

В статті представлені температурні і магнітопружні характеристики сталі 13CrMo4-5, отримані в результаті досліджень впливу температури і напружень на сердечники, які попередньо були під впливом step-cooling test. Наведена методика досліджень, а також описано розроблене обладнання. Результати досліджень показали незначний вплив температури на досліджувані характеристики, а напруження розтягнення створило значні зміни характеристик

Ключові слова: неруйнівний контроль, магнітопружні характеристики, ферромагнітна конструкційна сталь, вимірювання напружень, температурні характеристики

В статье представлены температурные и магнитоупругие характеристики стали 13CrMo4-5, полученные в результате исследований влияния температуры и напряжений на сердечники, предварительно подвергнутые step-cooling test. Приведена методика исследований, а также описано разработанное оборудование. Результаты исследований показали незначительное влияние температуры на исследуемые характеристики, а растягивающие напряжения привели к значительным изменениям характеристик

Ключевые слова: неразрушающий контроль, магнитоупругие характеристики, ферромагнитная конструкционная сталь, измерения напряжений, температурные характеристики

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА МАГНИТОУПРУГИЕ СВОЙСТВА СЕРДЕЧНИКОВ ИЗ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ

М. Л. Кахняж

Аспирант*

E-mail: m.kachniarz@mchtr.pw.edu.pl

Р. Ю. Шевчик

Доктор технических наук, професор*

E-mail: r.szewczyk@mchtr.pw.edu.pl

А. В. Беньковски

Доктор технических наук, професор*

E-mail: a.bienkowski@mchtr.pw.edu.pl

И. В. Коробийчук

Кандидат технических наук, доцент**

E-mail: ikorobiichuk@piar.pl

*Институт метрологии и биомедицинской инженерии
Варшавский технологический университет
ул. Боболи, 8, г. Варшава, Польша, 02-525

**Промышленный институт автоматики и измерений
ул. Йерозолимска, 202, г. Варшава, Польша, 02-486

1. Введение

Из соображений безопасности и надежности стальных конструкций необходимо периодически проводить исследования для выявления негативных изменений в структуре материала. В связи с сокращением дополнительных затрат, желательнее, чтобы исследования проводились с помощью методов неразрушающего контроля [1]. Среди них, наиболее интересными являются те, которые основаны на магнитоупругом явлении Вилларего, который заключается в изменении магнитного состояния материала, вызванного напряжениями. Методы, основанные на этом явлении, не нашли широкого применения в промышленности. Основной причиной этого является недостаток знаний о магнитоупругих характеристиках различных видов стали, которые позволили бы оценить состояние материала путем измерения магнитных параметров.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В работе [1] представлено обзор и преимущества современных методов неразрушающего контроля, которые легли в основу для начала поиска новых методов диагностики ферромагнитных материалов [2]. В работах [3–5] описываются явления в ферромагнитных магнитоупругих аморфных материалах [6]. Представленные в них методики измерения были адаптированы для нужд исследования свойств магнитоупругих конструкционных сталей. В работах [7–9] исследовались проблемы использования явления магнитоупругости при измерении напряжений в ферромагнитном материале. В публикациях [10, 11], представлены методика и результаты предыдущих исследований магнитоупругих свойств различных видов конструкционных сталей, выполненных в Варшавском технологическом университете.

Ранее проводимые исследования с использования магнитоупругого явления в неразрушающих методах исследований состояния стальных конструкций были проведены на специально подготовленных образцах из исследуемой стали. Эти образцы были подвергнуты испытанию сразу после изготовления, однако результаты измерений не учитывали эффектов, связанных со старением материала. Поэтому необходимо провести исследования на образцах стали, подвергнутых процессу step-cooling test, которые позволят моделировать влияние времени и условий окружающей среды на состояние материала. Это позволит оценить влияние времени на свойства магнитоупругой исследуемой стали.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является исследовать возможность использования магнитоупругого явления в исследованиях неразрушающего контроля конструкционных сталей.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- разработать методику исследований магнитоупругих характеристик для различных типов конструкционной стали;
- исследовать влияние растягивающих напряжений на магнитные свойства материалов выполненных из стали;
- исследовать влияние температуры на магнитоупругие свойства сердечников выполненных с конструкционной стали.

