

А. М. ПОВОЛОЦКАЯ^{1,2}, канд. техн. наук

А. Н. МУШНИКОВ², канд. техн. наук

К. Д. МАЛЫГИНА²

Л. С. ГОРУЛЕВА²

¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН (Екатеринбург, Россия)

²Институт машиноведения им. Э.С. Горкунова УрО РАН (Екатеринбург, Россия)

ЭВОЛЮЦИЯ МАГНИТНЫХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАСТАБИЛЬНОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ ПРИ ДВУХОСНОМ РАСТЯЖЕНИИ

Аннотация. В работе представлены экспериментальные результаты эволюции гистерезисных магнитных характеристик, параметров магнитных шумов Баркгаузена и электромагнитных параметров метастабильной аустенитной стали AISI 304 при двухосном симметричном растяжении. Исследования проведены на оригинальной двухосной испытательной машине, предназначенной для определения физических свойств материалов в процессе упругопластического деформирования независимо по двум осям.

Ключевые слова: двухосное симметричное растяжение, метастабильная аустенитная сталь, магнитные и электромагнитные характеристики.

Одним из ключевых направлений неразрушающего контроля является разработка надежных методов оценки напряженно-деформированного состояния элементов металлоконструкций. При этом активное применение находят магнитные методы контроля, которые основаны на установлении взаимосвязи между магнитными свойствами материалов и параметрами их напряженного состояния. В конструкциях ответственного назначения, к которым предъявляются повышенные требования к эксплуатационным характеристикам, широко используются аустенитные стали. В результате механических нагрузок в аустенитных сталях с метастабильной структурой может формироваться мартенсит деформации. Это может значительно влиять на эксплуатационные характеристики конструкций и их остаточный ресурс. В литературе достаточно полно представлены экспериментальные результаты эволюции магнитных характеристик аустенитных сталей в условиях деформационных воздействий [1-5], однако работы, в которых внимание было бы сосредоточено на рассмотрении данного вопроса при двухосном растяжении, отсутствуют. В связи с этим представляет интерес изучение влияния упругопластического деформирования по схеме двухосного растяжения на магнитные и электромагнитные характеристики метастабильной аустенитной стали с целью определения связи магнитных характеристик с величиной пластической деформации, которой был подвергнут материал.

Объектом исследования были листы аустенитной стали AISI 304, толщиной 2 мм в состоянии поставки. В исходном состоянии сталь

парамагнитна. Для определения механических свойств материала был изготовлен разрывной образец. На нем были проведены испытания в соответствии с ГОСТ 1497-2023 на гидравлической испытательной машине Tinius Olsen Super L-60. Условный предел текучести исследованного материала равен 320 МПа, временное сопротивление – 730 МПа, относительное удлинение при разрыве – 56 %.

Для исследований по схеме двухосного растяжения были изготовлены крестообразные образцы. Испытания на двухосное деформирование проводили на оригинальной двухосной машине [6]. Фотография рабочей зоны испытательного стенда с установленным крестообразным образцом из стали AISI 304 представлена на рис. 1. При помощи видеоэкстензометра рассчитывали компоненты тензора деформаций в центральной зоне образца.

Для измерения петель магнитного гистерезиса и начальной кривой намагничивания использовали приставное магнитное устройство (ПМУ) в виде П-образного электромагнита с измерительными катушками напряженности магнитного поля и магнитной индукции. Полюса электромагнита имели сечение 16×4 мм, межполюсное расстояние составляло 8 мм. Указанные габариты позволяли устанавливать ПМУ в центральной части крестообразного образца и обеспечивали промагничивание по всей толщине. Намагничивающая и измерительные катушки ПМУ были подключены к источнику стабилизированного постоянного тока и флюксметрам EF-5 магнитноизмерительного комплекса REMAGRAPH C-500. Частота изменения магнитного поля составляла 0,03 Гц.

