

ДИСЛОКАЦИОННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И ПРОБЛЕМЫ ПРОЧНОСТИ

DISLOCATIONS AND PROBLEM OF STRENGTH

УДК 620.179.14

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, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk)
Prudnikov A.N.
(Belarusian-Russian University, Mogilev)

Методика исследования двухосного напряжённого состояния в цилиндрических образцах методом эффекта Баркгаузена

Method studying biaxial stress in cylindrical samples by Barkhausen Noise

Представлены результаты исследования методом эффекта Баркгаузена двухосного напряженного состояния в образцах типа баллон-труба. Описана методика исследования и проведена ее валидация.

There are presents the results of a study by the method of the Barkhausen effect of a biaxial stress in samples of the balloon-tube type. The researching methodology is described and validated.

Двухосное напряженно-деформированное состояние (НДС) является наиболее часто встречающимся видом нагрузки, который испытывает объект контроля при эксплуатации (трубопровод, строительные конструкции,

мостовые сооружения и т.д.). Важной задачей является научиться контролировать такое напряженное состояние с целью не допустить возникновения аварийных ситуаций, которые могут привести к печальным последствиям.



а



б

Рис. 1. Образцы для исследования механической нагрузки: образец №1 – баллон (а), образец №2 – прямошовная труба (б) толщина стенки которой составляет 6 мм (на торцах приварены толстостенные плоские доньшки, усиленные ребрами жесткости). Материал образцов – сталь ВСтЗсп по ГОСТ 380. Каждый из образцов имеет воздушник (устройство для удаления воздуха из внутренней полости) и штуцер для подключения запорной арматуры, контрольного манометра и напорного шланга высокого давления.

Одним из методов неразрушающего контроля (НК), обладающим повышенной чувствительностью к изменениям НДС, является метод эффекта Баркгаузена (МЭБ).

Для проведения в лабораторных условиях исследования МЭБ двухосного НДС были изготовлены два цилиндрических образца: образец №1 (рис. 1а) – цилиндрический баллон наружным диаметром 300 мм и с толщиной стенки 3 мм (имеет один продольный сварной шов, на его концах приварены эллиптические доньшки); образец № 2 (рис. 1б) – трубный образец электросварной прямошовной трубы диаметром 273 мм,

В стенках цилиндрических сосудов, находящихся под давлением, возникает двухосное напряженное состояние: выделяют осевую и кольцевую составляющие. Согласно известной формуле [1] кольцевое напряжение отличается от осевого в два раза.

Для создания испытательного давления использовался опрессовщик электрический V-Test 60-6 ($P = 0 \dots 6$ МПа) и криогенный поршневой насос НЖ-0,03/20 ($P = 0 \dots 20$ МПа). Кольцевое и осевое напряжение в образцах изменялось за счет варьирования величины внутреннего гидравлического давления в диапазоне 0-5 МПа для образца № 1 и 0-9 МПа для образца № 2. При таком значении внутреннего давления в стенках образцов происходит упругая деформация с интенсивностью напряжений в кольцевом направлении до $\sigma_{\text{кол.}} = 200$ МПа. Увеличение давления происходит поэтапно. На каждом этапе с помощью магнитошумового анализатора Introscan и преобразователя Баркгаузена (ПБ) (рис. 2 а и б) измеряется

параметр интенсивности магнитного шума (МШ) в двух взаимно перпендикулярных направлениях, совпадающих с главными напряжениями в стенке образца (кольцевым и осевым). Для минимизации влияния сварных швов и зон термического упрочнения материала на измеряемый параметр точки измерения по окружности баллона выбираются максимально удалёнными от сварных швов.

Краткое описание алгоритма проведения исследования механической нагрузки МЭБ на образцах типа баллон-труба:

- измерение параметра интенсивности МШ в исследуемых образцах, находящихся в ненагруженном состоянии;
- пошаговое нагружение образца (с шагом 1 МПа) и измерение интенсивности МШ;
- измерение МШ при максимальном нагружении образца и снятие с него нагрузки;
- обработка измеренных параметров и сравнение полученных результатов.

