

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ КЛИМАТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА НА МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СТАЛЕЙ РАЗЛИЧНОГО СОСТАВА

© 2019 г. В.Н. Костин^{1,2,*}, Е.Ю. Сажина^{1,**}

¹ Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Россия 620108 Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18

² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия 620002 Екатеринбург, ул. Мира, 19
E-mail: *kostin@imp.uran.ru; **poisk@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 23.06.2019; после доработки 12.07.2019

Принята к публикации 15.07.2019

Экспериментально установлено, что изменение температуры образцов, широко используемых в технике сталей в диапазоне $(-10 \text{ — } +40)^\circ\text{C}$, приводит к существенному изменению их магнитных свойств вещества. При повышении температуры увеличивается площадь петли гистерезиса. Коэрцитивная сила и остаточная магнитная индукция растут при практически неизменном значении намагниченности насыщения. Растет также значение максимальной магнитной восприимчивости. Наибольшее изменение свойств наблюдается у близкой по составу к техническому железу стали 10880. Установленные изменения магнитных свойств следует учитывать при проведении магнитного контроля в климатических (природных) условиях.

Ключевые слова: магнитные свойства вещества, температура, коэрцитивная сила, остаточная намагниченность, магнитная восприимчивость, диагностический параметр.

DOI: 10.1134/S0130308219100051

ВВЕДЕНИЕ

Для каждого измерительного устройства определяется и записывается в нормативные документы температурный диапазон применения. Однако этот температурный диапазон связан, как правило, с температурной стабильностью элементов самого устройства. В то же время диагностика деталей и конструкций из ферромагнитных металлов и сплавов может выполняться при самых различных температурах контролируемых объектов (арктические, тропические, свыше 100°C для паропроводов тепловых и атомных электростанций). Как известно [1, 2], температура может оказывать значительное влияние на магнитные свойства ферромагнетиков, а эти свойства, в свою очередь, могут измеряться и анализироваться как диагностические параметры состояния ферромагнитных объектов. Более того, исследование температурной зависимости магнитных свойств является основой термомагнитного анализа различных веществ [3, 4]. Таким образом, знание температурной зависимости магнитных свойств является весьма важным.

Повышение температуры от $150\text{—}200^\circ\text{C}$ вплоть до температуры Кюри приводит к монотонному уменьшению намагниченности насыщения и росту магнитной восприимчивости обычных ферромагнетиков [1, 2]. При нагреве и охлаждении может наблюдаться температурный гистерезис [1], причинами которого могут быть перестройки доменной структуры (магнитное старение) или перестройка кристаллической структуры гетерогенного ферромагнитного материала (структурное старение). В работе [5] для ряда углеродистых сталей было показано, что при повышении температуры выше 150°C заметно меняется их коэрцитивная сила, однако это изменение немонотонно и его характер зависит от химического состава стали.

Наиболее часто диагностику эксплуатируемых изделий и объектов выполняют при температуре окружающей среды в диапазоне $(-10 \text{ — } +40)^\circ\text{C}$. Однако для этого интервала практически нет данных о влиянии температуры на измеряемые магнитные параметры диагностики. Поскольку не только коэрцитивная сила, но и другие магнитные свойства могут использоваться в качестве диагностических параметров, то актуальным является определение степени влияния температуры климатического диапазона на комплекс магнитных свойств технических ферромагнитных сплавов, что и явилось целью настоящей работы.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для исследования влияния температуры на магнитные свойства вещества были выбраны отличающиеся по химическому составу стали (табл. 1), изделия из которых эксплуатируются в раз-

Таблица 1

Содержание основных легирующих элементов (%) и размеры (мм) исследованных образцов

Сталь	C	Cr	Si	Mn	S	P	Размеры
10880	до 0,035	—	до 0,3	до 0,3	до 0,03	до 0,02	10,5×10,5×99,6
Ст3	0,18	—	0,24	0,46	—	—	10×10×101
65Г	0,6	0,19	0,3	1,1	0,02	0,02	5×40,4×90,2

личных климатических условиях. Сталь 10880, близкая по химическому составу к техническому железу, применяется для изготовления различной электротехнической продукции и, в частности, магнитопроводов реле железнодорожной автоматики. Сталь Ст3 используется для производства нагруженных элементов сварных конструкций (балки, швеллеры) и для изготовления строительной арматуры. Сталь 65Г используется для изготовления рессор и пружин, а также является основным материалом для изготовления железнодорожных рельсов. Образцы из этих сталей перед измерениями были отожжены при температуре 850 °С и отшлифованы до указанных в табл. 1 размеров.