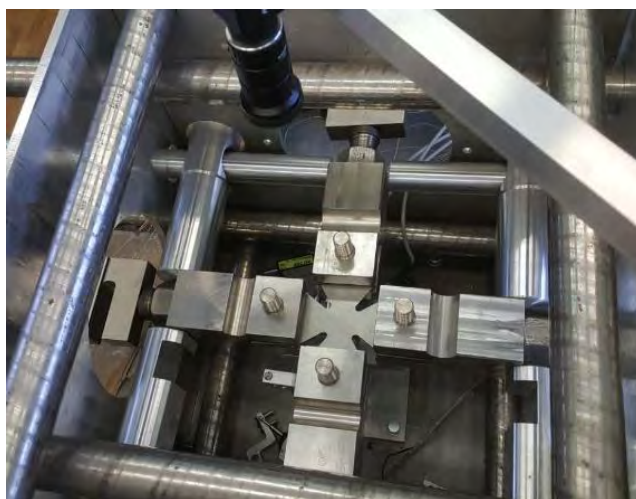


Рис. 1. Фотография рабочей зоны двухосной испытательной машины с установленным крестообразным образцом из стали AISI 304

Параметры МШБ: среднеквадратичное значение напряжений магнитных шумов Баркгаузена RMS и число скачков Баркгаузена N за цикл перемагничивания в переменном магнитном поле определяли с использованием анализатора магнитных шумов Баркгаузена (МШБ) MICROSCAN 600. Первичным преобразователем служил накладной датчик с сечением полюсов

9×8 мм и расстоянием между полюсами 9 мм. Амплитуда напряжения питания первичных преобразователей анализатора составляла 5 В, частота перемагничивания – 95 Гц.

Амплитуду вихрекового сигнала A определяли с помощью вихрекового дефектоскопа «Вектор». Измерения осуществляли при различных частотах возбуждения вихрекового преобразователя: 10, 25, 50 и 100 кГц. При каждой частоте параметр A вихрекового сигнала определяли как среднее арифметическое значение результатов по пяти измерениям.

Измерения всех вышеперечисленных характеристик проводили в центральной зоне крестообразного образца после каждого этапа нагружения до определенной величины пластической деформации и последующей разгрузки. При этом измерения магнитных характеристик и параметров МШБ с применением приставных магнитных устройств осуществляли в двух направлениях, размещая преобразователь вдоль каждой из осей нагружения (осей x и y).

Результаты исследований, проведенных с использованием ПМУ в условиях двухосного растяжения, при расположении накладного преобразователя как вдоль оси растяжения x , так и вдоль второй оси y , представлены на рис. 2.

