



Особенности измерения внутренних напряжений в ферромагнитных материалах с использованием эффекта Баркгаузена и других магнитных методов

Представлено исследование, показывающее характер неопределенности результатов измерения напряжения методом эффекта Баркгаузена при разной обработке измеряемой поверхности материала, а также влияние компонентов тензора напряжения на параметры шума Баркгаузена при двухосном нагружении. Показано решающее влияние сдвигового компонента напряжений (деформации) на параметры шума Баркгаузена.

Submitted 20.01.18
Accepted 13.03.18

Сотрудники Государственного учреждения «Институт прикладной физики НАН Беларуси», г. Минск

V.L. Vengrinovich¹, D.A. Vintov¹, A.N. Prudnikov², P.A. Podugolnikov³, V.N. Ryabtsev⁴

Peculiarities of Internal Stress Measurement in Ferromagnetic Materials Using Barkhausen Effect and Other Magnetic Techniques

The transition from non-destructive evaluation of stress to NDT measurement of internal stress tensor components is challenging step considering and compensation of influencing factors during both calibration and measurement steps. The main influencing factors in ferromagnetic steels are material microstructure, self-interaction of principle stress tensor components and surface layers condition. This study shows experimentally the nature of those uncertainties. Some main features of surface treating influence on the stress measurements are considered, and the invariance of the magnetic Barkhausen effect method relatively to any changes of spherical strain/stress tensor component. The Barkhausen noise intensity depends only on the shear stress tensor component and the spherical stress tensor is influenced only by the material microstructure. The disregard of this regularity leads to available uncertainty in stress evaluation via the Barkhausen effect method.

Keywords: internal stress, deformation, surface structure, stress-strain state, Barkhausen noise, calibration curve, 3D-chart

Переход от неразрушающего контроля приложенных и остаточных напряжений к измерению компонентов тензора напряжений является сложным шагом, который предполагает учёт влияющих факторов во время самой калибровки и измерения. Разработаны различные подходы к решению проблемы неопределённости измерения напряжений, основные из которых указаны в [1], но проблема всё ещё является актуальной.

В идеальных материалах с однородной и стабильной структурой измерение напряжения представляет собой простое сравнение между измеренными значениями и калибровочными характеристиками [2, 3]. В реальных материалах этот процесс намного сложнее. К основным факторам, оказывающим влияние на неопределённость измерения

напряжения в ферромагнитных сталях, относятся: микроструктура материала, взаимное влияние основных компонентов тензора напряжений, соотношение глубин информативного слоя метода и состояние поверхностного слоя. Физическая природа этих факторов разнообразна, поэтому они должны быть изучены отдельно. Данная экспериментальная статья обобщает особенности контроля напряжений методом эффекта Баркгаузена (МЭБ), весьма чувствительным к изменению напряжений в ферромагнитных материалах. Рассмотренные особенности, в первую очередь — состояние поверхностного слоя и соотношение между компонентами тензора напряжений, влияют на неопределённость измерения напряжений как на этапе калибровки, так и при измерении.

ВЕНГРИНОВИЧ
Валерий Львович

Зав. лабораторией вычислительной диагностики,
д. т. н., профессор



ВИНТОВ
Дмитрий
Александрович

Научный сотрудник



ПРУДНИКОВ
Андрей Николаевич

Старший преподаватель,
аспирант Государственного учреждения высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет»,
г. Могилёв



ПОДУГОЛЬНИКОВ
Павел Александрович

Инженер, Общество с дополнительной ответственностью «Брандстройпроект», г. Могилёв, аспирант



РЯБЦЕВ
ВЛАДИМИР
НИКОЛАЕВИЧ

Старший преподаватель,
аспирант Белорусского национального технического университета, г. Минск



¹ Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk; veng@iaph.bas-net.by; vintov@iaph.bas-net.by

² State Institution of Higher Professional Education "Belarusian-Russian University", Mogilev, Belarus; prudnikov_pan@gmail.ru

³ "Brandstroyproekt" Ltd, Mogilev, Belarus; yorikyohoho@gmail.com

⁴ Belarusian National Technical University, Minsk; grievs@yandex.ru

1. Влияние состояния поверхности на измерение напряжения с помощью магнитного шума

1.1. Калибровочные характеристики. Экспериментальная техника

Эксперименты по изгибу были выполнены с использованием образцов из листа низколегированной стали размерами 250×40×7,5 мм, поверхность которого была сформирована в процессе холодного проката, толщина поверхностного деформированного слоя составляла примерно 0,1 мм. Таким же образом формируется поверхность большинства элементов листовых конструкций и фасонных профилей.