Как более информативные для структуроскопии [6, 7] и не зависящие от формы и размеров образцов в работе исследовались магнитные свойства вещества [1, 2]. Измерения кривых намагничивания и предельных петель гистерезиса исследуемых образцов выполняли с использованием комплекса Remagraph C-500 в замкнутой магнитной цепи [8]. Измерение потока в REMAGRAPH C-500 осуществляется путем интегрирования сигнала с измерительной обмотки, охватывающей образец. Измерение внутреннего поля выполняется с помощью потенциалмера [9]. Нормированная погрешность измерения внутреннего поля не превышала 1 %, а погрешность измерения индукции — 2 %. Перед измерением образец охлаждался или нагревался до заданной температуры и помещался в измерительное устройство, имеющее комнатную температуру 25 °С. Цикл измерения кривой намагничивания и предельной петли гистерезиса занимал не более 40 с. За это время существенного изменения температуры образца и измерительного устройства не происходило. Температура образцов контролировалась с помощью мультиметра M890G с выносной термопарой. Для уменьшения случайной погрешности при каждой фиксированной температуре измерения выполнялись не менее 5 раз.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены фрагменты предельных петель магнитного гистерезиса образца из стали 10880 при температурах -10 и $+40$ °С. Можно увидеть, что увеличение температуры приводит к увеличению площади петли гистерезиса. Максимальная индукция при изменении температуры практически не изменилась и ее величина составила $B_{\max} = 2,01$ Т в поле 50 кА/м.

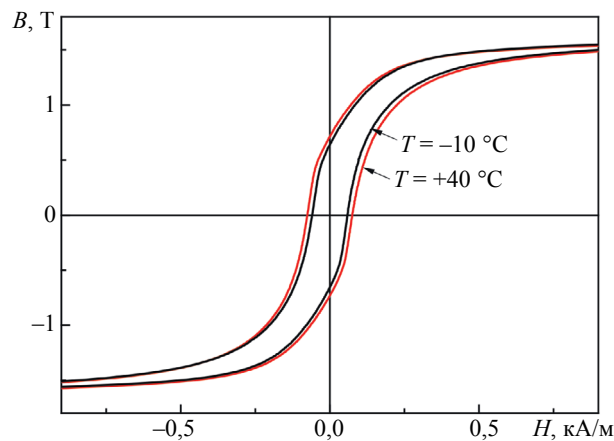


Рис. 1. Фрагменты предельных петель магнитного гистерезиса образца из стали 10880, измеренные при температурах -10 и $+40$ °С.

На рис. 2 и 3 приведены зависимости коэрцитивной силы H_c , остаточной магнитной индукции B_r и определенной на кривой намагничивания максимальной магнитной проницаемости $\mu_{\max}$ от температуры образцов из стали 10880, стали Ст3 и стали 65Г.

