником магнитного поля; I – интенсивность намагниченности материала.

Другими словами, свободная энергия для известной величины изменения намагничивающего поля (как в магнитном ШБ) пропорциональна значению интенсивности намагниченности.

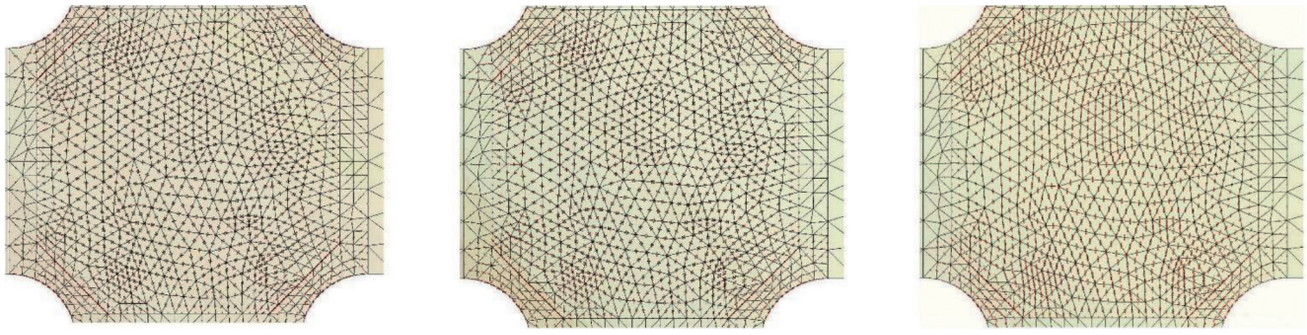
В предположении о значении интенсивности ШБ, которое зависит от величины изменения свободной энергии и, таким образом, от величины приращения намагниченности, к увеличению намагниченности и величины интенсивности ШБ приводит увеличение механического напряжения в материале с положительной магнитострикционной постоянной, если напряженность поля совпадает с направлением приложенной нагрузки.

Измерение величины интенсивности ШБ при намагничивании в одном направлении, перпендикулярном направлению приложенной нагрузки, приводит к влиянию двух факторов, которые определяют уровень сигнала ШБ на выходе приемной катушки:

1. Согласно уравнениям (1), (2), при сжатии /растяжении в основном направлении (деформация εx) деформация в другом главном направлении εy увеличивается/уменьшается, что, в свою очередь, дает рост/уменьшение намагниченности в этом направлении, что вызывает увеличение уровня сигнала ШБ. Приложение напряжения к кристаллу вызывает появление наведенной магнитной кристаллической анизотропии, а роль константы магнитострикции сводится к члену $\frac{3}{2}\lambda_s\sigma$. Это связано с тем, что в выражении для свободной энергии (3) появляется член, пропорциональный магнитокристаллической анизотропии. В действительности, растягивая или сжимая кристалл, можно вызвать магнитоодноосное состояние при условии $\frac{3}{2}\lambda_s\sigma \gg K_1$, где K_1 – первая константа анизотропии. В результате анизотропии, вызванной напряжением, изменение свободной энергии происходит путем полной перестройки его доменной структуры, что существенно влияет на изменение величины ШБ во всех направлениях намагниченности образца. Как уже упоминалось, следует также учитывать измерение значения ШБ во взаимно перпендикулярных (к нагрузке) направлениях намагниченности и их корреляцию.

2. Как видно из вышеизложенного, напряжения также связаны между собой, что следует учитывать при анализе результатов измерения. Таким образом, основной теоретический вывод состоит в том, что появление магнитной анизотропии является результатом перестройки доменной структуры в деформируемом материале. Это оказывает влияние на уровень сигнала ШБ, который является индикатором состояния доменной структуры. Такая теоретическая экстраполяция проверяется в настоящем исследовании.

Первый вопрос, на который необходимо ответить, заключается в следующем: вносит ли каждый из компонентов тензора напряжений одинаковый вклад в изменение значения ШБ? Существование составляющих механического напряжения (деформации), вклад которых отличается от других составляющих, было определено с использованием метода конечных элементов (МКЭ) и показано



а) б) в)

Рис. 1. МКЭ-картина распределения главных компонент напряжения на поверхности крестообразного образца после приложения напряжения

на рис. 1. На рис. 1а и 1б составляющие имеют одинаковое соотношение главных ортогональных компонентов напряжения – 1:1, в отличие от рис. 1в, где отношение соответствующих компонентов равно 1:2. Видно, что несимметричное приложение нагрузки полностью меняет картину нормальных и касательных составляющих в МКЭ (рис. 1в) за счет появления касательных напряжений. Также видно, что симметрия компонентов главных напряжений (близкая к гидростатической деформации, за исключением координаты *Z*) не влияет на характер напряжения в расчетах МКЭ, и это выглядит как отправная точка для изучения того, что в этом случае происходит с микромагнитными характеристиками. В настоящем исследовании проводится ряд экспериментов по изучению этих явлений.

Техника и инструменты для иллюстрации экспериментальной взаимозависимости основных компонент тензора напряжения

В первую очередь представлены эксперименты с использованием сосудов, находящихся под давлением масла, которые иллюстрируют влияние взаимосвязи составляющих компонент тензоров напряжения (деформации) и величины ШБ соответственно. В экспериментах используется известная корреляция между компонентами механического напряжения для малоуглеродистой стали с положительным знаком магнитострикционной постоянной. Это объясняется следующим:

а) кольцевая (по окружности сосуда) составляющая компонент тензора напряжения (деформации) в два раза больше, чем осевая (вдоль длины сосуда) составляющая;

б) сосуды под давлением дают хорошую экспериментальную возможность для моделирования двухосной схемы нагружения, поскольку известно соотношение величин осевого и кольцевого составляющих компонент тензора напряжения равное ½, а также хорошо известна их количественная зависимость от внутреннего давления масла в сосуде. Следовательно, легко определить значения напряжения, если известно давление внутри сосуда.

В эксперименте использовались две разные модели: одна – труба диаметром 273 мм и толщиной стенки 6 мм (рис. 2) с приваренными с обеих сторон крышками, а вторая – тонкостенный баллон диаметром 300 мм (рис. 3) с толщиной стенки 3 мм. На каждой из них присутствовало специальное приспособление для подачи масла и измерения давления. Обе модели были изготовлены из высокопрочной и низкоуглеродистой стали. Значения осевого (σ_{xx}) и кольцевого (σ_{yy}) составляющих компонент тензора напряжения рассчитывались в зависимости от давления масла. Таким образом, в выделенной зоне (рис. 2) создавалось двухосное НДС. Поверхность материала была очищена и обработана для обеспечения качества измерений ШБ с помощью магнитошумового анализатора Introscan в кольцевом и осевом направлениях.