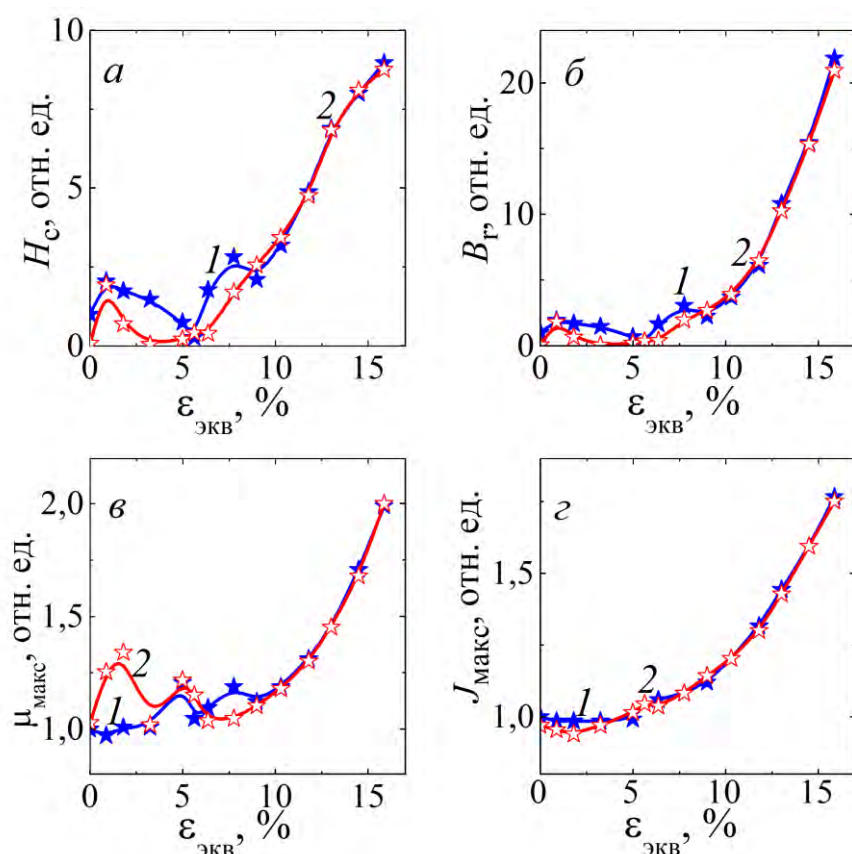


Рис. 2. Зависимости от степени деформации $\varepsilon_{\text{ЭКВ}}$ значений H_c (а), B_r (б), μ_{max} (в) и J_{max} (г), приведенных к значениям, измеренным в исходном состоянии вдоль оси x . Кривые 1 – измерения вдоль оси x , 2 – вдоль оси y

Можно наблюдать проявление изотропии магнитных параметров, измеренных в разных направлениях. Все представленные на рис. 2 магнитные характеристики (коэрцитивная сила H_c , остаточная индукция B_r , максимальная магнитная проницаемость $\mu_{\text{макс}}$ и намагниченность в максимальном приложенном магнитном поле $J_{\text{макс}}$) демонстрируют монотонное увеличение при степени деформации, большей 7,5 %, что обусловлено увеличением объемной доли ферромагнитной фазы.

На рис. 3 приведены зависимости параметров МШБ от степени пластической деформации при двухосном деформировании растяжением. Как видно из рис. 3, кривые зависимостей среднеквадратичного значения напряжений RMS и числа скачков Баркгаузена N имеют качественно одинаковый характер изменения при измерениях в двух различных направлениях. При степени деформации $\varepsilon_{\text{ЭКВ}} > 10$ %, наблюдается монотонное увеличение RMS, при этом зависимость $N(\varepsilon_{\text{ЭКВ}})$, наоборот, монотонно убывает. Такое поведение параметров МШБ обусловлено тем, что происходит увеличение объемной доли α' -мартенсита, сопровождающееся ростом линейных размеров доменов. Соответственно, число доменных границ уменьшается, это приводит к росту среднеквадратичного значения напряжений МШБ и уменьшению числа скачков Баркгаузена.

На рис. 4 представлены зависимости показателя вихретокового прибора (амплитуды A) от степени деформации при двухосном растяжении исследуемой стали. Видно, что при $\varepsilon_{\text{ЭКВ}} > 7,5$ % наблюдается однозначная корреляция между амплитудой вихретокового сигнала и степенью деформации: по мере увеличения содержания ферромагнитной фазы амплитуда A монотонно растет. Можно отметить, что чувствительность амплитуды к степени деформации различна при изменении частоты возбуждения вихретокового преобразователя. Амплитуду сигнала вихретокового прибора можно использовать в качестве информативного параметра для оценки степени деформации, превышающей 7,5 %.