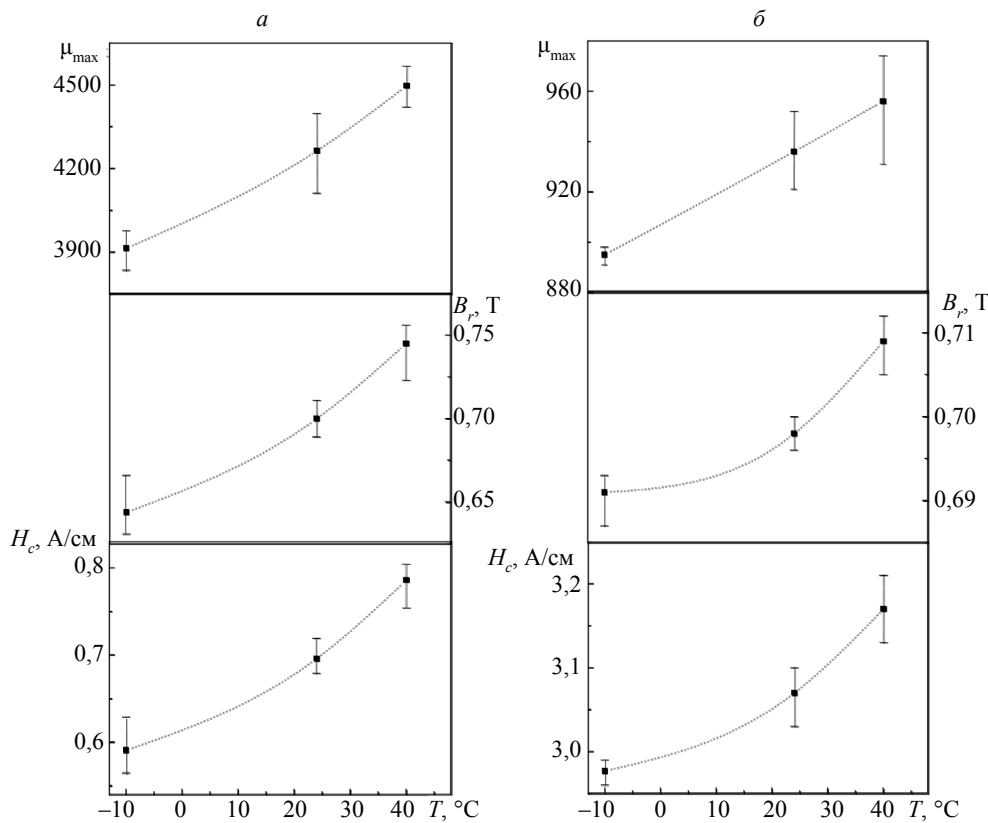


Рис. 2. Зависимости коэрцитивной силы H_c , остаточной магнитной индукции B_r и максимальной магнитной проницаемости μ_{max} от температуры образцов из стали 10880 (а) и стали Ст3 (б).

Видно, что повышение температуры приводит к увеличению указанных магнитных свойств. Для стали 10880 прирост коэрцитивной силы составил около 35 %, прирост остаточной магнитной индукции — около 18 %, а максимальной магнитной проницаемости — более 15 %. Меньшее изменение свойств наблюдалось для стали Ст3, для которой прирост H_c составил чуть более 6 %, прирост B_r — около 2,5 %, прирост μ_{max} — 6,7 %.

Повышение температуры образцов из стали 65Г (см. рис. 3) вызвало увеличение максимальной магнитной проницаемости в среднем на 8,5 %, а коэрцитивная сила и остаточная магнитная индукция увеличились менее чем на 2 %.

Можно отметить, что увеличение содержания углерода в составе сталей сопровождается заметным снижением чувствительности магнитных свойств к вариации температуры в исследованном климатическом диапазоне.

Полученные результаты можно объяснить следующим образом. Как известно, коэрцитивная сила поликристаллических ферромагнетиков пропорциональна средней толщине междоменных границ δ как в «теории напряжений», так и в «теории включений» Кондорского [1]. Логично предположить, что повышение H_c с температурой может быть связано с повышением разупорядочивающего теплового воздействия на вектора самопроизвольной намагниченности в доменных границах и соответствующим ростом средней величины δ .

Повышение магнитной проницаемости μ_{max} связано с повышением удельного электрического сопротивления материалов и соответствующим уменьшением вихревых токов, что повышает подвижность доменных границ и облегчает процессы намагничивания [10].

С повышением подвижности доменных границ может быть связано и повышение остаточной магнитной индукции с ростом температуры. При высоких магнитных полях магнитострикция железа и сталей отрицательна и в этих материалах реализуется структура «легкая плоскость» [1, 10, 11]. Но в области слабых магнитных полей магнитострикция железа и сталей положительна [1, 11] и направление приложенного магнитного поля является осью легкого намагничивания. Повышение с температурой подвижности доменных границ в малых полях способствует дополнительному ориентированию части векторов самопроизвольной намагниченности в направле-

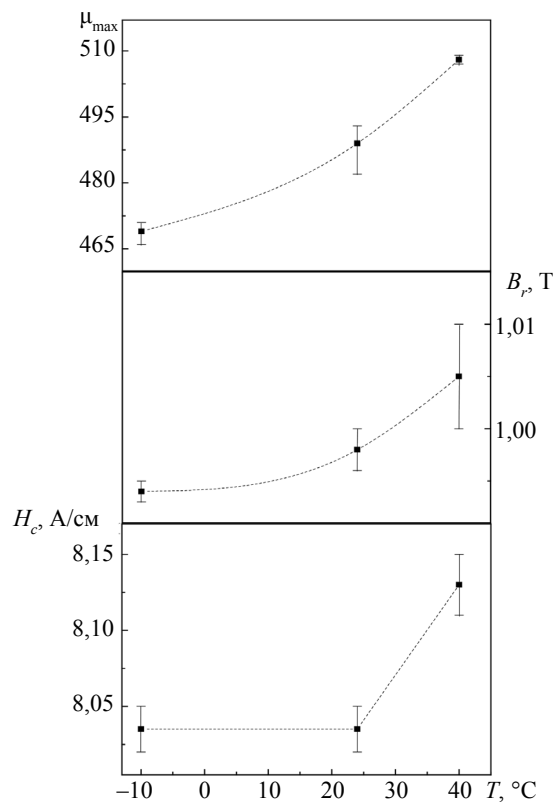


Рис. 3. Зависимости коэрцитивной силы H_c , остаточной магнитной индукции B_r и максимальной магнитной проницаемости $\mu_{\max}$ от температуры образцов из стали 65Г.

