

рия несет ответственность за принятие решения о том, какие риски и возможности необходимо рассматривать.

В соответствии с изложенным разработан пакет документов для повторной аккредитации по метрологическому обеспечению санитарно-промышленной лаборатории АО «УЭТМ». Кроме того, на основании замечаний в 2020 году был принят новый работник лаборатории на должность инженера по контролю физических факторов и приобретены недостающие приборы.

Список литературы

1. Курмангалиева, Л. А. Аккредитация органов по сертификации и испытательных центров / Л. А. Курмангалиева, А. О. Еремекбаева. – Алматы: Каз. нац. техн. ун-т, 2012. – 67 с. – Текст : электронный // Студопедия : [сайт]. – URL: https://studopedia.ru/18_22812_akkreditatsiya-organov-po-sertifikatsii-i-ispitatelnih-izmeritelnih-laboratoriy.html.

2. Сергеев, А. Г. Метрология, стандартизация и сертификация : учебник для бакалавров / А. Г. Сергеев, В. В. Терегеря. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Юрайт, 2014. – 838 с. – ISBN 978-5-9916-3404-5. – Текст : непосредственный.

3. МУ 1844–78. Методические указания по проведению измерений и гигиенической оценки шумов на рабочих местах : утверждены Главным государственным санитарным врачом СССР 25 апреля 1978 г. № 1844-78. – Москва, 1978. – Текст : электронный // NormaCS: система нормативов : [сайт]. – URL: <http://www.normacs.ru/Doclist/doc/8KB.html>.

УДК 620.179.14

А. И. Миронов, В. В. Грибов

A. I. Mironov, V. V. Gribov

*ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», Екатеринбург*

*Ural Federal University named after the first
President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg*

mironov.artiom2014@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ ОТ ВЕЛИЧИНЫ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ СТАЛИ 08КП

STUDY OF THE DEPENDENCE OF THE COERCIVE FORCE ON THE VALUE OF MECHANICAL VOLTAGES IN NONDESTRUCTIVE TESTING OF STEEL 08KP

Аннотация. В статье приведены результаты исследования зависимости коэрцитивной силы от механических напряжений стали 08кп с целью совершенствования методики неразрушающего контроля.

***Abstract.** The article presents the results of a study of the dependence of the coercive force on the mechanical stresses of 08kp steel in order to improve the method of non-destructive testing.*

***Ключевые слова:** коэрцитивная сила; механические напряжения; магнитный неразрушающий контроль.*

***Keywords:** coercive force; mechanical stress; magnetic non-destructive testing.*

На сегодняшний день существует множество способов контроля напряженно-деформированного состояния металлоконструкций и одним из таких способов является магнитный неразрушающий контроль.

Свое развитие методы магнитного неразрушающего контроля получили еще в 1940–1950 годах прошлого столетия, однако и в настоящее время эти методы продолжают совершенствоваться. При этом контроль по коэрцитивной силе является одним из наиболее применяемых методов магнитного неразрушающего контроля и ему посвящено большое количество научных работ [1–7]. Причиной этого является неоднородность фазовой и кристаллической структур, к которым очень чувствительна коэрцитивная сила: наличие немагнитных и слабомагнитных включений, большая плотность дефектов. Эти факторы сильно влияют на механические и магнитные свойства сталей.

Целью исследования, результаты которого приведены в данной статье, являлось исследование зависимости коэрцитивной силы от величины механических напряжений при неразрушающем контроле стали 08кп.

Для проведения эксперимента была использована экспериментальная установка, состоящая из трех частей:

- разрывная машина РЭМ-50-А;
- коэрцитиметр-структуроскоп КСП-01;
- анализатор импульсный магнитный ИМА-4М.