Для трехмерного численного моделирования НДС испытуемого образца № 2 использовалась программа расчета *ANSYS Mechanical R.16.1*. Общий вид расчетной геометрической модели представлен на рис. 3. В результате выполненных расчетов получена информация о распределении напряжений и деформаций в исследуемом образце.

Полученные при моделировании (для образца № 2) значения кольцевых и осевых напряжений сходятся с расчетными величинами, определенными по известным формулам [1]:



Рис.2. Магнитошумовой анализатор Introscan (а) и ПБ (б)

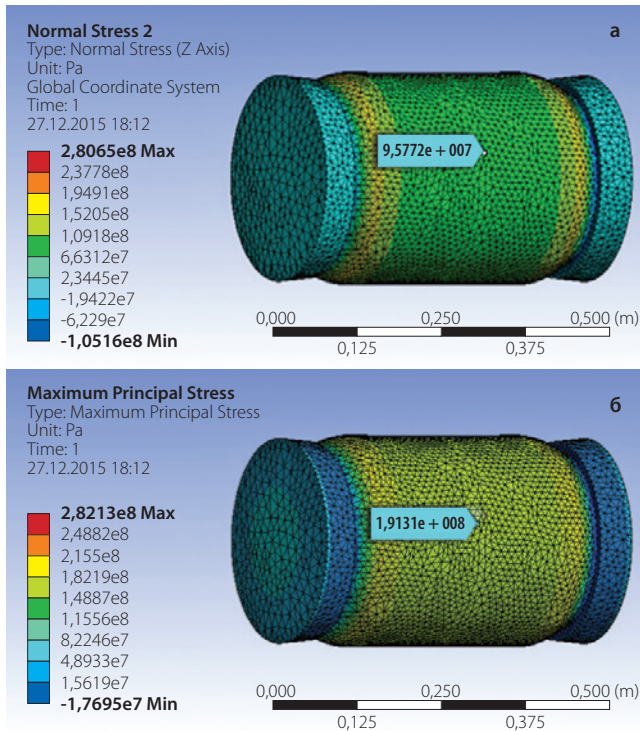


Рис. 3. Конечно-элементная модель образца №2, созданная в программе ANSYS Mechanical R16.1: распределение осевых (а) и кольцевых (б) напряжений

$$\sigma_{\text{кол}} = \frac{P(D_{\text{нар}} - s)}{2s} = \frac{9(273 - 6)}{2 \cdot 6} = 200 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{\text{осев}} = \frac{P(D_{\text{нар}} - s)}{4s} = \frac{9(273 - 6)}{4 \cdot 6} = 100 \text{ МПа},$$

где P – давление внутри образца, МПа; $D_{\text{нар}}$ – наружный диаметр образца, мм; s – толщина стенки трубы, мм.

Результаты измерения зависимости параметра интенсивности МШ от величины механического напряжения, возникающего в результате внутреннего давления, для образцов № 1 и № 2 представлены на рис. 4 и 5 соответственно.

Анализируя графические зависимости на рис. 4 и 5 можно сделать некоторые выводы:

- 1) в образце №1 присутствуют остаточные напряжения, выражающиеся в смещении точки пересечения кривых вдоль оси абсцисс (величина смещения составляет примерно -25 МПа);
- 2) на графиках точки пересечения кривых для образцов № 1 и № 2 имеют разные численные значения по оси ординат, что говорит об отличии их структурной составляющей, что вызывает расхождение МШ при нулевых напряжениях;