Образцы упруго изгибались в устройстве для четырёхточечного изгиба [4]. Пошагово (по мере приложения нагрузки) производились измерения магнитного шума (МШ). В результате были построены градуировочные кривые: зависимость интенсивности МШ или шума Баркгаузена (ШБ) от значения напряжения. После каждого цикла измерений производилось снятие поверхностного слоя путём последовательно фрезерования, шлифовки и электролитического травления [5]. Измерения интенсивности МШ производились с помощью магнитошумового анализатора «Интроскан» и преобразователей с глубиной информативного слоя ≈ 0,6÷1,2 мм. Электролитическое травление (ЭЛП) проводилось с помощью специального раствора (65%Н₃РO₄, 15%Н₂SO₄, 20%Н₂O) методом Жаке [6]. Время травления составляло 5 мин., максимальное суммарное время травления 80 мин.

Интенсивность МШ измерялась во взаимно перпендикулярных направлениях. Эти направления совпа-

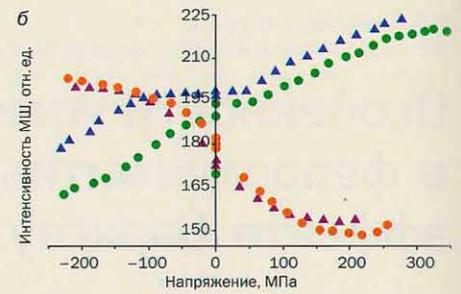
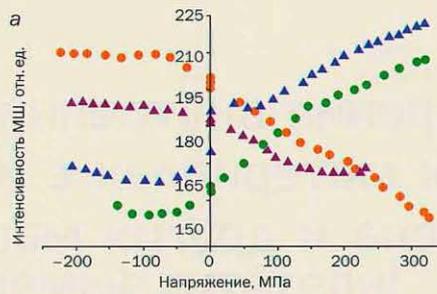


Рис. 1. Градуировочные кривые до (а) и после (б) механического шлифования образца из стали 09Г2С (сторона 1: ▲ — вдоль оси, ▲ — поперёк оси; сторона 2: ● — вдоль оси, ● — поперёк оси)

дали с осями деформации образца. Построенные на одной диаграмме, эти кривые пересекаются в точке, лежащей на оси Y, только в том случае, если поверхность не имеет остаточного напряжения. Смещение означает, что поверхность обладает остаточным напряжением: смещение вправо означает, что остаточное напряжение является напряжением растяжения, влево — сжатия. На рис. 1 приведены примеры градуировочных кривых для стали 09Г2С.

Градуировочные кривые, полученные при различных способах обработки поверхности при измерении в продольном и поперечном направлениях (по отношению к направлению шлифования), представлены на рис. 2. Очевидно смещение градуировочных кривых на каждом этапе послойного снятия материала. Поскольку обычно заранее неизвестно направление остаточных напряжений, связанное с направлением обработки, постольку эти характеристики не могут быть использованы как градуировочные. Функции на рис. 2 монотонные: а — возрастающая, б — убывающая (вследствие эффекта Пуассона).

Если приведённые на рис. 2 кривые наложить друг на друга, то можно

обнаружить некоторую закономерность расположения точек пересечения этих кривых (рис. 3) [5].

Поскольку смещение связано с остаточным напряжением на поверхности, из этого рисунка можно сделать некоторые важные выводы: 1) чем грубее технология удаления слоя материала (больше шероховатость), тем больше происходит смещение соответствующих градуировочных кривых (в нашем случае наиболее грубой была фрезеровка); 2) практически отсутствует смещение градуировочных кривых (что говорит об отсутствии остаточных напряжений на поверхности материала) при ЭЛП в течение 35–50 мин. и более, при этом толщина удалённого слоя составляет более 70 мкм; 3) при дальнейшем удалении слоя металла (более 70 мкм) на поверхности возникает напряжение сжатия, что связано с избыточным травлением материала и изменением его поверхностной структуры.