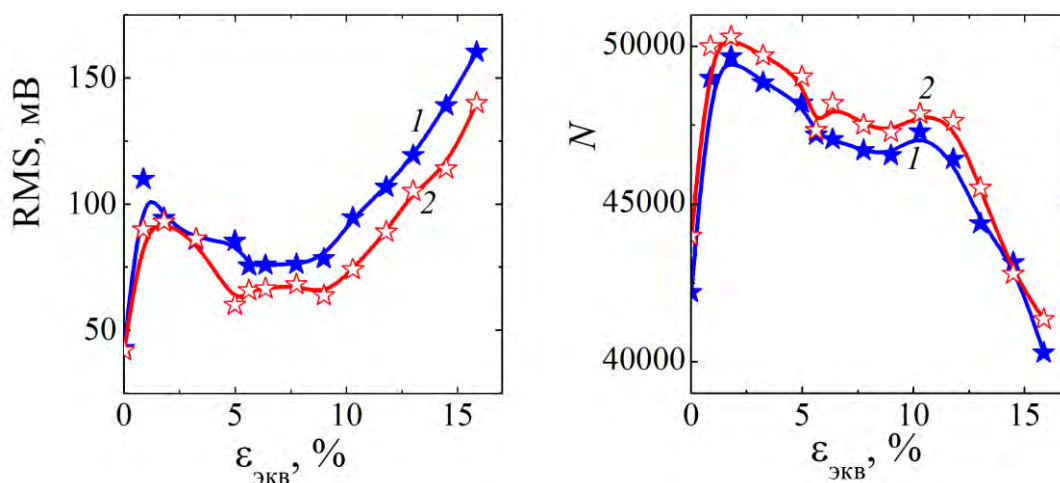


Рис. 3. Зависимости от степени деформации $\varepsilon_{\text{ЭКВ}}$ параметров магнитных шумов Баркгаузена (RMS (a) и число скачков Баркгаузена N (б)). Кривые 1 – измерения вдоль оси x , 2 – вдоль оси y

Таким образом, результаты исследования магнитных характеристик и параметров шумов Баркгаузена метастабильной аустенитной стали AISI 304 при двухосном симметричном растяжении, измеренных в направлениях обеих осей приложения нагрузки, продемонстрировали качественно схожий характер их изменений с ростом степени эквивалентной деформации.

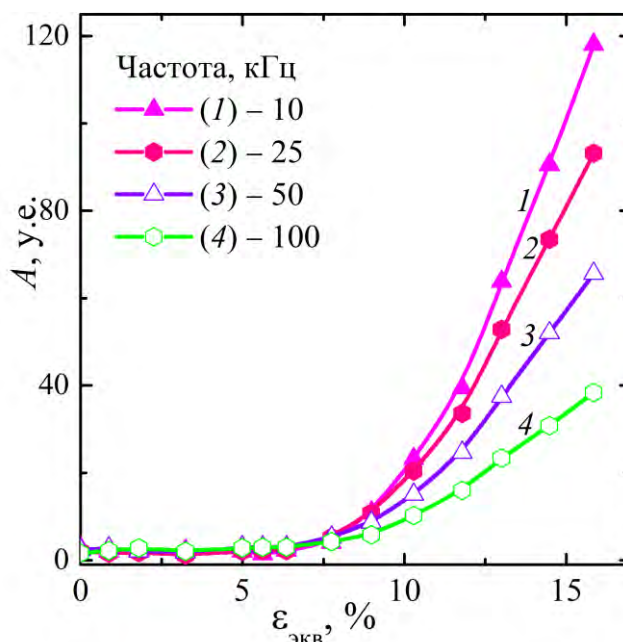


Рис. 4. Зависимости амплитуды A вихретокового сигнала образца от степени деформации $\varepsilon_{\text{экв}}$ на различных частотах возбуждения электромагнитного поля

Установлено, что такие характеристики, как коэрцитивная сила, максимальная магнитная проницаемость, остаточная индукция, максимальная намагниченность, параметры магнитных шумов Баркгаузена, а также амплитуда вихретокового сигнала образцов исследованной стали монотонно увеличиваются при степени эквивалентной деформации, превышающей 7,5-10 %, что связано с образованием мартенсита деформации и увеличением количества этой фазы.