4. Материалы и методика измерений магнитоупругих характеристик для материалов выполненных из стали

4.1. Используемые материалы для исследований магнитоупругих характеристик

Сталь 13CrMo4-5 есть ферромагнитной конструкционной сталью хромо-молибденового сплава и предназначена для работы при повышенных температурах. Эта сталь нашла использование в основном в энергетической промышленности, в качестве материала для производства, в частности, котельных труб и лопаток паровых турбин [12].

В ходе выполненных измерений исследованы магнитоупругие свойства трёх образцов 13CrMo4-5 из стали, которые ранее были подвергнуты процессу step-cooling test. Это термическая обработка, которая влияет на заготовку таким образом, что имитирует воздействие течения времени и условий окружающей среды (температуры и напряжения). Этот процесс применяется, в частности, к ускоренному, основанному на длительном процессе термообработки, оценивания влияния существенных изменений, происходящих в реальных условиях в течение длительного времени (порядка 100 000 ч) эксплуатации. В работе использованы, в дополнение к классической обработке step-cooling test (рис. 1), также два других процесса, основанных на классической схеме обработки. В первом (далее обозначается номером 1) обработка была прекращена после достижения температуры образцов 524°C и выдержан образец в течение 24 ч при этой температуре, в то время как во втором образце (обо-

значен цифрой 2) обработка была прекращена после достижения температуры 496°C и выдерживание образца выполнено от 60ч при этой температуре (рис. 1). Для каждого из полученных тестовых образцов проведены исследования магнитоупругих свойств. Эта процедура позволила определить характеристики для трех различных структур, полученных с помощью термической обработки, имитирующей условия деградации в промышленных условиях. Следует, однако, отметить, что процедура, используемая для формирования структуры, не позволяет проводить четкую идентификацию времени, после которого есть возможность выявить реальные условия эксплуатации. В дополнение к оценке магнитных характеристик, также были выполнены исследования влияния изменений температуры на характеристики магнитных сердечников без напряжений.

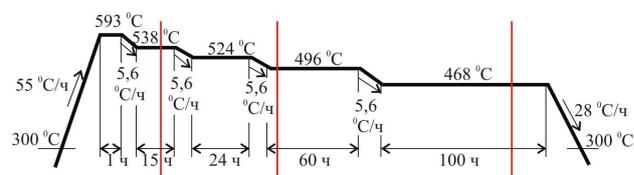


Рис. 1. Схема используемой обработки step-cooling test

Для исследований использовались образцы в качестве сердечников в форме окна (рис. 2). Эта форма позволяет удобное крепление во время теста. Кроме того, использование окна сердечника позволило получить равномерное распределение растягивающих напряжений в материале и замкнутый магнитный путь.

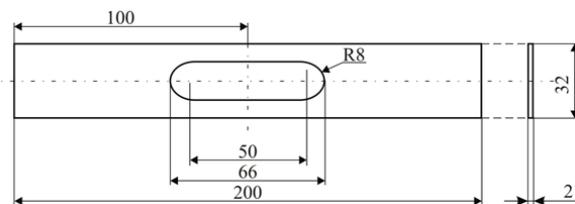


Рис. 2. Форма и геометрические размеры исследуемых стальных сердечников 13CrMo4-5

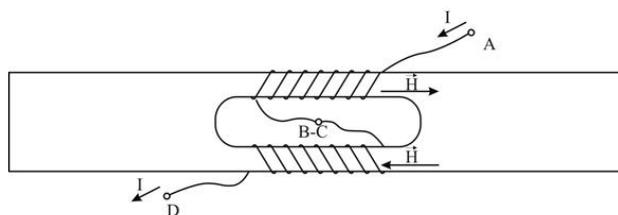


Рис. 3. Схема распределения обмоток на исследуемом сердечнике на примере обмотки возбуждения: I — ток возбуждения, H — намагничивающее поле

На каждом из сердечников была намотана обмотка возбуждения (500 витков) и измерительная обмотка (200 витков), причем каждая из обмоток была намотана на двух сторонах сердечника равномерно, с целью образования замкнутой магнитной цепи и предотвра-

щения рассеивания магнитного потока в материале (рис. 3).