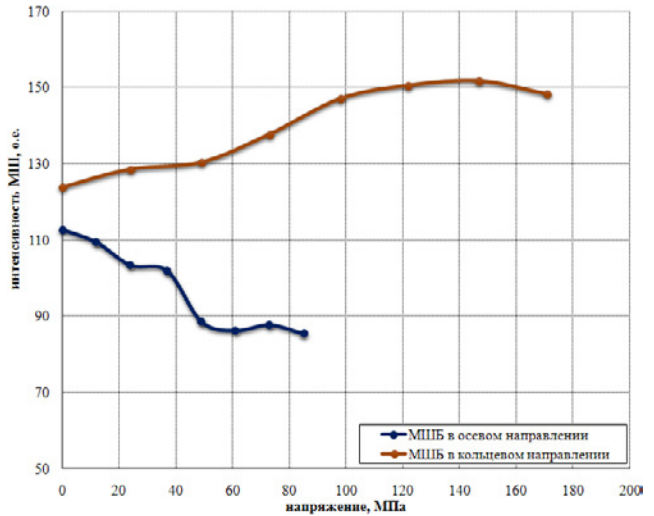


Рис. 4. Зависимость параметра интенсивности МШ от величины нагрузки, возникающей при создании давления в образце №1

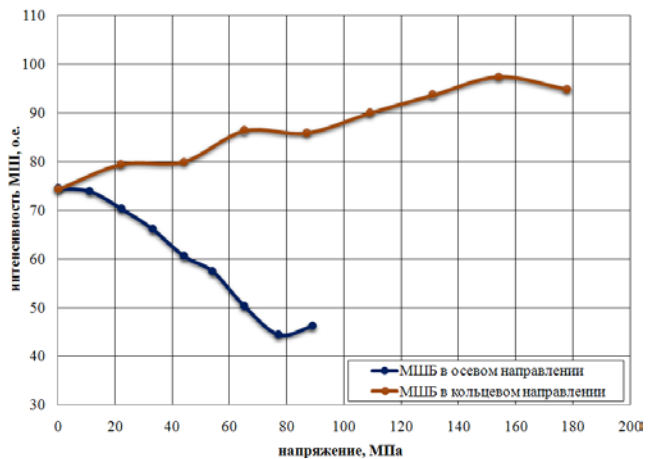


Рис. 5. Зависимость параметра интенсивности МШ от величины нагрузки, возникающей при создании давления в образце № 2

- 3) калибровочные характеристики для стали ВСтЗсп, построенные по образцам № 1 и № 2, практически совпадают.

Для подтверждения последнего вывода выполнено построение калибровочных характеристик для трех плоских образцов из стали ВСтЗсп при создании в них растягивающей нагрузки:

- образцы № 3, № 4 – толщина 4 мм, изготовлены из одного листового полуфабриката;
- образец № 5 – толщина 5 мм.

Подтверждением правильности вывода служит относительное совпадение калибровочных характеристик для образцов № 3, № 4, вырезанных из одного листа ме-