Показано, что амплитуда вихретокового сигнала в сравнении с другими исследованными характеристиками обладает наибольшей чувствительностью к деформациям, превышающим 7,5 %.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН и ИМАШ УрО РАН.

Список литературы

1. Determination of the phase composition of a carbon steel – austenitic stainless steel bimetallic joint based on magnetic properties / M.V. Lapin, A.N. Mushnikov, A.M. Povolotskaya, N.A. Davydova, L.S. Goruleva, N.N. Soboleva // Frontier Materials & Technologie. 2025. № 4. P. 39–49.

2. Martensitic transformation due to plastic deformation and magnetic properties in SUS 304 stainless steel / S. Takahashi, J. Echigoya, T. Ueda, X. Li, H. Hatafuku // Journal of Materials Processing Technology. 2001. V. 108. Iss. 2. P. 213–216.

3. Mishakin V.V., Klyushnikov V.A. Study of a welded joint of 12Kh18N10T steel using acoustic and magnetic methods // Inorganic Materials. 2018. V. 54. No. 15. P. 1498–1502.

4. Influence of Plastic Deformation and Fatigue Damage on Electromagnetic Properties of 304 Austenitic Stainless Steel / S. Xie, L. Wu, Z. Tong, H.-E. Chen, Z. Chen, T. Uchimoto, T. Takagi // IEEE Transactions on Magnetics. 2018. V. 54. Iss. 8. Art. no. 6201710.

5. Vértesy G. Nondestructive indication of plastic deformation of cold-rolled stainless steel by magnetic minor hysteresis loops measurement / G. Vértesy, I. Mészáros, I. Tomáš // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2005. V. 285. Iss. 3. P. 335–342.

6. Влияние двухосного симметричного растяжения на магнитные свойства составного образца из двух стальных пластин с различными механическими и магнитными свойствами / А.Н. Мушников, А.М. Поволоцкая, С.М. Задворкин, К.Д. Крючева // Дефектоскопия. 2024. Т. 60. № 9. С. 25–39.

Контакты:

povolotskaya@imp.uran.ru (Поволоцкая Анна Моисеевна);

mushnikov@imach.uran.ru (Мушников Александр Николаевич);

kristina.kryucheva@mail.ru (Малыгина Кристина Денисовна);

sherlarisa@mail.ru (Горулева Лариса Сергеевна)

УДК 621.372.8:535.8

Д. В. ПОНКРАТОВ¹

А. Б. СОТСКИЙ¹, *д-р физ.-мат. наук, проф.*

Л. И. СОТСКАЯ², *канд. физ.-мат. наук, доц.*

¹Могилевский государственный университет им. А.А. Кулешова (Могилев, Беларусь)

²Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ИЗГИБНЫЕ ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ МОД ОТКРЫТЫХ ВОЛНОВОДОВ КОАКСИАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ

Аннотация. Разработан метод расчета изгибных потерь энергии мод планарных диэлектрических волноводов коаксиальной геометрии. Сформулированы дисперсионные уравнения для мод *s*- и *p*-поляризации на участке изгиба волновода. Установлено, что потери *s*-поляризованной моды на изгибе коаксиального волновода в 28 раз ниже, чем у однослойного волновода. В частности, на рабочей частоте 0.3 ТГц коаксиальный волновод обеспечивает приемлемые изгибные потери энергии при радиусе его изгиба 20 мм, что для стандартных однослойных волноводов недостижимо.

Ключевые слова: коаксиальный диэлектрический волновод, терагерцовое излучение, дисперсионное уравнение, изгибные потери энергии, неразрушающий контроль.

Введение. Электромагнитное излучение терагерцового диапазона частот (0,1–10 ТГц) находит применение при обнаружении расслоений в полимерных и композитных изделиях, измерении толщины покрытий, эндоскопической диагностики труднодоступных полостей [1, 2]. Одним из ключевых элементов