Можно рассмотреть задачу о минимизации влияния остаточного напряжения на результат измерения. Для этого было предложено собрать все точки пересечения градуировочных кривых

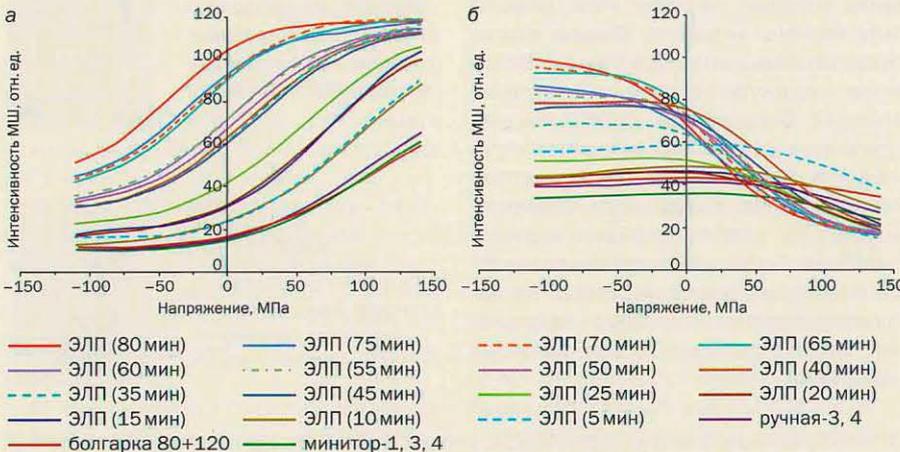


Рис. 2. Градуировочные кривые при различных способах обработки поверхности, полученные при продольном (а) и поперечном (б) (относительно направления механического шлифования) расположении преобразователя Баркгаузена (ПБ)

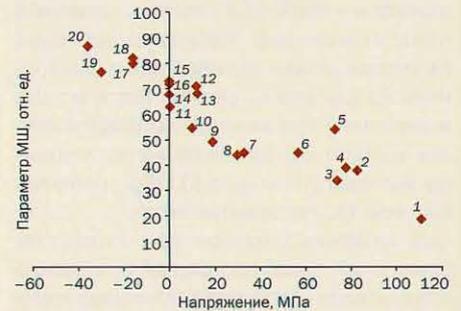


Рис. 3. Влияние способа обработки поверхности образца из стали 17ГС на положение точки пересечения градуировочных кривых: 1 — фрезеровка; 2 — болгарка 80+120; 3 — минитор-1, 3, 4; 4 — ручная-3, 4; 5 — ЭЛП (5 мин); 6 — ЭЛП (10 мин); 7 — ЭЛП (15 мин); 8 — ЭЛП (20 мин); 9 — ЭЛП (25 мин); 10 — ЭЛП (30 мин); 11 — ЭЛП (35 мин); 12 — ЭЛП (40 мин); 13 — ЭЛП (45 мин); 14 — ЭЛП (50 мин); 15 — ЭЛП (55 мин); 16 — ЭЛП (60 мин); 17 — ЭЛП (65 мин); 18 — ЭЛП (70 мин); 19 — ЭЛП (75 мин); 20 — ЭЛП (80 мин)

в одну точку, расположенную на оси Y, с целью получения функции, инвариантной к типу обработки поверхности. Результат такого наложения показан на рис. 4, из которого следует, что кривые, полученные ЭЛП, близки друг к другу и подобны между собой по форме, что можно считать характерным при отсутствии остаточных напряжений в поверхностном слое. Важно отметить, что результаты, представленные на рис. 4, были получены путем специальной математической обработки измеренного сигнала МШ для каждой градуировочной кривой:

$$V_{\parallel}^1 = V_{\parallel} / (V_{\parallel} + V_{\perp}); \quad (1)$$

$$V_{\perp}^1 = V_{\perp} / (V_{\parallel} + V_{\perp}). \quad (2)$$

1.2. Оценка погрешности измерения напряжения из-за различия поверхностной обработки