Эксперимент проводился на трех типах плоских образцах из стали марки 08кп с длиной рабочей зоны 100 мм и толщиной 2,0 мм у образцов № 1 и № 2 и толщиной 3,0 мм у образца № 3, при этом каждый из образцов имел собственную программу нагружения:

а) Образец № 1

Данный образец подвергался последовательной нагрузке/разгрузке от 0 кН с последующим прибавлением нагрузки с каждым нагружением по 0,5 кН до разрыва образца. Коэрцитивная сила измерялась на каждом цикле нагрузки/разгрузки:

- при удержании образца в напряженном состоянии;
- при снятии нагрузки (0 кН).

б) Образец № 2

Данный образец подвергался последовательной нагрузке, повышающейся от 0 кН до разрыва образца. Нагрузка прибавлялась:

- в диапазоне от 0 кН до 8 кН (по 2 кН);
- в диапазоне от 9 кН до 13 кН (по 1 кН);
- с 13 кН – рост (максимум 13,89 кН) и снижение нагрузки до разрушения образца.

Коэрцитивная сила измерялась при удержании образца при одном значении нагрузки при каждом ее повышении от 0 кН до разрыва образца.

в) Образец № 3

Данный образец подвергся предварительной деформации растяжением на разрывной машине при $P = 19$ кН ($\sigma = 323$ МПа). Были получены следующие параметры:

- удлинение образца: 3 мм (3,00 % относительно первоначальной рабочей длины);
- изменение толщины образца: 0,060 мм (1,94 % относительно первоначальной толщины);
- изменение ширины образца: 0,4 мм (2,02 % относительно первоначальной ширины).

После этого образец был подвержен последовательной нагрузке, повышающейся от 0 кН до разрыва образца. Нагрузка прибавлялась:

- в диапазоне от 0 кН до 16 кН (по 1 кН);
- в диапазоне от 16 кН до 23 кН (по 0,5 кН);
- с 23 кН – рост (максимум 23,8 кН) и образование шейки и, следовательно, уменьшение нагрузки до разрушения образца. Следующее измерение было произведено после разрыва образца при $P = 0$ кН.

Коэрцитивная сила и остаточная намагниченность измерялась при удержании образца при одном значении нагрузки при каждом ее повышении от 0 кН до разрыва образца.

Нагружение образцов осуществлялось в соответствии с ГОСТ 1497–84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение» [8].

Измерение остаточной намагниченности проводилось в точках в соответствии с рис. 1.

Корреляционный анализ проводился в несколько этапов.

Первый этап – определение влияющих и зависимых параметров. Для проведения анализа были выбраны следующие параметры:

- а) нагрузка – влияющий параметр;
- б) коэрцитивная сила – зависимый параметр.

Второй этап – сбор и оценка исходной информации, необходимой для проведения корреляционного анализа. Для проведения корреляционного ана-

лиза были взяты значения коэрцитивной силы, полученные в пределах упругой деформации образцов.

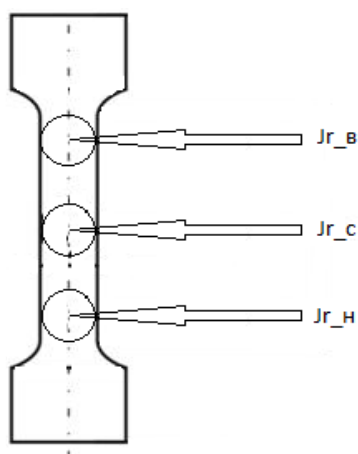


Рис. 1. Точки измерения остаточной намагниченности:

J_r – обозначение остаточной намагниченности;

«_» – место для записи стороны, на которой происходили измерения;

в, с, н – обозначение места измерения остаточной намагниченности (верх, середина, низ соответственно)

Третий этап – изучение характера и моделирование связи между влияющим и зависимым факторами.

Четвертый этап – расчет коэффициента корреляции между факторами.

Пятый этап – оценка результатов корреляционного анализа и их применение.

В табл. 1 приведены результаты испытаний на растяжение всех образцов.