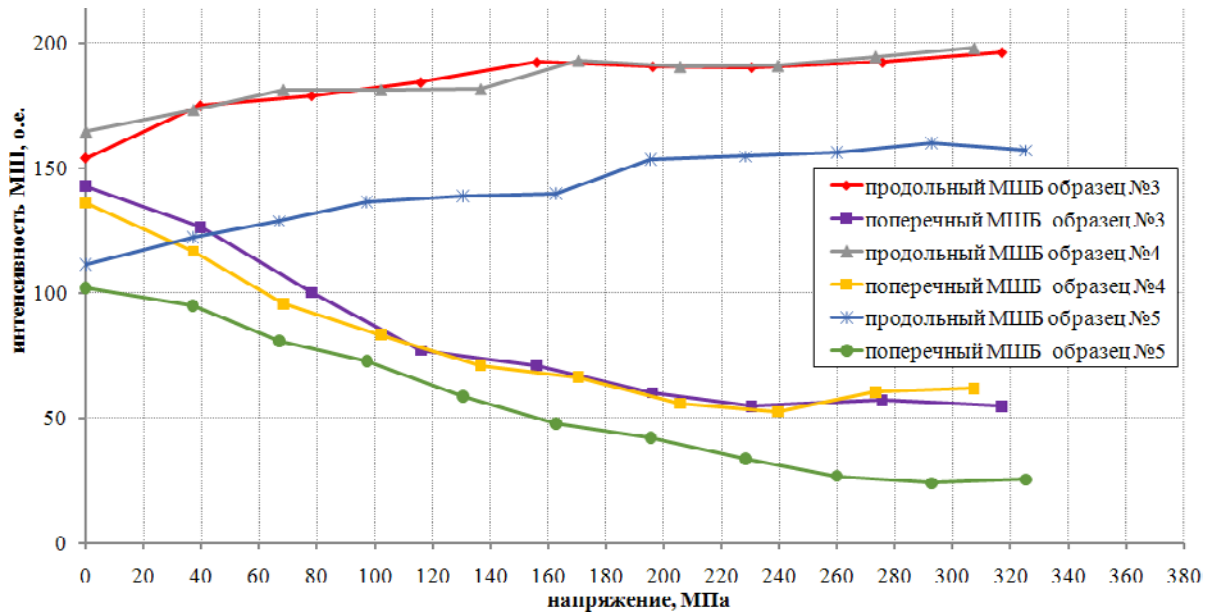


Рис. 6. Калибровочные характеристики образцов № 3, № 4, № 5

талла, и их отличие по сравнению с образцом №5, вызванное различной структурой образцов (рис. 6).

Анализ калибровочных зависимостей образцов № 1 – № 5 подтверждает наличие единой калибровочной зависимости для определенной марки стали (в данном случае – ВСтЗсп), которую можно получить с учетом отличия структур металла и наличием остаточных напряжений в различных образцах.

Для валидации разработанной методики исследования МЭБ двухосного НДС рассмотрим поведение параметра интенсивности МШ при нагружении исследуемого образца. Известно, что с увеличением растягивающей нагрузки интенсивность МШ, измеренная в продольном направлении, возрастает, а при измерении в поперечном направлении – падает. При сжатии происходит обратный процесс: параметр интенсивности МШ, измеренный в на-