Для оценки погрешности измерения напряжения использовалось сравнение с традиционным методом тензодатчиков при деформации образца в разрывной машине. Тензодатчики наклеивались на противоположной стороне образца, а продольная приложенная сила определялась с помощью разрывной машины. Образец нагружался ступенчато. Напряжение одновременно вычислялось по измеренным показаниям разрывной машины и тензодатчиков, а также определялось по значениям интенсивности МШ, пересчитанным в напряжение с использованием градуировочных кривых, приведённых на рис. 4. Результаты измерения для образцов № 1 и № 2 показаны в табл. 1 и 2 соответственно [5] и на рис. 5.

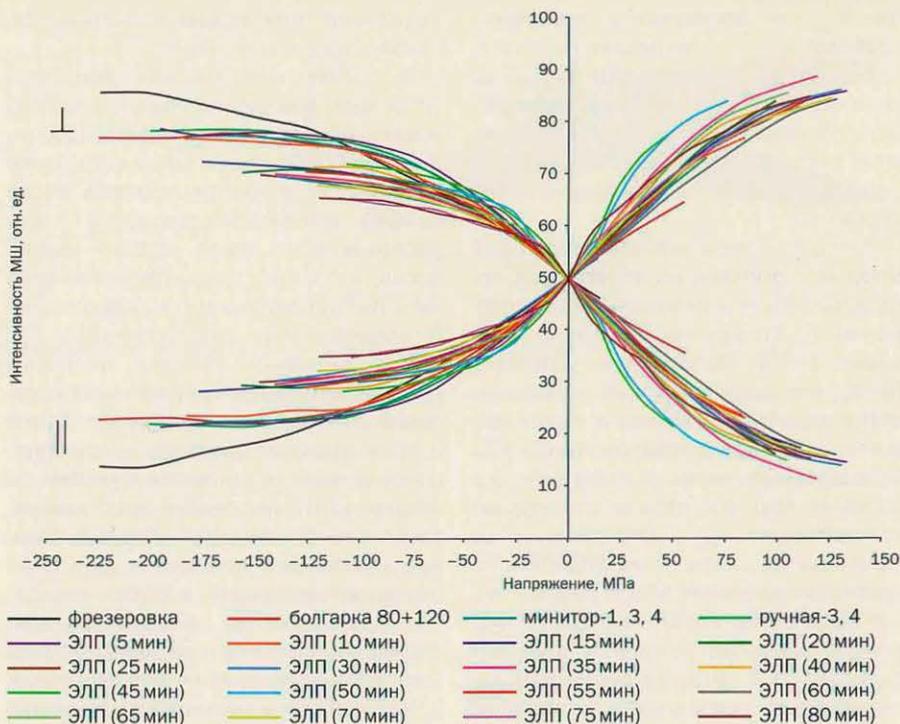


Рис. 4. Семейства градуировочных кривых, точки пересечения которых при разных обработках поверхности совмещены в одну точку на оси Y

Из представленных графиков видно, что относительная погрешность измерения напряжения с помощью разрывной машины и тензодатчиков составляет менее 2%, в то время как погрешность измерения МЭБ лежит в пределах от 10 до 25% с минимальным значением в диапазоне напряжений от 87 до 174 МПа.

Для оценки погрешности измерения напряжения МЭБ было проведено отдельное исследование. В качестве образца использовали трубу диаметром 1000 мм, на поверхности которой были

подготовлены 12 локальных зон измерения. Основная погрешность измерения напряжения МЭБ определялась по формуле (3)

$$\delta_{\text{мш}} = (\delta_{\text{приб}}^2 + \delta_{\text{струк}}^2 + \delta_{\text{уст}}^2)^{1/2}, \quad (3)$$

Табл. 1. Результаты измерения напряжения на образце № 1

№	Разрывная машина		Тензостанция	Магнитошумовой анализатор ИНТРОСКАН		
	P, кН	σ, МПа	σ, МПа	МШ	МШ ⊥	σ, МПа
0	0	0	0	43,3	36,0	20,00
1	10	43,67	43,75	50,0	35,0	40,00
2	20	87,34	86,75	61,0	30,7	83,00
3	30	131,00	129,90	77,3	25,0	132,00
4	40	174,67	172,90	92,3	19,7	175,00
5	50	218,34	216,00	98,0	17,0	200,00
6	60	262,01	259,60	111,0	15,3	230,00