Таблица 1

Результаты испытаний на растяжение

Параметры	Обозначение	Образец 1	Образец 2	Образец 3
Предел текучести, МПа	$\sigma_{0,2}$	189	193	281
Временное сопротивление разрушению, МПа	σ_b	353	351	415
Напряжение разрушения, МПа	σ_p	520	537	987
Относительное удлинение, %	δ	35,0	30,0	21,0
Относительное сужение, %	φ	53,0	54,0	63,0

Для полученных результатов был проведен расчет значений коэффициентов корреляции между приложенной к образцу нагрузкой и коэрцитивной силой. Полученные значения коэффициентов корреляции приведены в табл. 2. Для каждой из сторон образца приведен собственный коэффициент корреляции.

Значения коэффициентов корреляции

Образец	Коррелирующие параметры	Значение коэффициента корреляции
Образец 1	Р и Н _с (л)	-0,905854964
Образец 1	Р и Н _с (п)	-0,939947951
Образец 2	Р и Н _с (л)	-0,921456523
Образец 2	Р и Н _с (п)	-0,927017062
Образец 3	Р и Н _с (л)	-0,884931645
Образец 3	Р и Н _с (п)	-0,86258943

В качестве аппроксимирующей функции в рамках предела упругости была выбрана полиномиальная функция второй степени (1):

$$H_c = a\sigma^2 + b\sigma + c. (1)$$

На рис. 2 изображена зависимость коэрцитивной силы от механических напряжений для образца № 2 на всем протяжении испытания на растяжение.

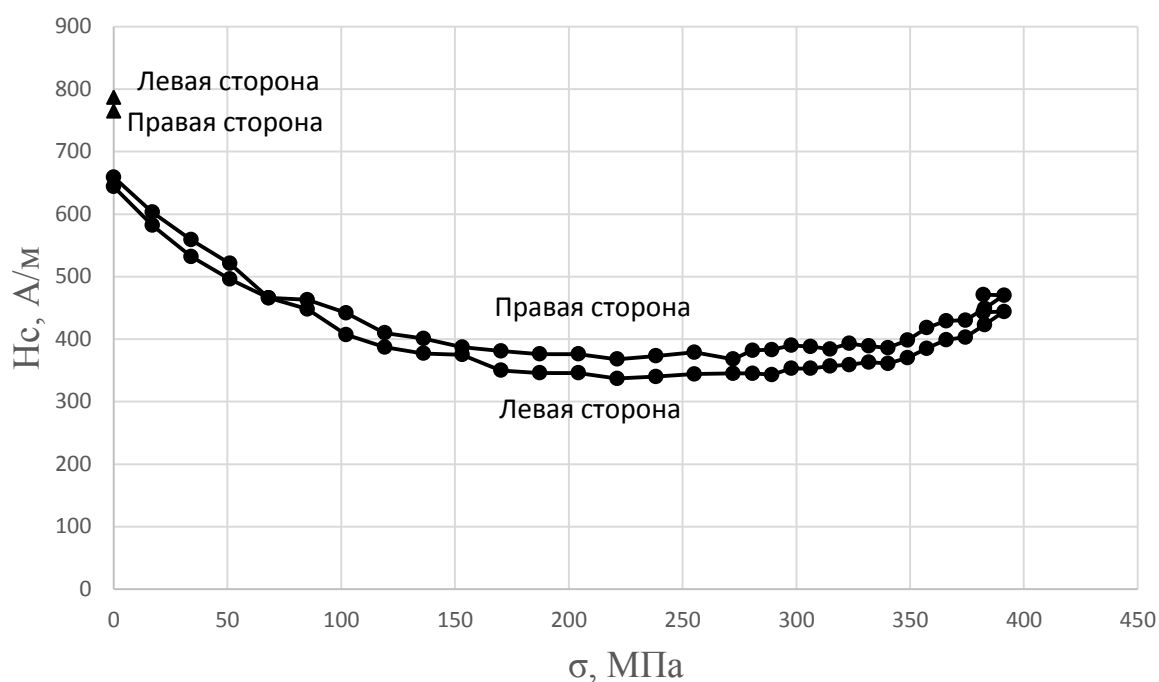


Рис. 2. Зависимость коэрцитивной силы H_c от механических напряжений σ от начала испытаний до разрушения образца № 3:

- – значения коэрцитивной силы в процессе испытания;
- ▲ – значения коэрцитивной силы, измеренные после разрыва

В табл. 3 представлены значения коэрцитивной силы, соответствующей приложенной к образцу № 3 нагрузке на протяжении всего процесса нагружения вплоть до разрушения.

Таблица 3

Зависимость коэрцитивной силы от нагрузки /
механических напряжений образца № 3

Р, кН	σ , МПа	H _c , А/м, л	H _c , А/м, п	Удлинение образца, Δl , мм	Р, кН	σ , МПа	H _c , А/м, л	H _c , А/м, п	Удлинение образца, Δl , мм
0	0	392*	311*	0	16	272	345	368	1,1
0	0	631**	629**	0	16,5	281	345	382	1,1
0	0	644***	659***	0	17	289	343	383	1,7
1	17	582	603	0	17,5	298	353	390	1,7
2	34	532	559	0,2	18	306	353	388	1,7
3	51	496	521	0,3	18,5	315	357	384	1,8
4	68	466	466	0,3	19	323	359	393	1,8
5	85	448	463	0,3	19,5	331	363	389	1,8
6	102	407	442	0,5	20	340	361	386	2,2
7	119	387	410	0,5	20,5	349	370	398	2,2
8	136	377	401	0,6	21	357	385	418	3
9	153	375	387	0,8	21,5	366	399	429	3,6
10	170	350	381	0,8	22	374	403	430	4,7
11	187	346	376	0,8	22,5	382	423	449	7
12	204	346	376	0,8	23	391	444	470	10,7
13	221	337	368	0,8	22,5	382	443	471	11,8
14	238	340	373	1	0	0	787	765	21
15	255	344	379	1	–	–	–	–	–

* H_c до предварительной деформации вне захватов (в горизонтальном положении).
 ** H_c после предварительной деформации вне захватов (в горизонтальном положении).
 *** H_c после предварительной деформации в захватах (в зажимах разрывной машины).

Для образца № 3 была проведена предварительная холодная пластическая деформация. Как видно из табл. 3, разница в значениях коэрцитивной силы до и после прохождения предварительной деформации велика и составляет 64 % для левой и 112 % для правой сторон образца соответственно.

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- при увеличении растягивающей нагрузки (растягивающих напряжений) до предела упругости коэрцитивная сила нелинейно уменьшается по подобной зависимости для всех испытанных образцов из стали 08кп независимо от толщины, ширины и способа приложения нагрузки, полученная зависимость хорошо аппроксимируется полиномиальной функцией второй степени;

- при ступенчатом нагружении в пределах упругой деформации с возвратом в нулевую точку коэрцитивная сила при снятии напряжений изменяется в небольшом диапазоне (из-за отсутствия изменения кристаллической решетки, доменной структуры, формы зерен, плотности дефектов);

- уменьшение значения коэрцитивной силы в области упругой деформации можно объяснить эффектом Виллари, который заключается в том, что при воздействии на ферромагнетик механических напряжений в области упругих деформаций изменяется магнитная проницаемость образцов, что вызвано изменением границ и вращением векторов намагниченности доменов, это приводит к изменению остаточной намагниченности, а следовательно и к изменению коэрцитивной силы;

- пластическая деформация приводит к скачку в значениях коэрцитивной силы, что связано с ростом числа внутренних дефектов и внутренних напряжений;

- рост значений коэрцитивной силы при пластической деформации во время испытаний происходит медленнее, чем уменьшение ее значений при упругой деформации, это объясняется действием растягивающих напряжений, которые уменьшают величину коэрцитивной силы, однако их воздействие оказывается недостаточным для полной нейтрализации влияния новых дефектов, этот фактор также объясняет резкий скачок значений коэрцитивной силы в момент разрушения образца, когда упругая деформация исчезает.