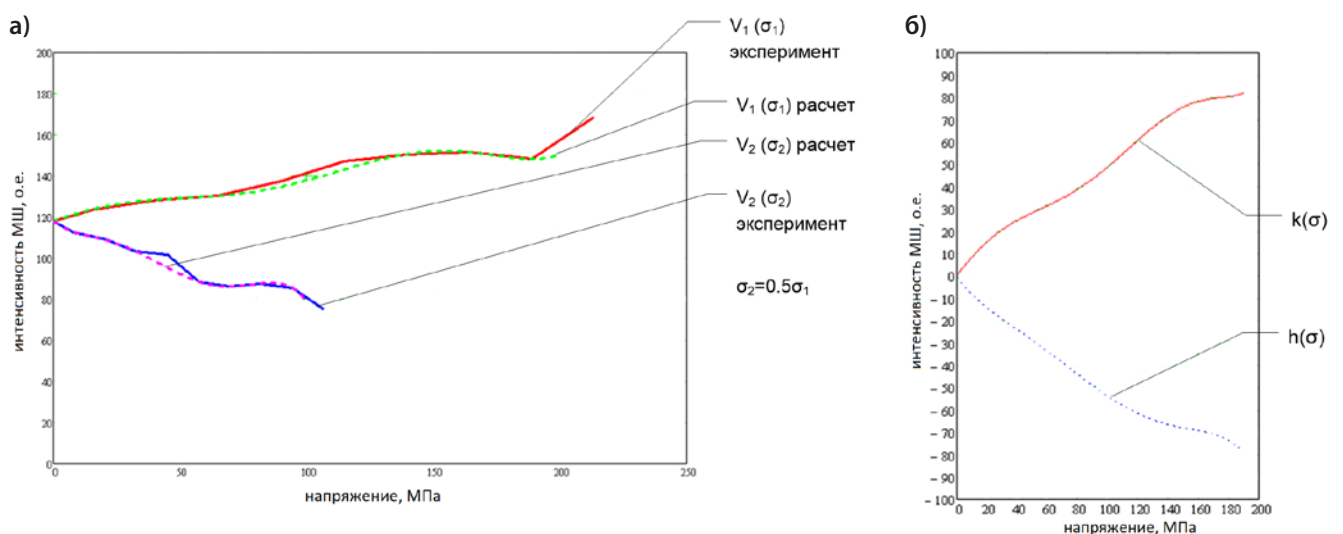
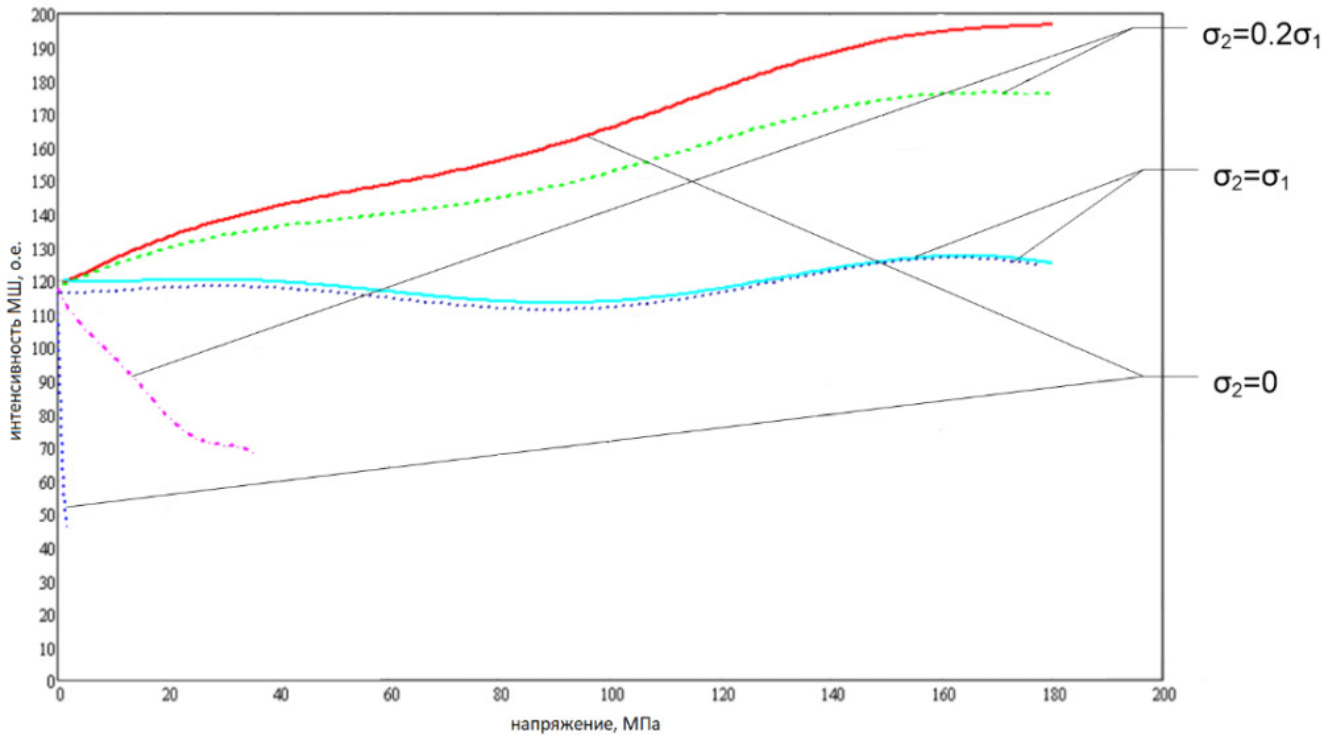