Табл. 2. Результаты измерения напряжения на образце № 2

№	Разрывная машина		Тензостанция	Магнитошумовой анализатор ИНТРОСКАН		
	P, кН	σ, МПа	σ, МПа	МШ	МШ ⊥	σ, МПа
0	0	0	0	48,0	47,3	0
1	10	43,67	45,95	71,3	37,0	77
2	20	87,34	90,15	83,0	32,7	109
3	30	131,00	134,30	95,3	28,0	140
4	40	174,67	178,50	108,0	22,3	183
5	50	218,34	222,40	115,0	20,0	200
6	60	262,01	268,70	122,0	16,7	235

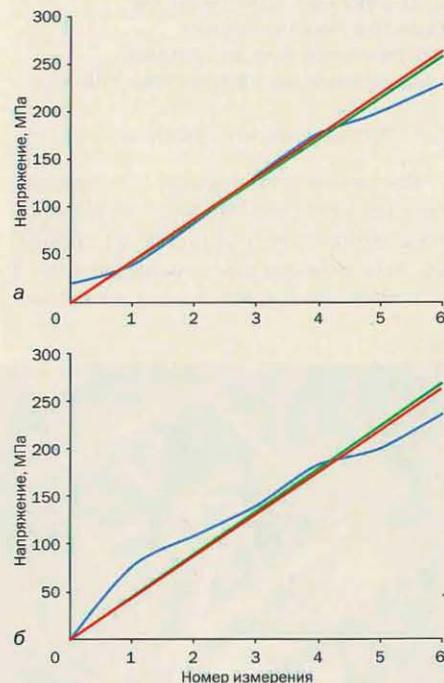


Рис. 5. Графическое представление данных по результатам измерения напряжения на образцах № 1 (а) и № 2 (б) с использованием разрывной машины (—), тензометрических датчиков (—) и МЭБ (—)

где $\delta_{\text{приб}}$ — погрешность измерения прибора; $\delta_{\text{структ}}$ — погрешность, возникающая при измерении МШ на разных участках образца; $\delta_{\text{уст}}$ — погрешность, обусловленная невоспроизводимостью мест установки преобразователя Баркгаузена (ПБ) на исследуемой поверхности.

Здесь $\delta_{\text{приб}}$ представляло собой относительное отклонение измеряемых показаний МШ при неизменном расположении ПБ. Её величина составила примерно 1–2%. Погрешность установки ПБ $\delta_{\text{уст}}$ определялась путём измерения МШ в одной и той же точке на поверхности материала с отрывом ПБ (2–5%). Основную же часть погрешности измерения МШ составляла структурная составляющая $\delta_{\text{структ}}$. Определение её величины осуществляется путём многократного измерения МШ в разных точках выделенных локальных зон. Её численное значение лежало в пределах от 17 до 26%. В итоге суммарная составляющая погрешности измерения МШ составила 20–33%. Следует отметить, что параметры сигнала МШ обладают высокой чувствительностью как к внешним (например, температура), так и внутренним факторам (например, уровень содержания углерода в стали). Это влияние не было учтено в приведённой оценке погрешностей.

2. О влиянии компонентов тензора механических напряжений при двухосном нагружении на параметры МШ

2.1. Постановка эксперимента

Основным принципом экспериментальной методики является нагружение крестообразных образцов во взаимно перпендикулярных направлениях Y и X . Реализация этого принципа стала

возможной при создании устройства, показанного на рис. 6а.

В основу классической двухосной установки обычно полагают передачу усилия образцу с помощью гидроцилиндров [7]. Однако в таком устройстве напряжение в центре образца после каждой ступенчатой нагрузки перераспределяется из-за условия равновесия, и поэтому здесь трудно обеспечить требуемые значения деформации. В предлагаемом устройстве (рис. 6а) при приложении нагрузки величины деформаций, заданных нагрузкой в другом направлении, сохраняются. Также к преимуществу представленной двухосной установки относится способность обеспечивать напряжённо-деформированное состояние (НДС) образца, близкое к реальным условиям в двухосных оболочках, например, в трубах, сосудах под давлением, в оболочечных конструкциях и т. д., в которых приложенная нагрузка не вызывает больших изменений формы и размеров. Устройство с гидроцилиндрами, наоборот, предполагает, что для обеспечения условия равновесия объект может изменить свою геометрию [8].