нии приложенного магнитного поля, что является наиболее вероятной причиной роста остаточной магнитной индукции.

Интересно отметить, что для сплавов железо—углерод имеет место тенденция снижения температурного коэффициента электросопротивления α по мере роста содержания углерода [12]: $\alpha_{\text{железо}} = (0,005—0,006)\text{град}^{-1}$; $\alpha_{\text{сталь}} = (0,003—0,0057)\text{град}^{-1}$; $\alpha_{\text{чугун}} \approx 0,001 \cdot \text{град}^{-1}$. Следовательно, прирост подвижности доменных границ с ростом температуры должен падать при повышении содержания углерода в стали и должно уменьшаться изменение связанных с подвижностью границ магнитных характеристик $\mu_{\max}$ и B_r . Это предположение согласуется с экспериментальными результатами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально установлено, что при повышении температуры отожженных образцов из сталей 10880, Ст3 и 65Г в диапазоне $(-10 \text{ — } +40)^\circ\text{C}$ увеличиваются значения их коэрцитивной силы, остаточной магнитной индукции и максимальной магнитной проницаемости при практически неизменном значении намагниченности насыщения. Наиболее значительные изменения свойств наблюдаются у близкой к техническому железу стали 10880; прирост коэрцитивной силы составил около 35 %, прирост остаточной магнитной индукции — около 18 %. С ростом содержания углерода в стали уменьшается влияние температуры на магнитные свойства. Установленные зависимости должны учитываться при проведении и анализе результатов электромагнитной диагностики [13] объектов в климатических (природных) условиях.

Учитывая разнообразные условия эксплуатации, необходимо продолжить изучение влияния температуры контролируемых объектов на их электромагнитные, акустические и другие характеристики, которые могут быть диагностическими параметрами, а также на контролируемые свойства (твёрдость, предел прочности и др.). При этом исследуемый диапазон температур должен быть расширен и простирается, по меньшей мере, от -70°C (Арктика) до $+700^\circ\text{C}$ (трубопроводы атомных станций).

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Диагностика», № АААА-А18-118020690196-3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вонсовский С.В., Шур Я.С.* Ферромагнетизм. М.—Л.: ОГИЗ—Гостехиздат, 1948. 816 с.
2. *Кринчик Г.С.* Физика магнитных явлений. М.: Изд-во МГУ, 1985. 368 с.
3. *Буров Б.В., Ясонов П.Г.* Введение в дифференциальный термомагнитный анализ горных пород. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1979. 168 с.
4. *Breczko T., Ilyashenko S., Bykov D.* et al. Thermomagnetic analysis and domain structure in the phase transition region of Ni-Mn-Ga and Co-Ni-Ga shape memory alloys // *Rev. Adv. Mater. Science*. 2009. V. 20. P. 101—106.
5. *Кузнецов И.А., Михеев М.Н.* Влияние процесса карбидообразования на магнитные свойства углеродистой стали. Сб. Об электромагнитных методах контроля качества изделий. Свердловск: Средне-уральское книжное изд-во, 1965. С. 36—46.
6. *Костин В.Н., Осинцев А.А., Сташков А.Н., Царькова Т.П.* Многопараметровые методы структуроскопии стальных изделий с использованием магнитных свойств вещества // *Дефектоскопия*. 2004. № 3. С. 69—82.
7. *Костин В.Н., Кадров А.В., Кусков А.Е.* Оценка упругих и пластических деформаций феррито-перлитных сталей по магнитным свойствам вещества // *Дефектоскопия*. 2005. № 10. С. 13—22.
8. <http://www.magnet-physik.de>
9. *Чечерников В.И.* Магнитные измерения. М.: Изд-во МГУ, 1969. 387 с.
10. *Лившиц Б.Г., Крапошин В.С., Линецкий Я.Л.* Физические свойства металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1980. 320 с.
11. *Меськин В.С.* Ферромагнитные сплавы. М.—Л.: ОНТИ, 1937. 791 с.
12. <https://www.mozgan.ru/Table/TemperatureCoefficientOfResistance>
13. *Kostin V.N., Smorodinskii Ya.G.* Multipurpose software-hardware systems for active electromagnetic testing as a trend // *Russian Journal of Nondestructive testing*. 2017. V. 53. No. 7. P. 493—504. [*Костин В.Н., Смородинский Я.Г.* Многоцелевые аппаратно-программные системы активного электромагнитного контроля как тенденция // *Дефектоскопия*. 2017. № 7. С. 23—34.]