Рис. 7. Зависимости, полученные на образце №1: калибровочная характеристика (а), функции преобразования (б)

Рис. 8. Моделирование калибровочной характеристики при различных σ_1 и σ_2

правлении приложенной нагрузки, уменьшается, а измеренный в поперечном направлении увеличивается [2]. Следовательно, для параметра интенсивности МШ, чувствительного к изменениям напряжения в двух взаимно перпендикулярных направлениях, можно записать

$$\begin{cases} V_1 = k(\sigma_1) + h(\sigma_2) \\ V_2 = k(\sigma_2) + h(\sigma_1) \end{cases} \quad (1)$$

где V_1 – параметр интенсивности МШ, измеренный при расположении ПБ вдоль напряжения σ_1 ;

V_2 – параметр интенсивности МШ, измеренный при расположении ПБ вдоль напряжения σ_2 ;

$k(\sigma)$ – функция преобразования МШ в напряжения σ , направленного вдоль оси ПБ;

$h(\sigma)$ – функция преобразования МШ в напряжения σ , направленного перпендикулярно оси ПБ.

Если предположить, что функции преобразования $k(\sigma)$ и $h(\sigma)$ описывает полином шестой степени, то получается система уравнений, решаемая при количестве уравнений равно $2n + 2$ (n – степень полинома). Таким образом, достаточно минимум $n + 1$ точек измерения для

определения коэффициентов полиномиальных функций преобразования из массива данных $V_{1i}, V_{2i}, \sigma_{1i}, \sigma_{2i}$ для каждой i -ой точки измерения. На рис. 7а представлены экспериментальные и полученные из системы уравнений (1) расчетные зависимости, на рис. 7б – $k(\sigma)$, $h(\sigma)$ – функции преобразования напряжений в МШ.

На приведенных графиках следует отметить следующую особенность – каждая линия имеет 3 участка: участок плавного изменения ($\sigma_1 = 0 \div 130$ МПа), участок насыщения ($\sigma_1 = 130 \div 190$ МПа) и участок пластической деформации ($\sigma_1 > 190$ МПа). Очевидно, что участок насыщения интенсивности МШ начинается одновременно в кольцевом и осевом направлении с определенного значения напряжений, т.е. насыщение определяется результирующим напряжением в месте измерения.

Функции преобразования МШ в напряжение $k(\sigma)$, $h(\sigma)$ в зоне упругой деформации равны по модулю между собой и отличаются в знаке. Поэтому, чем равнозначнее σ_1 и σ_2 , тем меньшее изменение интенсивности МШ от напряжения будет наблюдаться при построении калибровочных характеристик (рис. 8).