4. 2. Измерительная установка

Для проведения исследований использована измерительная установка в двух конфигурациях. Основным элементом каждой из них была автоматизированная система для тестирования мягких магнитных материалов НВ-PL30, которая была использована для измерения магнитных характеристик стали 13CrMo4-5.

Измерения температурных характеристик стали 13CrMo4-5 выполнено с использованием измерительной установки в конфигурации, представленной на рис. 4, а. Для задания необходимой температуры, при которой магнитные характеристики были изме-

рены, был использован криостат МК70 САО. Устройство имело возможность как к охлаждению, так и к нагреванию объектов, расположенных в тепловой камере.

Установка в конфигурации для исследований магнитоупругих характеристик (рис. 4, б) состояла из описанной выше системы, НВ-PL30, а также системы задания напряжений на растяжение. Для задания нагрузок использовано ручной гидравлический пресс типа PLH-12/4-WK-54. Измерение величины задаваемых нагрузок выполнялось с помощью датчика силы ZEPWN CL16U. Преобразование силы сжатия, создаваемой в прессе, в усилие растяжения, воздействующее на сердечник, происходит с использованием реверсора сил, его конструкция и принцип работы показана на рис. 5 [4].

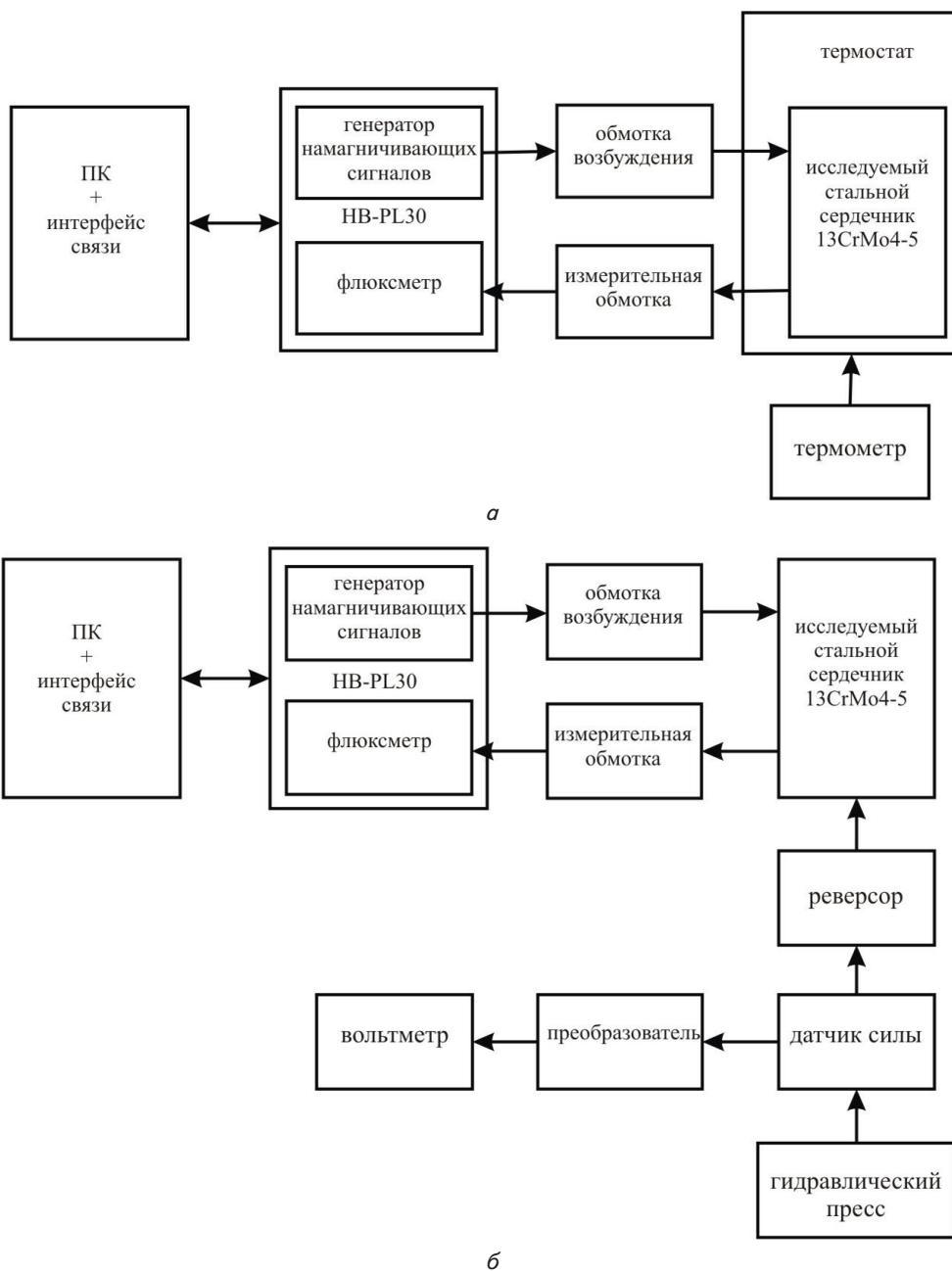


Рис. 4. Блок-схема измерительных установок для измерения магнитных характеристик: а – конфигурация для измерения температурных характеристик; б – конфигурация для измерения магнитоупругих характеристик

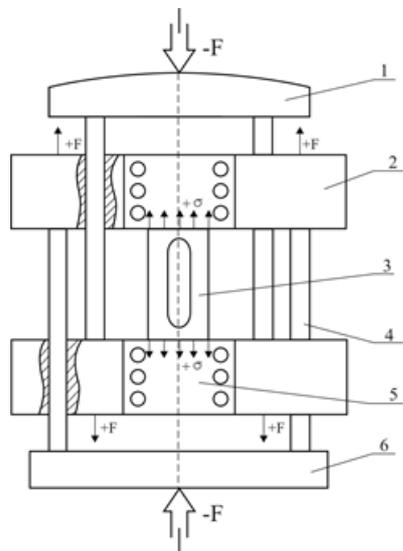


Рис. 5. Конструкция и принцип работы реверсора
 силы: -F – сжимающая сила, +F – сила растяжения,
 +σ – напряжение при растяжении, 1 – верхняя балка,
 2 – неподвижная балка, 3 – исследуемый сердечник,
 4 – цилиндрические колонны, 5 – подвижная балка,
 6 – основа реверсора

5. Процедура измерения магнитных характеристик при изменении температуры и механических напряжений

Для каждого из исследуемых сердечников получены характеристики температуры. Сердечник помещался в термостат и выполнялись измерения магнитных характеристик при температурах в диапазоне от -20 до 60 °С с шагом в 10 °С. Затем исследуемый сердечник помещался в испытательный реверсор и подвергался действию растягивающего напряжения от 0 МПа и до предела разрыва (ок. 480 МПа), измеряя при каждом из заданных напряжений магнитные характеристики. Измерение магнитных характеристик были сделаны в четырех точках с фиксированными значениями амплитуды намагничивающего поля H_m в размере 450 А/м, 850 А/м 1680 А/м и 2800 А/м.