Зависимость измеренных значений ШБ от расчетных значений напряжения показана на рис. 4 для трубы и баллона соответственно. Диаграммы также содержат кривые, набор точек, взятые из трехмерных графиков, показывающих соотношения между значениями напряжения во взаимоперпендикулярных направлениях (по осям X и Y) и соответствующие условию $\sigma_{xx}/\sigma_{yy} = 1/2$.

Представленные значения ШБ, соответствующие идентичным значениям напряжения на двухосных калибровочных графиках (крестообразные образцы с направлениями нагружения по осям *X* и *Y*, рис. 5) служат для подтверждения того, что такие данные могут быть получены при независимых экспериментах. Результат хорошо виден: несмотря на повышенное значение напряжения в осевом направлении (ось *X*), величина ШБ снижается, что связано с увеличением в два раза компоненты напряжения по оси *Y*. Таким образом, одним из выводов по двумерным графикам, отображенным на рис. 6, является

Рис. 2. Экспериментальная модель:
труба диаметром 273 мм и толщиной стенки 6 мм; магнитошумовой анализатор *Introscan* и манометр для измерения давления масла представлены в верхней части трубы

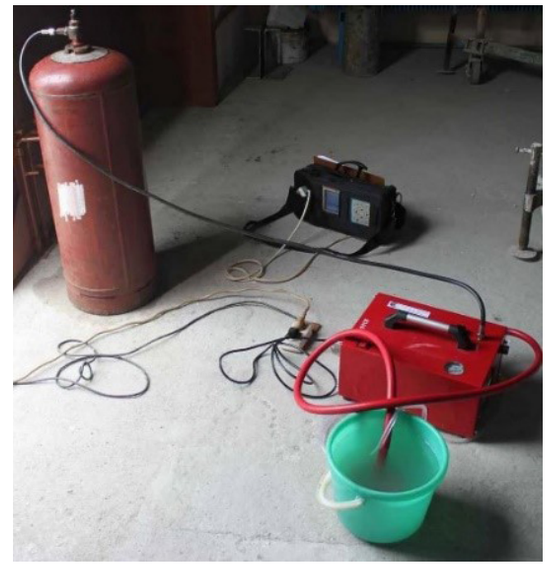


Рис. 3. Экспериментальная модель: тонкостенный баллон диаметром 300 мм и толщиной стенки 3 мм.

возможное уменьшения величины ШБ в условиях, когда механическое напряжение при двухосном нагружении растет. Такой результат следует из необходимости учитывать значения главных напряжений во взаимоперпендикулярных направлениях при прогнозировании значений напряжений с помощью параметра ШБ и/или других физических величин. Пренебрежение этим правилом и формулами (1), (2) часто приводит к неправильной интерпретации экспериментальных результатов. Таким образом, следует учитывать основы теории упругости для прогнозирования значений механического напряжения при измерении средствами НК.

Для создания внутреннего давления в экспериментальных моделях использовался электрический ручной нагнетатель *V-Test 60-6* (P = 0…6 МПа) и криогенный поршневой насос «НЖ-0,03/20» (P = 0…20 МПа). Значения напряжений в точках измерения рассчитывались по известным формулам:

$$\sigma_{xx} = \frac{pD}{2\delta},\ \sigma_{yy} = \frac{pD}{4\delta} \qquad (5)$$

где D – внутренний диаметр сосуда, δ – толщина стенки сосуда.

Внутреннее давление изменялось в пределах 0-5 МПа для баллона и 0-9 МПа для трубы. Для минимизации влияния зон сварки на результаты измерения ШБ локальные зоны исследования были максимально удалены от сварных соединений.

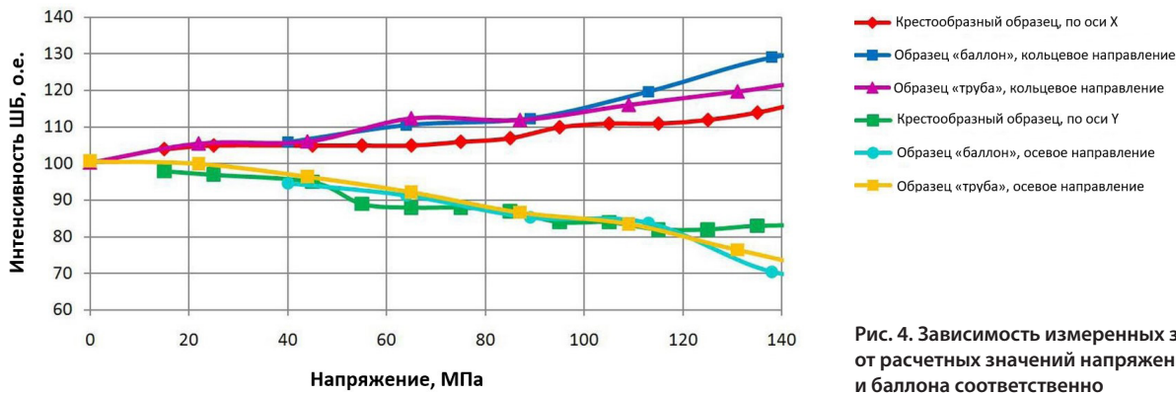


Рис. 4. Зависимость измеренных значений ШБ от расчетных значений напряжений для трубы и баллона соответственно

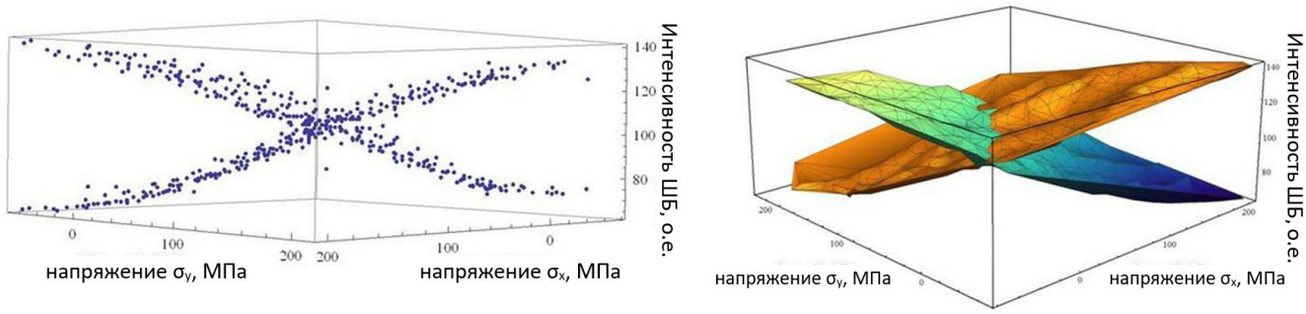


Рис. 5. 3D-график зависимости интенсивности ШБ (ось *Z*) от значений напряжения σ_x (ось *X*) и σ_y (ось *Y*) соответственно:
слева – экспериментальный график;
справа – сплайновая аппроксимация