Таким образом, контроль напряженно-деформированного состояния стали на основании измерения коэрцитивной силы в контролируемой стали имеет высокий потенциал для развития и применения. Полученные данные доказывают, что коэрцитивная сила является прекрасным информативным параметром для проведения магнитного неразрушающего контроля по причине стабильности ее показаний при отсутствии нагрузки после ее снятия. Полученные результаты могут быть использованы при создании прибора неразрушающего контроля для оценки напряженно-деформированного состояния стальных конструкций и изделий.

Список литературы

1. *Влияние* механических напряжений на магнитные характеристики трубной стали / Э. С. Горкунов, С. М. Задворкин, А. Н. Мушников [и др.]. – Текст : непосредственный // Прикладная механика и техническая физика. – 2014. – № 3. – С. 181–191.

2. *Прочность* и коэрцитивная сила конструкционной стали, подвергнутой равноканальному угловому прессованию / А. М. Иванов, А. М. Горохов, Н. Д. Петрова, Е. С. Лукин. – Текст : электронный // Studylib : [сайт]. – URL: https://studylib.ru/doc/828190/prochnost_-i-koe-rcitivnaya-sila-konstrukcionnoj-stali--podv (дата обращения: 21.04.2021).

3. *Матюк, В. Ф.* Контроль структуры, механических свойств и напряженного состояния ферромагнитных изделий методом коэрцитиметрии / В. Ф. Матюк, В. Н. Кула-

гин. – Текст : непосредственный // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2010. – № 3. – С. 4–14.

4. Горкунов, Э. С. Влияние пластической деформации при гидростатическом давлении на поврежденность и магнитные характеристики низкоуглеродистой стали 3сп / Э. С. Горкунов, С. В. Смирнов, С. С. Родионова. – Текст : непосредственный // Физическая мезомеханика. – 2003. – № 5. – С. 101–108.

5. *Физические основы методов неразрушающего контроля качества изделий* : учебное пособие / под ред. В. Ф. Новикова. – 2-е изд., доп. – Тюмень : ТюмГНГУ, 2012. – 106 с. – ISBN 978-5-9961-0450-5. – Текст : непосредственный

6. Сандовский, В. А. Исследование магнитной проницаемости стальных образцов в однородном переменном поле при упругой деформации на растяжение / В. А. Сандовский, Е. М. Файншмидт. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений «Приборостроение». – 2013. – № 3 (56). – С. 58–64.

7. Влияние механических напряжений на магнитные характеристики конструкционной стали 15ХН4Д / Э. С. Горкунов, С. М. Задворкин, А. Н. Мушников, Е. И. Якушенко. – Текст : электронный // Reddb.ru : [сайт]. – URL: <https://refdb.ru/look/2703688.html> (дата обращения: 01.04.2021).

8. *ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение* : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 16.07.84 № 2515 : дата введения 1986-01-01 / разработан и внесен Министерством черной металлургии СССР. – Текст : электронный // Техэксперт : [сайт]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200004888> (дата обращения: 01.05.2021).

УДК 669:338.24

Д. В. Родина, Н. К. Казанцева

D. V. Rodina, N. K. Kazantseva

*ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», Екатеринбург*

*Ural Federal University named after the first
President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg*

rdv_1998@mail.ru

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
EVALUATION OF THE EFFICIENCY
OF TECHNOLOGICAL PROCESSES**

Аннотация. Оценка эффективности технологических процессов производства продукции приобретает все большее значение в условиях производства конкурентоспособной продукции. Известные методы, используемые для оценки эффективности технологических процессов, позволяют оценить либо качество готовой продукции, либо от-