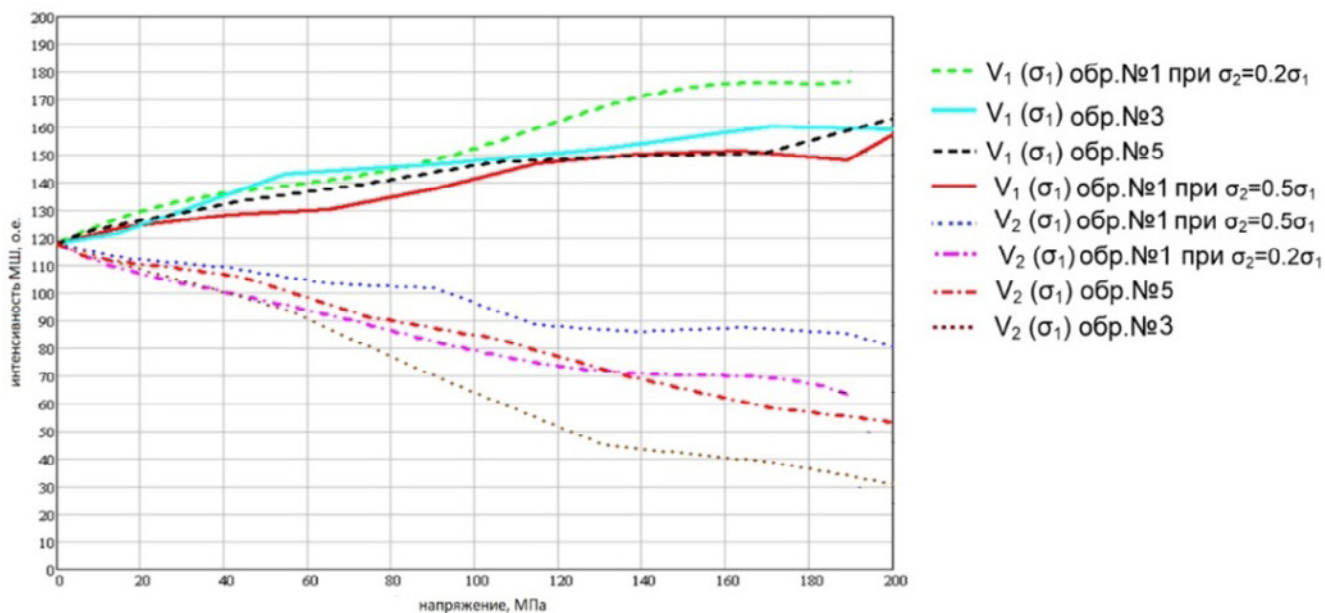


Рис. 9. Калибровочные характеристики плоских образцов и баллона

С другой стороны, при $\sigma_1 = 0$ изменение интенсивности МШ от напряжения σ_1 будет максимальным и отражает одноосную калибровочную зависимость [3]. На практике редко встречается одноосная нагрузка, чаще имеет место двух- или трехосное нагружение. Для достоверного решения задач двухосного нагружения необходимо знать соотношение σ_1/σ_2 .

Построим экспериментальную зависимость параметра интенсивности МШ от приложенного напряжения σ_1 , направленного в направлении приложенной нагрузки, растягивающей плоские образцы № 3 и № 5 (рис. 9). Для сравнения данных, полученных на цилиндрическом образце № 1 и плоских образцах № 3 и № 5, дополним рис. 9 расчетной калибровочной кривой, вычисленной согласно уравнениям (1). Так как возникающее в поперечном направлении (относительно направления растяжения образца) напряжение σ_2 неизвестно, оно устанавливается итерационным методом, что в лучшей степени описывает экспериментальные зависимости.

Сходимость расчетных кривых, полученных на исследуемых образцах № 1, № 3, № 5, наблюдается при соотношении $\sigma_2 \approx 0,2\sigma_1$.

Выводы:

1) методика определения МЭБ двухосного НДС на цилиндрических образцах показала соответствие вычисленных значений напряжений с известными теоретическими соотношениями [1];

2) для каждого образца, изготовленного из одной марки стали (с учетом структурной составляющей и наличия остаточных напряжений), соответствует одна общая калибровочная кривая.

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ по проекту T19MC-013.

Литература

1. Быков Л.И. Мустафин Ф.М., Рафиков С.К. Типовые расчеты при сооружении и ремонте газонефтепроводов: учебное пособие. – Санкт-Петербург: Недра, 2006. – 824 с.
2. Винтов Д.А., Венгринович В.Л., Лапицкая В.А. Учет структурной и геометрической неоднородности поверхности при построении калибровочных характеристик при контроле остаточных напряжений методом эффекта Баркгаузена / Материалы 5-й международной научно-технической конференции «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов», Могилев, 24-25 сентября 2014 г. – С.87-89.
3. Венгринович В.Л. Особенности измерения внутренних напряжений в ферро-магнитных материалах с использованием эффекта Баркгаузена и других магнитных методов / В.Л. Венгринович, Д.А. Винтов, А.Н. Прудников [и др.] // В мире неразрушающего контроля. – 2018. – Том 21, № 1. – С. 5-9.