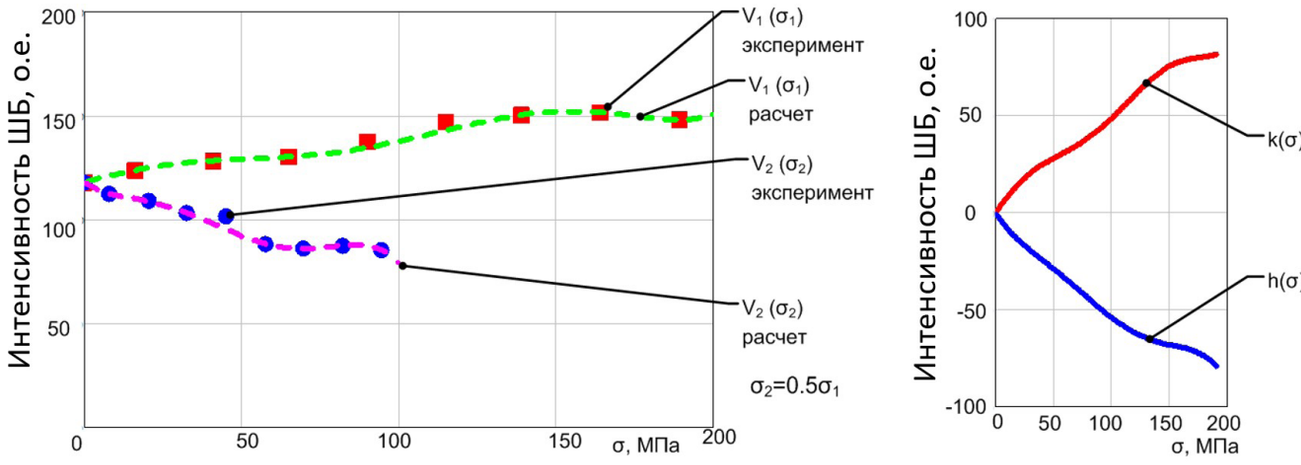


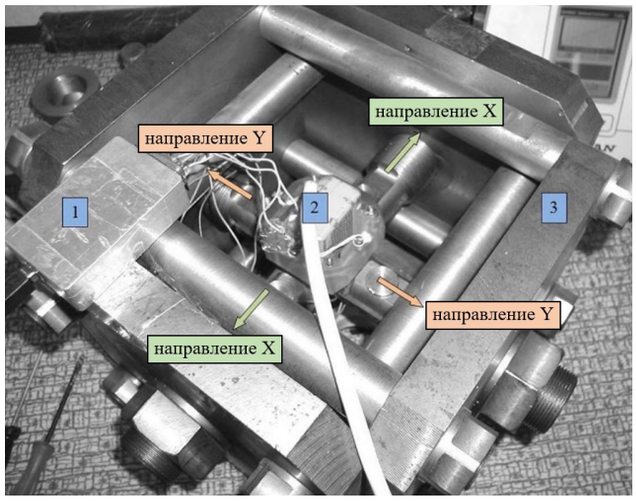
Рис. 6. Результаты подстановки данных экспериментального двухосного нагружения в функции преобразования *k(σ)* и *h(σ)*, взятые из экспериментов с нагружением сосудов высоким давлением, для различных отношений σ_1/σ_2

Как видно, экспериментальные значения параметра интенсивности ШБ, взятые по результатам измерений на баллоне и трубе, с одной стороны, и взятые из двухосных графиков, полученных для крестообразного образца (рис. 5), с другой стороны, в принципе коррелируют.

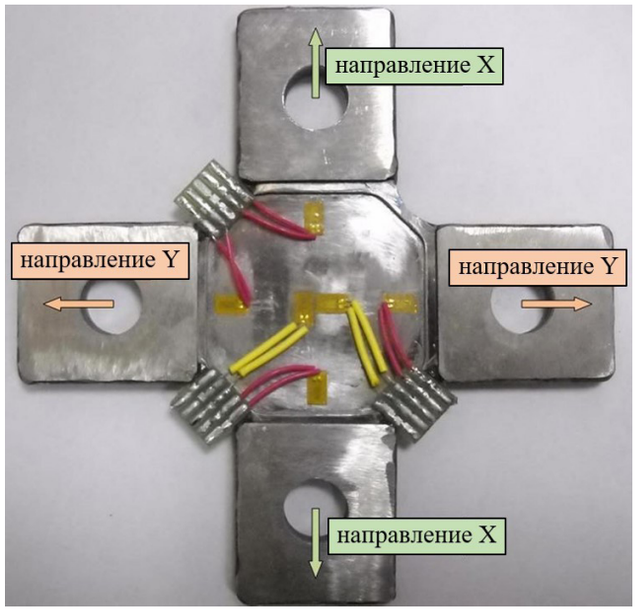
Методика исследования НДС при двухосном нагружении

Основной принцип представленной экспериментальной методики заключается в обеспечении плотного закрепления краев крестообразного образца в направлении Y при нагружении и в основном направлении нагрузки X, перпендикулярном Y. Реализация этого условия осуществляется на устройстве, представленном на рис. 7а. Исследуемый крестообразный образец показан на рис. 7б. Его конструкция обосновывается расчетом МКЭ с целью обеспечения наилучшей однородности распределения напряжения (деформации) в центральной части образца, где на противоположных сторонах расположены 6 тензодатчиков (4 датчика попарно в периферийной части и 2 взаимно-ортогональных датчика в центре) и преобразователь ШБ. Такой расчет необходим для минимизации погрешности между результатами измерения ШБ и показаниями двух тензодатчиков, расположенных в центре образца.