6. Результаты исследований влияния температуры и механических напряжений на магнитные характеристики

На рис. 6–8 представлены результаты измерений характеристик температуры в исследуемых сердечниках.

Из рис. 6–8 можно видеть, что влияние температуры на максимальную индукцию исследуемого материала невелико. Только при самой низкой амплитуде намагничивающего поля может наблюдаться небольшое увеличение индукции в зависимости от температуры. Для сильных полей не было выявлено больших изменений.

На рис. 9–11 представлены петли гистерезиса, полученные для каждого из исследуемых сердечников и амплитуды намагничивающего поля 850 А/м, напряжениях 0 МПа, 100 МПа и 450 МПа.

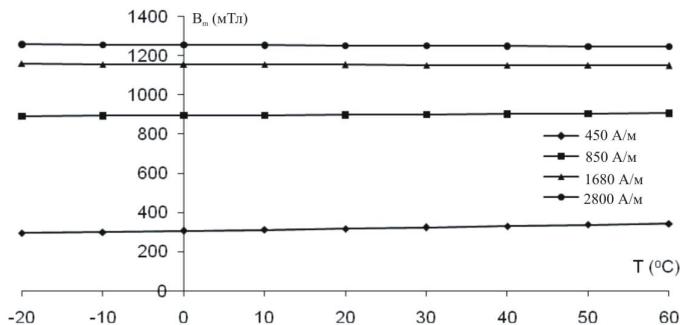


Рис. 6. График зависимости максимальной индукции от температуры $B_m(T)$ для сердечника 1 (step-cooling прекращен при температуре 524 °С)

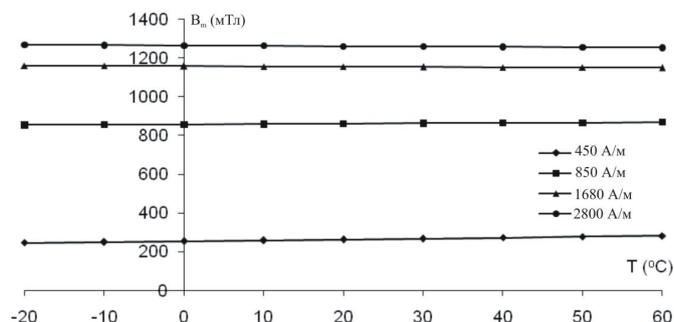


Рис. 7. График зависимости максимальной индукции от температуры $B_m(T)$ для сердечника 2 (step-cooling прекращен при температуре 496 °С)

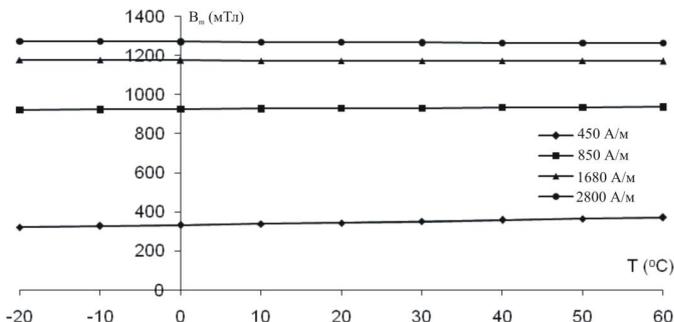


Рис. 8. График зависимости максимальной индукции от температуры $B_m(T)$ для сердечника 3 (полный цикл обработки step-cooling)

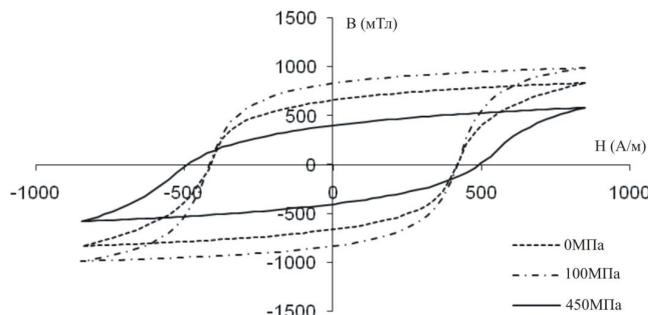


Рис. 9. Магнитные характеристики $B(H)$ в зависимости от напряжений для сердечника 1 (step-cooling прекращен при температуре 524 °С)