Используемый в исследовании крестообразный образец показан на рис. 6б. Его форма обоснована тем, что при нагружении в центральной его части возникают наиболее однородное НДС (рис. 7) [9]. На поверхности данного образца, противоположной измеряемой, наклеены 6 тензодатчиков (4 крайних из которых используются для контроля равномерности создаваемой нагрузки, а 2 центральных — для снятия показаний деформации по осям X и Y).

Крестообразный образец крепится в устройстве четырьмя штифтами и нагружается четырьмя тяговыми винтами. Сначала образец деформируется вдоль

оси Y при одновременной работе двух противоположно расположенных тяговых винтов, при этом обеспечивается равенство показаний в четырёх крайних тензодатчиках соответственно. После этого происходит деформация образца в направлении X (положение краёв образца по оси Y сохраняется). Показания периферийных датчиков также выравниваются попарно. Снимаются показания с центральных тензодатчиков в направлениях X и Y соответственно. На стороне, обратной наклеенным тензодатчикам, производится измерение интенсивности МШ по осям X и Y с помощью прибора «Интроскан». Далее нагружение по оси X продолжается до тех пор, пока не будет достигнут предел упругости образца. Затем образец в направлении X разгружается и даётся небольшая нагрузка в направлении Y , и вся процедура повторяется до тех пор, пока нагрузка в направлении Y не достигнет предела упругости [10].

По результатам измерения в трёхмерном пространстве строятся поверхности. На рис. 8 они представлены для стали 09Г2С.

Значения напряжения в мегапаскалях находятся по величинам деформации образца, подставленным в систему уравнений:

$$\sigma_1 = E\varepsilon_1 + \lambda\sigma_2; \quad (4)$$

$$\sigma_2 = E\varepsilon_2 + \lambda\sigma_1, \quad (5)$$

где σ_1 , σ_2 , ε_1 и ε_2 — значения напряжений и деформаций по осям X и Y соответственно, λ — коэффициент Пуассона, E — модуль Юнга.

По построенным 3D-графикам можно сделать следующие важные выводы:

1. Линия пересечения двух поверхностей соответствует равенству x и y значений взаимно перпендикулярных деформаций. Такое явление можно назвать

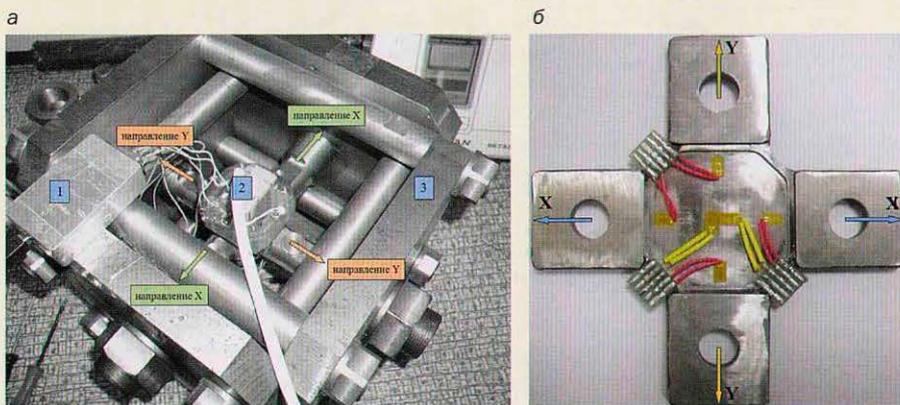


Рис. 6. Двухосная установка для растяжения крестообразного образца (а): 1 — тензометрическая станция; 2 — преобразователь Баркгаузена на передней панели образца; 3 — установка для создания двухосной нагрузки. Тензодатчики, наклеенные на задней панели образца (б)