Крестообразный образец закреплен в устройстве шпильками (рис. 7а) и нагружается четырьмя тяговыми винтами. Сначала образец одновременно деформируют на один шаг растяжением или сжатием по оси Y с помощью двух противоположных винтов, обеспечивая равные показания в четырех периферийных тензометрах попарно. После этого добавляется приращение к деформации



а)



б)

Рис. 7. Устройство для двухосного нагружения крестообразного образца:
а – общий вид нагрузочной установки:
1) тензодатчик, 2) датчик ШБ, 3) двухосная нагрузочная установка;
б – крестообразный образец с 6 тензорезисторами

в направлении X (сохраняются те же положения ребер во вспомогательном направлении Y). Показания периферийных датчиков также попарно выравниваются, чтобы избежать саблевидной геометрии. Записываются показания центрального тензодатчика в направлениях X и Y соответственно. С помощью магнитошумового анализатора *Introscan* измерения величины ШБ производятся в центре образца (точно на противоположной стороне от расположения двух центральных тензодатчиков) в основном направлении *X* и вспомогательном направлении *Y*. После достижения предела упругой деформации в основном направлении *X* образец по этой оси разгружается и добавляется приращение деформации во вспомогательном направлении *Y*, и вся процедура повторяется в направлении *X* до уровня, после которого начинается пластическая деформация. Важно, что при ступенчатом нагружении образца в основном направлении *X* два его «плечевых» положения, во вспомогательном направлении *Y*, остаются фиксированными. Это позволяет деформировать крестообразный образец в обоих направлениях в течение одного цикла деформации и, наконец, построить две двухосные калибровочные поверхности в трехмерном пространстве, как показано на рис. 5 для низколегированной стали 09Г2С.

Отметим, что в устройстве классического типа с масляными цилиндрами [10] напряжения в центре образца после каждого ступенчатого нагружения перераспределяются из-за условия равновесия, поэтому обеспечить требуемые значения деформации при ступенчатом нагружении затруднительно. В представляемом устройстве хорошо соблюдается условие совместимости деформаций. Его преимуществом является способность обеспечивать условия деформации материала, близкие к возникающим на практике, например, в трубах, сосудах под давлением, оболочечных конструкциях и т.п., в которых приложенная нагрузка не вызывает больших изменений размеров и формы изделия. В случае использования устройства с масляными цилиндрами [10], напротив, предполагают, что для обеспечения условия равновесия объект может произвольно изменять свою геометрию и форму.

Трехмерные диаграммы изменения величины ШБ (ось *Z*) в зависимости от значений главного напряжения в направлениях *X* и *Y* показаны на рис. 5 (экспериментальный график и его сплайновая аппроксимация). Значения в МПа даны после расчета с учетом соотношения главных напряжений согласно уравнениям (1) и (2). Две поверхности соответствуют основному направлению намагниченности *X* и вспомогательному направлению *Y* при измерении значений ШБ с намагниченностью по оси *X*: возрастает – в основном направлении *X*, убывает – в направлении *Y*. Полученные 3D-графики позволяют сделать некоторые важные выводы:

1) линия пересечения двух поверхностей указывает на равенство двух взаимно перпендикулярных значений компонент тензора напряжения (деформации). Это условие можно назвать условием симметрии деформации, $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy}$. При движении вдоль этой симметричной линии значение ШБ (в пределах погрешности измерения) остается примерно (с точностью до 8%) постоянным. Экспериментальная

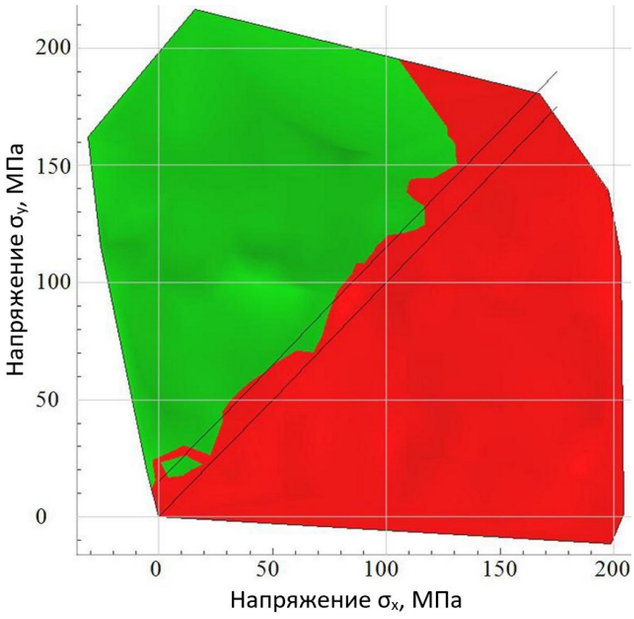


Рис. 8. Проекция на плоскость XY линии пересечения двух экспериментально полученных поверхностей (восходящей и нисходящей соответственно) и ее линейная аппроксимация. Линия (обычно обозначаемая как «ось гидростатического растяжения» или «ось растяжения») соответствует условию равенства обеих (X и Y) главных компонент тензора напряжения (деформации), приложенной к двухосному образцу

линия пересечения и ее линейная аппроксимация после проекции на плоскость XY показаны на рис. 8;

2) если предположить, что при двухосном нагружении деформация материала в направлении *Z* пренебрежимо мала, то отсюда следует неизменность (инвариантность) величины ШБ относительно симметрии (изотропной или сферической) компонент тензора напряжения (деформации), который является частью тензора деформации, последняя из которых представляет собой сумму сферической ε_s и сдвиговой τ_{ij} составляющих компонент тензора деформации:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_s + \tau_{ij}, \qquad (6)$$

где $\varepsilon_s = \frac{1}{3}(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz})$ – гидростатическая сферическая (дилатационная) часть тензора деформации: τ_{ij} – девиаторная (сдвиговая) часть тензора.

Линия под углом 45° (называемая обычно «гидростатическая ось») соответствует условию равенства обеих (*X* и *Y*) главных компонент тензора напряжения (деформации), приложенной к двухосному образцу. Отсюда следует, что величина ШБ не изменяется, если равны значения напряжения (деформации), что эквивалентно утверждению, что величина ШБ остается постоянной при гидростатическом растяжении или сжатии. Это фундаментальное правило, продемонстрированное экспериментально для ШБ, представляется очень важным для оценки напряжений (деформаций) для различных магнитных методов НК. Отметим, что гидростатическое напряжение (деформация) изменяет объем, а напряжение сдвига изменяет форму. Как было показано ранее (рис. 1), гидростатическая деформация также не показывает изменения в расчетной модели МКЭ.

Для пояснения, можно предположить, что величина ШБ при общем сжатии или растяжении зависит только от микроструктуры материала, а не от значений симметрии величин напряжения (деформации). Это предположение было сделано ранее в статье [10] и проведенные исследования подтверждают это четкими экспериментальными результатами.

Математическое моделирование с учетом экспериментальных данных

Выразим влияние двухосных напряжений на величину ШБ в математическом виде:

$$\begin{cases} V_1 = k(\sigma_1) + h(\sigma_2) \\ V_1 = k(\sigma_2) + h(\sigma_1) \end{cases} \qquad (7)$$

где V_1 – величина ШБ, при поле намагниченности направленном в направлении *X*; V_2 – величина ШБ, при поле намагниченности направленом в направлении *Y*; $k(\sigma_1)$, $k(\sigma_2)$, $h(\sigma_1)$, $h(\sigma_2)$ – функции преобразования значения напряжения σ в направлении намагниченности в величину ШБ.