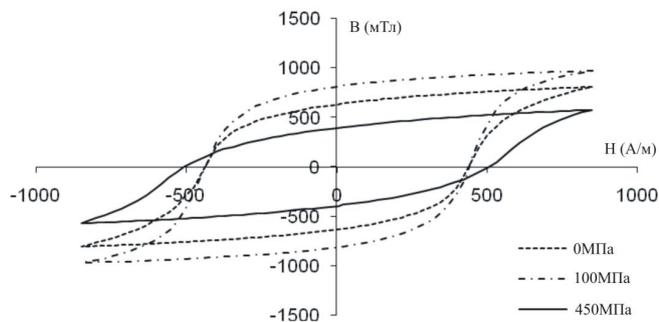


Рис. 10. Магнитные характеристики $B(H)$ в зависимости от напряжений для сердечника 2 (step-cooling прекращен при температуре 496 °C)

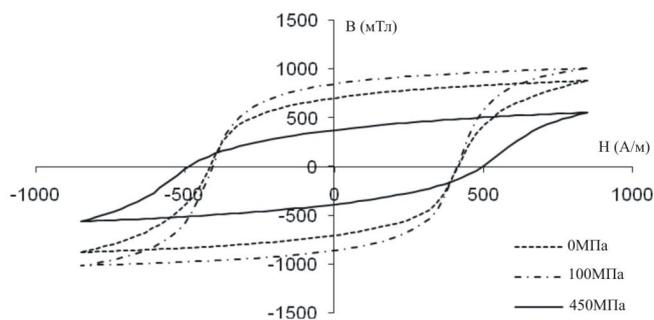


Рис. 11. Магнитные характеристики $B(H)$ в зависимости от напряжений для сердечника 3 (полный цикл обработки step-cooling)

На рис. 9–11 можно наблюдать четкий эффект растягивающего напряжения на форму петли и ее параметры. При напряжении 100 МПа максимальная индукция достигает наибольшего значения – она называется точкой Вилларего. Величина коэрцитивности близка к значению, полученному при нулевых напряжениях. Дальнейшее увеличение напряжения приводит к уменьшению максимальной индукции и заметному увеличению коэрцитивной силы, как это видно в случае цикла, полученного с напряжением 450 МПа (сердечник близок к разрыву). Для всех трех сердечников характер изменения графиков $B(H)$ в функции напряжений является аналогичным.

На рис. 12–14 представлены графики зависимости максимального значения индукции от величины напряжений $B_m(\sigma)$ для исследуемых сердечников.

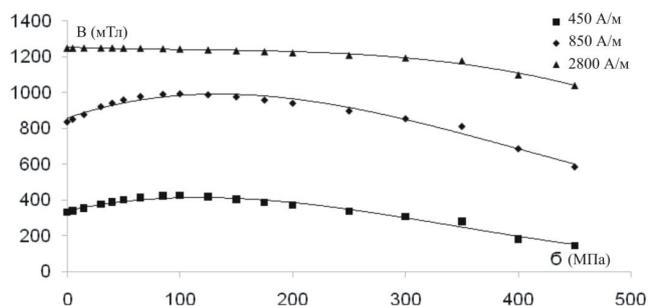


Рис. 12. График зависимости максимальной индукции от напряжений $B_m(\sigma)$ для сердечника 1 (step-cooling прекращен при температуре 524 °C)