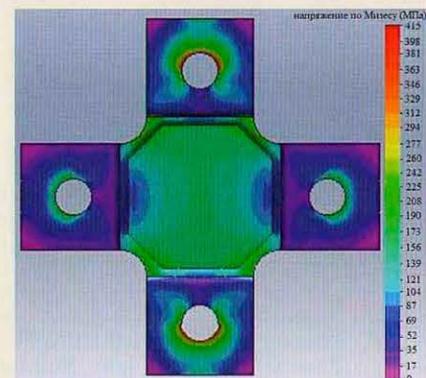


Рис. 7. Обоснование (расчёт методом конечных элементов формы крестообразного образца (центральная область однородного распределения напряжения))

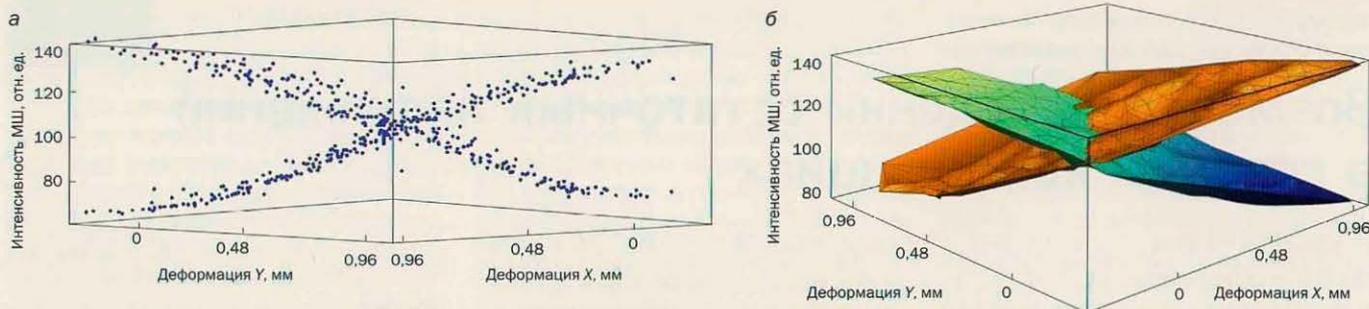


Рис. 8. 3D-график зависимости интенсивности МШ от деформации по осям X и Y: а — экспериментальные данные; б — сплайн аппроксимация

условием симметричной деформации, $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy}$. Следует отметить, что при нагрузке образца с соблюдением данного условия величина интенсивности МШ сохраняется приблизительно постоянной (в пределах погрешности эксперимента, примерно, 8%). Экспериментальная линия пересечения и её линейная аппроксимация, спроецированная на плоскость XY кривой, показаны на рис. 9.

Если предположить пренебрежительно малой деформацию образца в Z-направлении при двухосном нагружении, то можно допустить сохранение на этой кривой постоянства величин обеих главных компонент интенсивности МШ при симметричной (изотропной) деформации (напряжении), которая является частью тензора деформации:

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

где $\varepsilon_s = (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz})/3$ — гидростатическая сферическая (дилатационная) тензорная составляющая тензора деформации; τ_{ij} — девиаторная (сдвиговая) составляющая.

Линия пересечения двух поверхностей (рис. 9) имеет, как видно, угол наклона к осям примерно 45° (так называемая «гидростатическая или дилатационная ось»), что соответствует условию равенства обоих главных

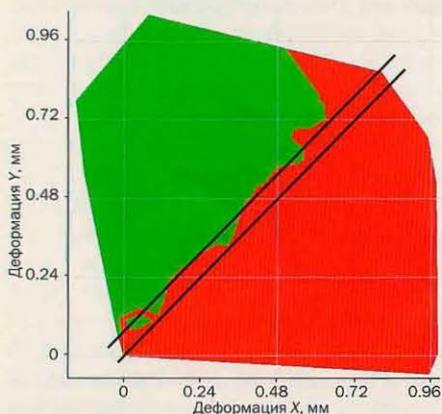


Рис. 9. Проекция на плоскость XY линии пересечения двух поверхностей и её линейная аппроксимация

компонентов тензора напряжений ε_{xx} и ε_{yy} . Представленный график показывает, что величина интенсивности МШ на кривой пересечения остаётся неизменной, это эквивалентно утверждению, что значение МШ остаётся равным при гидростатическом растяжении или сжатии. Это высказывание получило подтверждение в других экспериментах и представляется очень важным для оценки напряжения (деформации) различными магнитными методами.