Из системы уравнений (7) следует, что оба главных напряжения вносят вклад в параметры магнитного сигнала в любом основном направлении.

Предположим, что функции преобразования $k(\sigma)$ и $h(\sigma)$ с достаточной степенью точности описываются полиномами шестой степени. Таким образом, взяв $n + 1$ (n-степень полинома) точек на рис. 6, можно оценить полиномиальные коэффициенты по набору данных V_{1i}, V_{2i}, σ_{1i}, σ_{2i}. На рис. 6 приводится сравнение поведения расчетных и аппроксимированных экспериментальных данных для сосуда типа «труба». Аналогичный результат получается для баллона (рис. 4). Оказывается, что функции преобразования $k(\sigma)$ и $h(\sigma)$ в упругой зоне имеют точность в пределах знака. Таким образом, при нагружении чем ближе по величине значения σ_1 и σ_2, тем меньше изменяется величина ШБ V_1 и V_2. Этот результат согласуется с основным выводом об инвариантности ШБ по отношению к изменению напряжения растяжения. С другой стороны, замена $\sigma_2 = 0$ в уравнении (7) дает максимальное изменение интенсивности ШБ с σ_1 и отображает одноосную зависимость ШБ от напряжения. Наблюдается кор-

реляция между функциями на рис. 5 (чистая двухосная нагрузка) и на рис. 4 (нагрузка сосуда под давлением). Подставляя в уравнение (7) значения из набора данных на рис. 5 для различных отношений σ_2/σ_1 и с помощью полученных функций преобразования $k(\sigma)$ и $h(\sigma)$, получим значения V_1 и V_2 для сравнения с набором экспериментальных данных.

Нейтронный дифрактометр как прототип эталонного прибора для измерения двухосного механического напряжения

Наиболее точным методом измерения НДС на сегодняшний день является метод дифракции нейтронов (МДН), с помощью которого можно измерить межплоскостное расстояние в кристаллической решетке. Критической величиной является пространственная разрешающая способность нейтронного прибора и максимальная глубина измерения напряжения. На сегодняшний день в России наилучшими параметрами для исследования массивных образцов обладает нейтронный стресс-дифрактометр НИЦ «Курчатовский институт» в г. Москва.

Благодаря сравнительно большой проникающей способности нейтронов (в отличие от рентгеновских лучей) в большинстве материалов дифракция нейтронов является единственным неразрушающим методом, позволяющим измерить распределение напряжений в массивных объемных изделиях [15]. Поэтому в последние 10-15 лет метод интенсивно развивался во многих нейтронных центрах для решения научных и прикладных задач, связанных с измерением внутренних напряжений.

Измерение напряжения (деформации) происходит в выделенном объеме (пробный объем или *gauge volume*) внутри массивного образца, размер которого лежит в пределах 1-100 мм³ (рис. 9) [17].

МДН измеряется смещение дифракционных пиков в деформированном материале, по которому определяется компонента тензора деформации ε_x, ε_y, ε_z вдоль трех взаимно перпендикулярных главных направлений x, y, z [15] и, пользуясь обобщенным законом Гука, вычисляются компоненты тензора напряжения σ_x, σ_y, σ_z:

$$\begin{cases} \sigma_x = E[(1-2\nu)\,\varepsilon_x + \nu(\varepsilon_x+\varepsilon_y+\varepsilon_z)]/(1+\nu)(1-2\nu) \\ \sigma_y = E[(1-2\nu)\,\varepsilon_y + \nu(\varepsilon_x+\varepsilon_y+\varepsilon_z)]/(1+\nu)(1-2\nu) \\ \sigma_z = E[(1-2\nu)\,\varepsilon_z + \nu(\varepsilon_x+\varepsilon_y+\varepsilon_z)]/(1+\nu)(1-2\nu) \end{cases} \quad (8)$$

где E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона [15].

Совмещая точки образца, в которых нужно измерить напряжения, с центром пробного объема, можно измерить распределение напряжений по образцу.

Для проведения исследований МДН двухосного НДС в качестве нагрузочного устройства был предложен прототип рассмотренной установки (рис. 7а). Он характеризуется компактностью, мобильностью и небольшим весом, а также возможностью создавать достаточно большие нагрузки на крестообразном образце (рис. 7б). Его общий вид представлен на рис. 10.

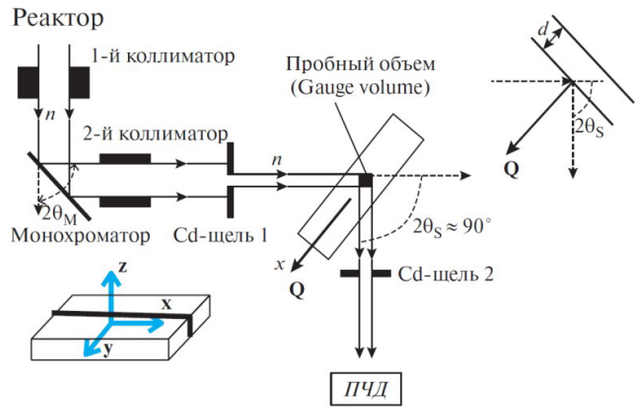


Рис. 9. Схема измерения напряжений с помощью нейтронного дифрактометра:
x, y, z – главные направления (*x* – продольное, *y* – поперечное, *z* – нормальное) в образце. При измерении компоненты деформации ε_x, ε_y, ε_z образец устанавливается так, чтобы соответствующее главное направление *x, y, z* совмещалось с вектором рассеяния *Q* (биссектриса угла между падающим и отраженным пучками нейтронов). ПЧД – позиционно-чувствительный детектор [17]

Принцип нагружения образца и снятия показаний деформации МДН и параметра ШБ аналогичен описанной