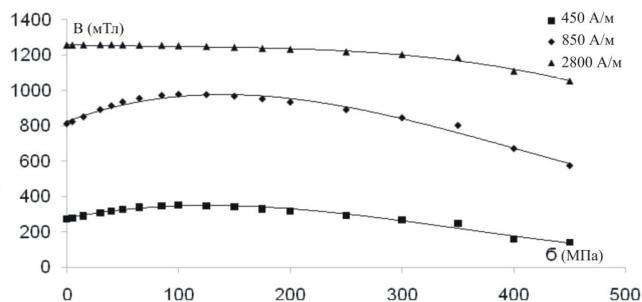


Рис. 13. График зависимости максимальной индукции от напряжений $B_m(\sigma)$ для сердечника 2 (step-cooling прекращен при температуре 496 °C)

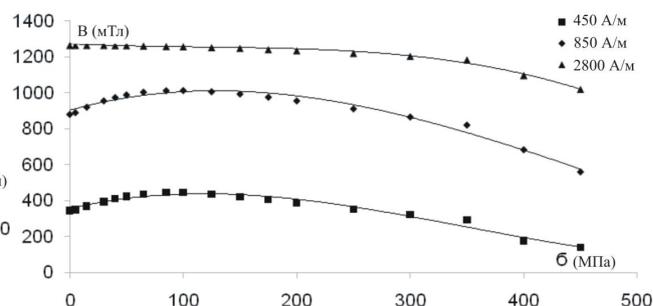


Рис. 14. График зависимости максимальной индукции от напряжений $B_m(\sigma)$ для сердечника 3 (полный цикл обработки step-cooling)

Из рис. 12–14 очевидно, что в начальной стадии нагрузки сердечников рост напряжений сопровождается увеличением максимальной индукции материала. Это явление особенно заметно при низких амплитудах намагниченности. После достижения точки Вилларего, где индукция принимает максимальное значение, последующее снижение ее величины сопровождается повышением напряжения. Точно так же, как и в случае характеристик $B(H)$, не видно явного воздействия влияния момента перерыва обработки step-cooling на характеристики магнитоупругого материала – результаты, полученные для всех трех исследуемых сердечников, подобны.

Во всех случаях наблюдаемая структура – типа феррито-карбидная с четко видимым зерном первичного перлита, в котором наблюдаются эффекты разрушения слоистой структуры (рис. 15).

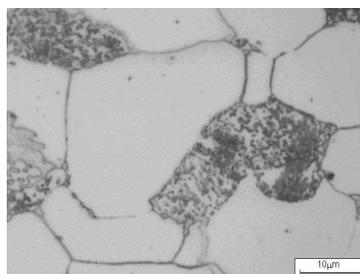


Рис. 15. Структура феррито-карбидная наблюдается в образцах после технологической стадии step-cooling test (также в сломанных вариантах) до достижения конца процесса (световой микроскоп, светлые участки, окрашивание реагентом Nital 5 %)

Описанное явление может быть объяснено отсутствием практических различий между структурой, полученной в трех анализируемых вариантах обработки.

7. Выводы

Методы исследований магнитоупругих характеристик, приведенные в этой статье, предоставляют новые возможности для описания характеристик под воздействием напряжений для конструкционных сталей.

1. Разработанная исследовательская установка дает возможность получение характеристик, которые позволяют правильно оценить состояние напряжений в конструкционных элементах. Соответственно выбранная форма сердечника обеспечивает замкнутую магнитную цепь и равномерное распределение напряжений. Представленная методика исследования позволяет заполнить пробел в знаниях магнитоупругих характеристик различных типов конструкционной стали.

2. Представленные результаты экспериментальных исследований свойств магнитоупругой стали

подтверждают обоснованность предлагаемой методики исследований. Под воздействием растягивающего напряжения для низких значений амплитуды намагничивающего поля, магнитная индукция может существенно изменяться, что подтверждает возможность использования измерений, основанных на эффекте магнитоупругости, в области исследований неразрушающего контроля в промышленности.

3. Магнитные характеристики изменяются незначительно под воздействием температуры. Это позволяет использовать магнитоупругие характеристики в исследованиях неразрушающего контроля конструкций из конструкционной стали, т. к. температура не является параметром, нарушающим магнитоупругие характеристики.