Инвариантность этой величины по отношению к величинам напряжений говорит о её исключительной зависимости от структуры материала, т.е. она является структурной составляющей МШ. Такое предположение было сделано ранее в [3], и наши эксперименты подтверждают его достаточно однозначно.

Единственная неопределённость такого вывода заключается в упомянутом ранее 8-процентном росте уровня интенсивности МШ. Была проведена проверка этой неопределённости при двухосной деформации (компонент $\sigma_{zz} = 0$). Такой анализ был сделан методом конечных элементов: расчёт изменения деформации ε_{zz} при двухосном нагружении. Предполагалось, что наблюдаемый 8-процентный рост интенсивности МШ при увеличении напряжения от 0 до $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = 200$ МПа может быть результатом утонения образца. Моделирование методом конечных элементов показало, что при отсутствии третьего компонента тензора напряжений толщина образца уменьшилась примерно на 8%.

2. Дальнейший анализ показывает, что использование одной из построенных градуировочных поверхностей для определения главного значения упругой деформации (напряжения) путём измерения уровня интенсивности МШ в материале при двухосном напряжении недостаточно. Ошибка возможна даже в знаке. Необходимо учитывать обязательно соотношение между компонентами деформации, т.е. соотношения (4) и (5). Эти эксперименты и их

анализ дают основания к пересмотру основных концепций градуировки и измерения напряжений магнитными методами. В дальнейшем мы представим такую концепцию.

Литература

1. Residual Stress Measurement and General Nondestructive Evaluation/ASME Publications, 2001. — 128 p.
2. Ostrivnoi A. F., Ivanov S. Y., Vengrinovich V. L., Tsukerman V. L. Mechanical stress reference device and transition from stress non-destructive evaluation to its measurement. — Testing, Diagnostics. 2011. No. 6. P. 44–51.
3. Sablik M. J. Modeling the Effects of Biaxial Stress on Magnetic Properties of Steels with Application to Biaxial Stress NDE. — Nondestructive Testing and Evaluation. 1995. V. 12. No. 2. P. 87–102.
4. Венгринович В.Л., Дмитриевич Д.В. Портативное устройство для испытания и калибровки средств неразрушающего контроля напряженно-деформированного состояния./Патент на полезную модель 3957, Республики Беларусь № и 20070154. — Афіцыйны бюл./Нац. Цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2007. № 5. С. 219–220.
5. Винтов Д.А., Венгринович В.Л., Лапцкая В.А. Учет структурной и геометрической неоднородности поверхности при построении калибровочных характеристик при контроле остаточных напряжений методом эффекта Баркгаузена. — В кн: Материалы 5-й Международной науч.-техн. конф. «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов». — Могилев: 2014, с. 87–89.
6. Жаке П. Электрохимическое и химическое пилирование. — М.: Металлургия, 1959. — 78 с.
7. Vengrinovich V., Dmitrovich D. Bayesian approach to NDT of stress state. — J. of Tech. Diagnostics and NDT. 2008. No. 4. P. 23–33.
8. V. Vengrinovich, D. Vintov, A. Prudnikov et al. Advance in Stress Measurement via Barkhausen Noise. — In: 19th WCNDT/Book of Abstracts. — Munich (Germany): 2016, p. 44–45.
9. Венгринович В.Л., Винтов Д.А., Прудников А.Н. и др. Особенности измерения напряжений в ферромагнетиках методом эффекта Баркгаузена. — Контроль. Диагностика. 2017. № 8. С. 10–17.
10. Vengrinovich V., Vintov D., Prudnikov A. et al. Interaction of magnetic domain structure and internal stress in ferromagnetic materials under bi-axial loading. — Actual Problems of Solid State Physics: Proc. Intern. Sci. Conf. — Minsk, 2016, v. 1, p. 45–47.

Статья получена 20 января 2018 г., в окончательной редакции — 13 марта