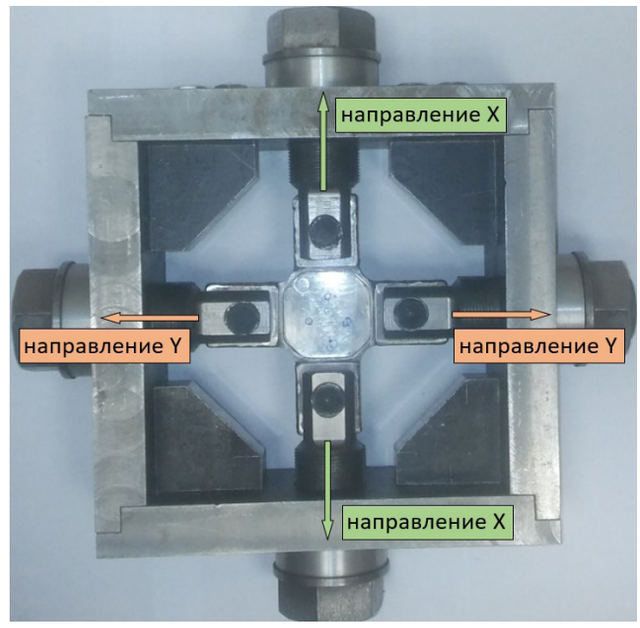
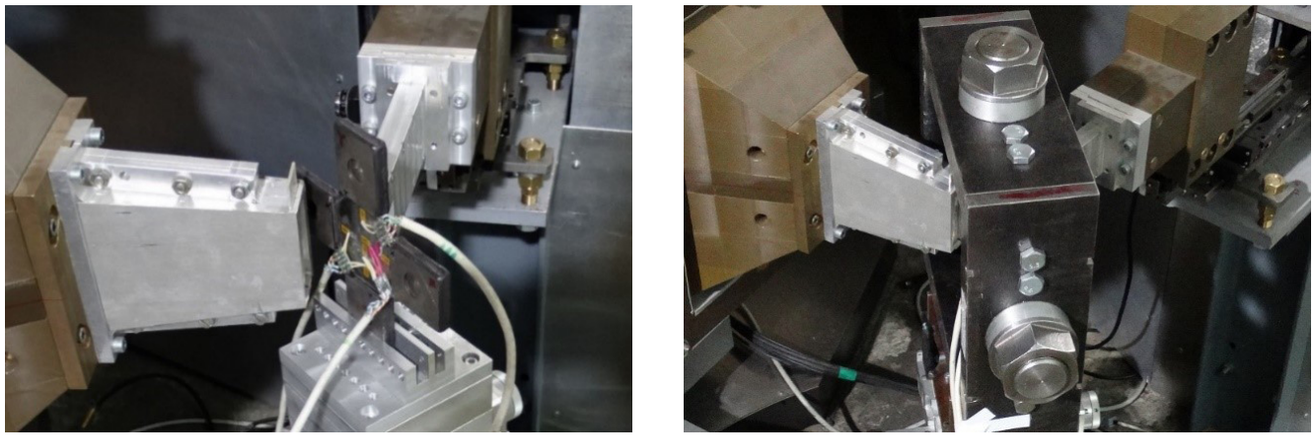


Рис. 10. Компактное устройства для создания двухосного НДС



а) б)

Рис. 11. Измерение параметра d_0 и d в материале образца, находящемся в свободном (а) и нагруженном (б) состоянии

выше методике для двухосного нагрузочного устройства. Только для проведения измерений деформации важно предварительно определить величину параметра d_0 (положение дифракционного пика в материале) тензоров напряжения в материале образца в ненагруженном состоянии. В исследовании измерялись только две компоненты тензора: продольная и поперечная – величина нормальной составляющей принималась равной нулю, т.к. при приложении нагрузки на образец его деформация происходит равномерно по всей его толщине (примерно 2 мм) при этом изменение величины нормальной составляющей незначительно и ею можно пренебречь [18].

Основные этапы измерения МДН параметров d_0 и d для каждой составляющей тензора напряжения в материале образца в свободном и нагруженном состоянии изображены на рис. 11.

В области анализа НДС использование МДН считается обоснованным и достаточно точным. Поэтому в наших исследованиях проводилось относительное сравнение показаний тензодатчиков с данными, полученными МДН.

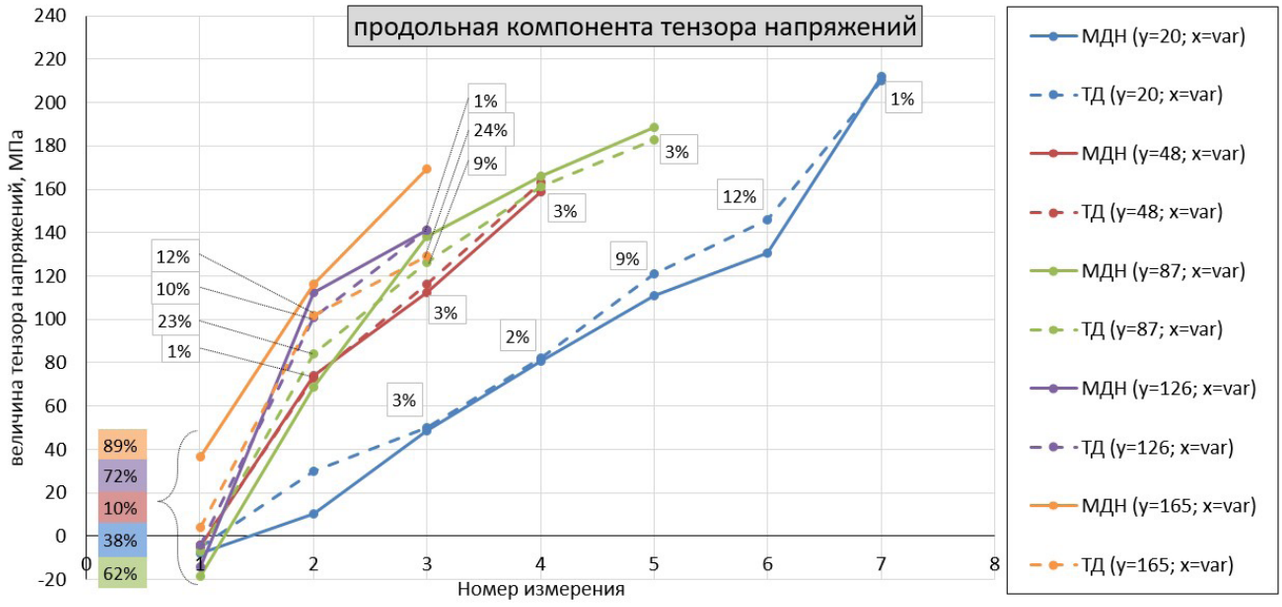


Рис. 12. Результаты измерения продольной составляющей компонент тензора напряжений тензодатчиками и МДН