8. Благодарности

Работа была частично поддержана Национальным научно-исследовательским центром (Польша) в рамках проекта PBS1/B4/6/2012

Литература

1. Левиньска-Ромицка: Неразрушающий контроль. Основы дефектоскопии [Текст] / Варшава: Издательство научно-техническое, 2001.
2. Ghanei, S. Design of an expert system based on neuro-fuzzy inference analyzer for on-line microstructural characterization using magnetic NDT method [Text] / S. Ghanei, H. Vafaenezhad, M. Kashefi, A. R. Eivani, M. Mazinani // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2015. – Vol. 379. – P. 131–136. doi: 10.1016/j.jmmm.2014.12.028
3. Handley, R. O. Modern Magnetic Materials: Principles and Applications [Text] / R. O Handley United States. Wiley-Interscience, 1999.
4. Boll, R. Applications of amorphous magnetic materials in electronics [Text] / R. Boll, H. Warlimont // IEEE Transactions on Magnetics. – 1981. – Vol. 17, Issue 6. – P. 3053–3058. doi: 10.1109/tmag.1981.1061565
5. Bienkowski A. The Magnetoelastic Villari Effect in Fe₂₅Ni₅₅Si₁₀B₁₀ Amorphous Alloy Subjected to Thermal Treatment [Text] / A. Bienkowski, R. Szewczyk, J. Salach, A. Kolano-Burian // Reviews on Advanced Materials Science. – 2008. – Vol. 18. – P. 561–564
6. Svec, P. Evolution of Structure and Magnetic Properties of Rapidly Quenched Fe–B-Based Systems With Addition of Cu [Text] / P. Svec, I. Janotova, G. Vlasak, D. Janickovic, J. Marcin, J. Kovac, I. Skorvanek, P. Svec // IEEE Transactions on Magnetics. – 2010. – Vol. 46, Issue 2. – P. 408–411. doi: 10.1109/tmag.2009.2034333
7. Xu, B. Application of Magnetoelastic Effect of Ferromagnetic Material in Stress Measurement [Text] / B. Xu, H. Y. Li // Advanced Materials Research. – 2012. – Vol. 496. – P. 306–309. doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.496.306
8. Lo, C. C. H. Compositional Dependence of the Magnetomechanical Effect in Substituted Cobalt Ferrite for Magnetoelastic Stress Sensors [Text] / C. C. H. Lo // IEEE Transactions on Magnetics. – 2007. – Vol. 43, Issue 6. – P. 2367–2369. doi: 10.1109/tmag.2007.892536
9. Tormes, C. D. Characterization of drying behavior of granular materials using magnetoelastic sensors [Text] / C. D. Tormes, M. Beltrami, R. C. D. Cruz, F. P. Missell // NDT and E International. – 2014. – Vol. 66. – P. 67–71. doi: 10.1016/j.ndteint.2014.04.008
10. Jackiewicz, D. Application of Extended Jiles-Atherton Model for Modelling the Influence of Stresses on Magnetic Characteristics of the Construction Steel [Text] / D. Jackiewicz, J. Salach, R. Szewczyk, A. Bienkowski // Acta Physica Polonica A. – 2014. – Vol. 126, Issue 1. – P. 392–393. doi: 10.12693/aphyspola.126.392
11. Jackiewicz, D. New Methodology of Testing the Stress Dependence of Magnetic Hysteresis loop of the L17HMF Heat Resistant Steel Casting [Text] / D. Jackiewicz, R. Szewczyk, A. Bienkowski, M. Kachniarz // Journal of Automation Mobile Robotics and Intelligent Systems. – 2015. – Vol. 9, Issue 2. – P. 52–55. doi: 10.14313/jamris_2-2015/18
12. Chikazumi, S. Physics of Ferromagnetism [Text] / S. Chikazumi. – New York: Oxford University Press, 1997.