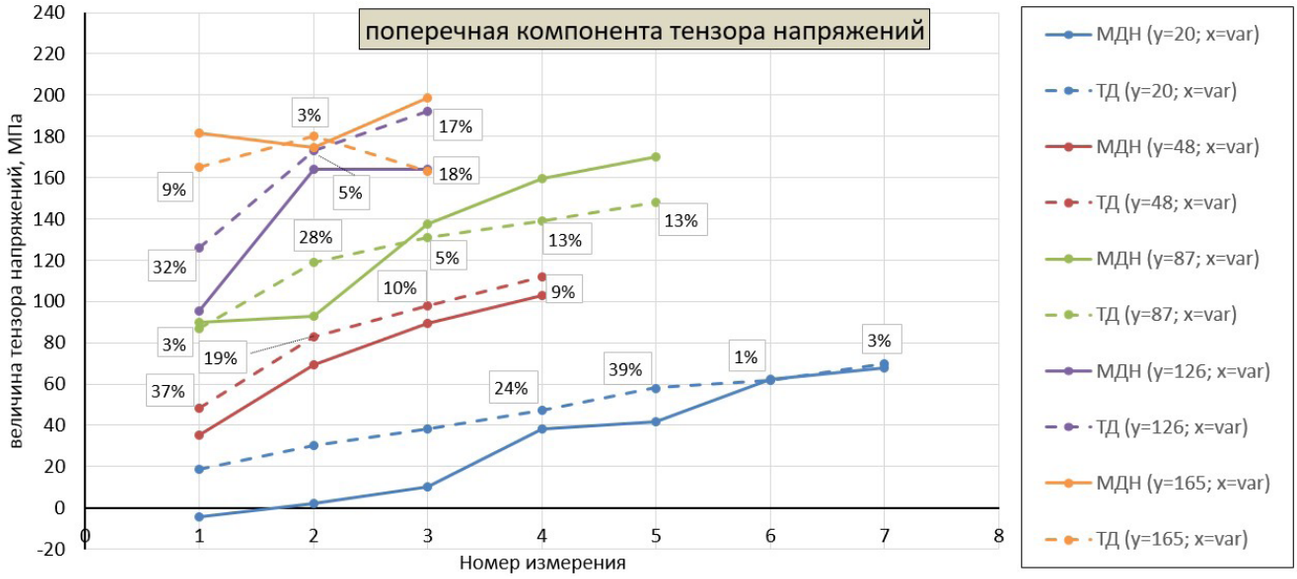


Рис. 13. Результаты измерения поперечной составляющей компонент тензора напряжений тензодатчиками и МДН

Из приведенных графиков (рис. 12, 13) следует:

1) очевидно расхождение результатов измерения, полученных с помощью тензодатчиков и МДН;

2) на приведенных графиках наблюдается некоторая сходимость результатов измерения при увеличении нагрузки в исследуемом образце. Определение малых величин возникающего в образце напряжения МДН проблематично, т.к. на результаты измерения оказывает некоторое влияние погрешность, которая в некоторых случаях может вносить ошибку до 50 МПа;

3) сходимость результатов измерения продольной компоненты тензора напряжений происходит быстрее по сравнению с поперечной компонентой, что может быть также связано со слабо выраженной анизотропией образца;

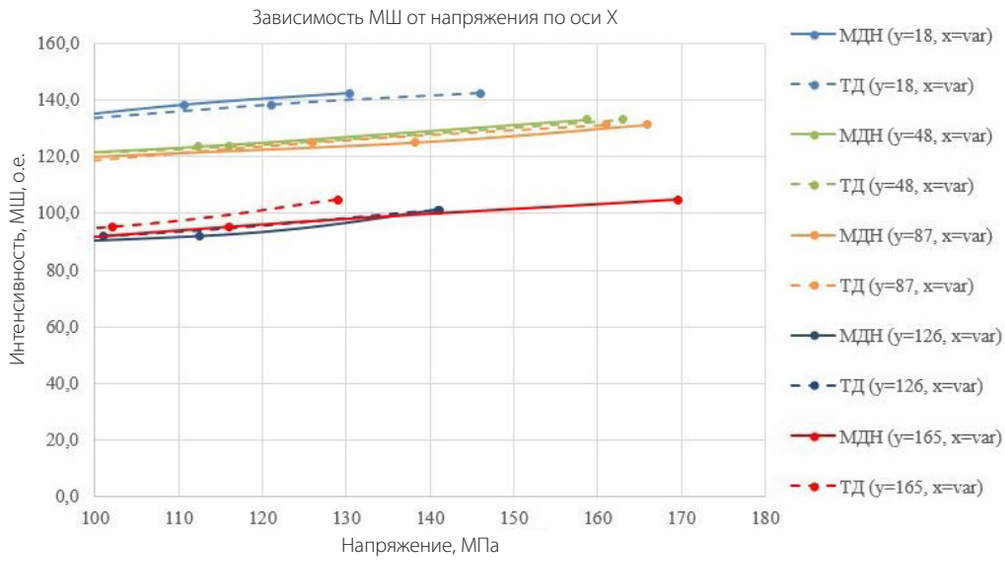


Рис. 14. Графики зависимости величины ШБ от напряжения по оси X, измеренного МДН и тензодатчиками

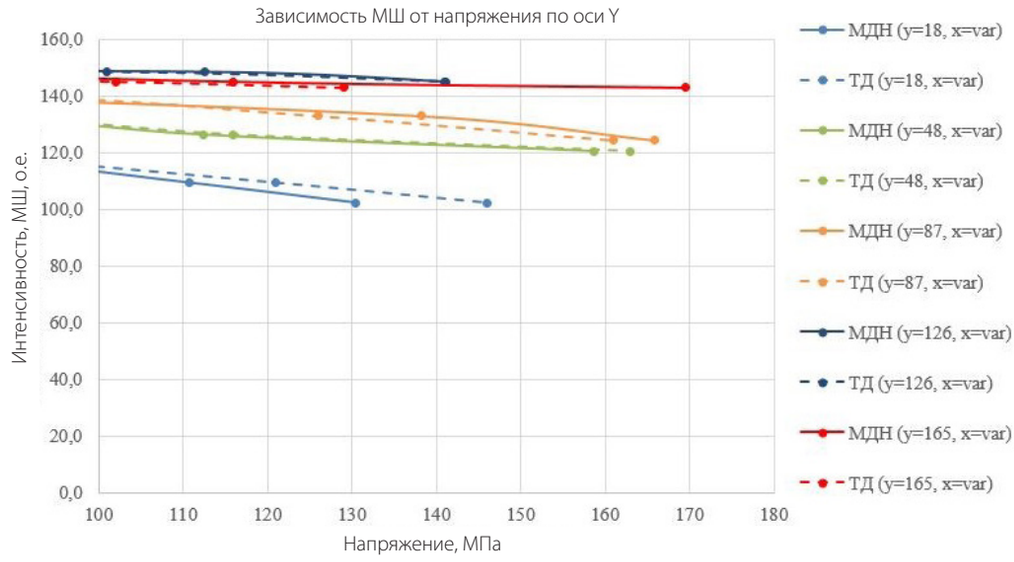


Рис. 15. Графики зависимости величины ШБ от напряжения по оси Y, измеренного МДН и тензодатчиками

4) источники погрешностей при проведении измерений тензоров двухосного напряжения, очевидны: а) погрешности измерения деформаций тензодатчиками и влияние сторонних факторов на измерения МДН (температура; большое рассеяние нейтронов, обусловленное близостью проведения измерения к поверхности образца); б) погрешность за счет неоднородности деформации в объеме образца, а также наличие инородных включений. Относительную погрешность определения величины компонент тензора напряжения тензодатчиками и МДН можно оценить по формуле (за опорное значение деформации выбирается величина, измеренная МДН на основе международного стандарта ISO/TS 21432):

$$\delta_{\text{ТД}} = \frac{|\varepsilon_{\text{МДН}} - \varepsilon_{\text{ТД}}|}{\varepsilon_{\text{МДН}}} \cdot 100\% \qquad (9)$$

где $\varepsilon_{\text{МДН}}$ – опорное значение деформации; $\varepsilon_{\text{ТД}}$ – величина деформации, измеренная тензодатчиками. Суммарная относительная расчетная средняя погрешность измерения деформации ТД и МДН составляет примерно 15%.

Сопоставление результатов измерения двухосного напряжения при одновременном использовании метода ШБ и МДН приведено на рис. 14, 15.

Выводы

1. Основным выводом из представленных результатов является условие инвариантности магнитного ШБ относительно любых изменений сферического (изотропного) тензора деформаций/напряжений, причем на последнее влияет только микроструктура материала.
2. Этот вывод подтверждается независимыми измерениями интенсивности ШБ на крестообразном образце с использованием установки для двухосного нагружения, а также на таких образцах, как труба и баллон, нагружаемых под давлением масла.
3. Величина ШБ зависит только от величины тензора напряжений. Отказ от этого условия приводит к слишком большому количеству неопределенностей в оценке механического напряжения (деформации) с использованием ШБ.
4. Дальнейшие исследования должны решить, можно ли применить это условие также к другим магнитным параметрам, таким как коэрцитивная сила, остаточная намагниченность и магнитная проницаемость, связанные с ШБ. Учет этого эффекта может улучшить количественный прогноз НДС на основе результатов измерения различных магнитных параметров.
5. Результаты проведенных исследований НДС образца МДН и тензодатчиками показали, что используемое в исследованиях двухосное нагрузочное устройство может быть применено для создания эталона напряжений. Необходимым является изучение путей повышения точности измерения напряжения указанными методами, что является главным метрологическим требованием.

6. Исследования изменения магнитных параметров МЭБ при двухосной нагрузке образца показали некоторую закономерность и эффективность применения данного метода в исследовании двухосного НДС.
7. Предложенная схема построения эталона напряжений для передачи меры напряжения другим средствам НК на примере метода ШБ может быть использована в рамках назначения. Данную схему необходимо усовершенствовать с целью снижения неопределенности измерения, источники которой требуют последовательного уменьшения их влияния.

Литература

1. S. Tiitto, US Patent No 4, 977, 373, 11, Dec 1990. Barkhausen noise method for determining biaxial stresses in ferromagnetic materials
2. Pasley, R.L.: Barkhausen effect: an indication of stress. Mater. Eval. 28(7), 157–161 (1970)
3. Jagadish, C., Clapham, L., Atherton, D.L.: The influence of stress on surface Barkhausen noise generation in pipeline steels. IEEE Trans. Magn. 25(5), 3452–3454 (1989)
4. Krause, T.W., Pattantyus, A., Atherton, D.L.: Investigation of strain dependent magnetic barkhausen noise in steel. IEEE Trans. Magn. 31, 3376–3378 (1995)
5. Sablik, M.J., Augustyniak, B.: The effect of mechanical stress on a Barkhausen noise signal integrated across a cycle of ramped magnetic field. J. Appl. Phys. 79, 963972 (1996)
6. Gauthier, J., Krause, T.W., Atherton, D.L.: Measurement of residual stress in steel using the magnetic Barkhausen noise technique. NDT&E Int. 31, 2331 (1998)
7. Mandache, C., Krause, T.W., Clapham, L.: Investigation of optimum field amplitude for stress dependence of magnetic Barkhausen noise. IEEE Trans. Magn. 43, 3976–3983 (2007)
8. Samimi, A.A., Krause, T.W., Clapham, L.: Stress-response of magnetic Barkhausen noise in submarine hull steel: a comparative study. J. Nondestruct. Eval. 35, 32 (2016)
9. Inaguma, T., Sakamoto, H., Hasegawa, M.: Stress dependence of Barkhausen noise in spheroidized cementite carbon steel. IEEE Trans. Magn. 49(4), 1310–1370 (2013)
10. Sablik M.J. Modeling the Effects of Biaxial Stress on Magnetic Properties of Steels with Application to Biaxial Stress NDE / M.J. Sablik // Nondestructive Testing and Evaluation. – 1995. – Vol. 12, N. 2. – P. 87-102.
11. Венгринович, В.Л. Байесовский подход к неразрушающему контролю напряженно-деформированному состояния / В.Л. Венгринович, Д.В. Дмитрович // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2008. – № 4. – С. 45-53.
12. Tiitto, S.: Magnetoelastic testing of biaxial stresses – Experimental Techniques. Springer, New York (1991)
13. Krause, T.W., Clapham, L., Pattantyus, A., Atherton, D.L.: Investigation of the stress- dependent magnetic easy axis in steel using magnetic Barkhausen Noise. J. Appl. Phys. 79(7), 4242–4252 (1996)
14. Akulov, N.S.: Ferromagnetism. Nauka, Moscow (1939)
15. Hutchings M.T. Introduction to the Characterization of Residual Stress by Neutron Diffraction / M.T. Hutchings, P.J. Withers, T.M. Holden, T. Lorentzen // London: Taylor and Francis. – 2005.
16. Withers P.J. // J. Appl. Cryst. – 2004. – V. 37. – P. 596.
17. Эм В.Т. Двухкристальный монохроматор для нейтронной стресс-дифрактометрии / В.Т. Эм, А.М. Балагуров, В.П. Глазков, И.Д. Карпов [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2017. – № 4. – С. 75-81.
18. Венгринович В.Л. К вопросу об эталоне механических напряжений / Д.А. Винтов, В.Т. Эм, И.Д. Карпов // Контроль и диагностика. – 2020. – № 2. – С. 28-37.