

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-7-55-61

УДК (UDC) 620.179.14

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ И ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА СПЛАВА НА РЕЗУЛЬТАТЫ МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА

© Ринат Васикович Загидулин, Тимур Ринатович Загидулин,
Кирилл Олегович Осипов

ООО «НТЦ «Спектр», ОП ООО «Интерюнис», Уфа, Россия: e-mail: doctech.zagrv@post.com

Статья поступила 12 октября 2017 г.

Исследовано влияние изменения химического состава и структуры металла конструкционных сталей на результаты магнитного контроля напряженно-деформированного состояния металла по напряженности поля остаточной намагниченности. Показано, что в области с существенными изменениями структуры и химического состава при магнитном контроле выявляются изменения напряженного состояния металла. Этот подход предусматривает контроль электропроводности металла, весьма чувствительный к изменению структуры, фазового и химического составов конструкционной стали. В области существенных изменений электропроводности металла предусмотрено проведение дополнительных экспериментальных исследований, включающих оптическую металлографию и рентгеновский спектральный анализ образцов металла, результаты которых анализируют в совокупности с полученными данными магнитного контроля напряженного состояния металла. Это позволяет установить причину возникновения напряженного состояния металла в локальной области стального изделия, что важно при технической экспертизе стальных изделий и элементов металлоконструкций. Экспериментально установлено, что существенное увеличение углерода в химическом составе конструкционной стали приводит к изменению электрических и магнитных параметров, однако практически не сказывается на магнитоупругой чувствительности напряженности поля остаточной намагниченности металла, что согласуется с теоретическими формулами. Предположено, что данное обстоятельство справедливо также для постоянных и случайных примесей в химическом составе стали, если изменение их содержания существенно не влияет на магнитоупругую чувствительность напряженности поля остаточной намагниченности металла.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние металла; эффективное механическое напряжение; индикатор механического напряжения металла; химический состав стали; магнитоупругая чувствительность; магнитные параметры; напряженность поля остаточной намагниченности металла.

THE EFFECT OF STRUCTURE AND ELEMENTAL COMPOSITION OF THE ALLOY ON THE RESULTS OF MAGNETIC CONTROL OF THE STRESS-STRAIN SATE OF METAL

© Rinat V. Zagidulin, Timur R. Zagidulin, Kirill O. Osipov

LLC “Scientific and Technical Center “Spector”, “Interunis” Individual Department LLC, Ufa, Russia;
e-mail: doctech.zagrv@post.com

Submitted October 12, 2017.

The effect of changes in the chemical composition and structure of structural steel on the results of magnetic control of the stress-strain state of the metal is studied using data on the field strength of the residual magnetization. It is shown that data of magnetic control reveal changes in the stress-strain state of the metal in the region with significant changes in the structure and chemical composition. This approach is based on the control of the electrical conductivity of the metal, which is highly sensitive to changes in the structure, phase and chemical composition of structural steel. In the field of significant changes in the electrical conductivity of the metal, additional experimental studies should be carried out, including optical metallography and X-ray spectral analysis of metal samples, the results of which are analyzed in combination with the obtained data of magnetic control of the stress-strain state of the metal and thus determine the reason for the origin of the stress state in the local area of the steel product, which is important in the technical examination of steel products and elements of metal structures. It has been shown experimentally that a significant increase in the carbon content in the

chemical composition of structural steel changes the electrical and magnetic parameters, but almost does not touch the magnetoelastic sensitivity of the field strength of the residual magnetization of the metal that matches theoretical considerations. We assume that this is also valid for constant and random impurities in the chemical composition of steel, if change in their content does not significantly affect the magnetoelastic sensitivity of the field strength of the residual magnetization of the metal.

Keywords: stress-strain state of metal; effective mechanical strain; strain indicator of metal; chemical composition of steel; magnetoelastic sensitivity; magnetic parameters; field strength of residual magnetization.

Напряженное состояние металла стального изделия может быть обусловлено различными причинами, например:

действующими и/или остаточными механическими напряжениями металла в результате пластической деформации;

структурными изменениями и фазовыми превращениями в металле;

недопустимыми отклонениями в химическом составе сплава.

Указанные факторы оказывают влияние на структурно-чувствительные магнитные параметры металла, поэтому их следует учесть при магнитном контроле напряженного состояния стальных изделий [1 – 4].

Механические свойства конструкционных сталей зависят от структуры, фазового и химического составов сплава, которые должны удовлетворять требованиям стандарта [5]. Их влияние на результаты магнитного контроля напряженного состояния металла конструкционных сталей учитывают путем использования предварительно полученных на стандартных образцах эмпирических зависимостей магнитных параметров металла от механического напряжения [6]. При оценке напряженного состояния металла априорно допускается, что случайные отклонения в химическом составе стали данной марки в пределах, регламентированных нормативными документами, незначительно влияют на полученные эмпирические зависимости.

Однако практика технической экспертизы элементов металлоконструкций показывает, что локальные изменения структуры, фазового и химического составов металла, выходящие за допускаемые пределы, могут наблюдаться и в рамках одной марки стали. При этом учесть влияние этих случайных отклонений на результаты магнитного контроля напряженного состояния металла путем получения соответствующих эмпирических зависимостей практически невозможно.

Вероятную причину возникновения области с повышенными механическими напряжениями металла, выявленной магнитным методом контроля, можно установить путем дополнительных исследований (контроля электропроводности металла, оптической металлографии, спектрального анализа и т.д.) [2, 4].

При магнитном контроле напряженного состояния металла по остаточной намагниченности напряженность поля остаточной намагниченности над поверхностью деформированного стального изделия зависит от величины эффективного механического напряжения, которая определяется аналитическим выражением [7]

$$H_r(\sigma_x, \sigma_y) = H_{r0} + \lambda_s H_{r0} \sigma_{\text{эфф}} / \mu_0 M_s^2 N, \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{эфф}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - 2\eta\sigma_x\sigma_y}$ — эффективное (действительное) механическое напряжение металла (для плоского напряженного состояния); H_{r0} — напряженность поля остаточной намагниченности металла при отсутствии механических напряжений ($\sigma_{x0} = \sigma_{y0} = 0$); λ_s — магнитострикция насыщения; M_s — намагниченность насыщения металла; σ_0 — магнитная постоянная; N — размагничивающий фактор остаточно намагниченного участка металла; η — коэффициент Пуассона.

Заметим, что эффективное механическое напряжение металла в формуле (1) получено исходя из выражения для удельной потенциальной энергии деформации металла в плоском напряженном состоянии [8]:

$$u(x, y) = \frac{1}{2E} (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - 2\eta\sigma_x\sigma_y) = \frac{\sigma_{\text{эфф}}^2}{2E},$$

где E — модуль упругости.

На рис. 1, а показано экспериментально измеренное индикатором механического напряжения металла ИН-01м распределение нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности (в виде круговой диаграммы) по периметру ступицы рабочего колеса внешним диаметром около 900 мм ротора низкого давления (РНД) газовой турбины, коррелирующей с величиной остаточных эффективных механических напряжений металла.

В рабочих колесах РНД, изготовленных из слитков высоколегированной стали, в процессе ремонта возникли недопустимые изменения размеров и коробление металла на осевой поверхности. Было предположено, что возможной причиной возникновения осложнений могут быть от-

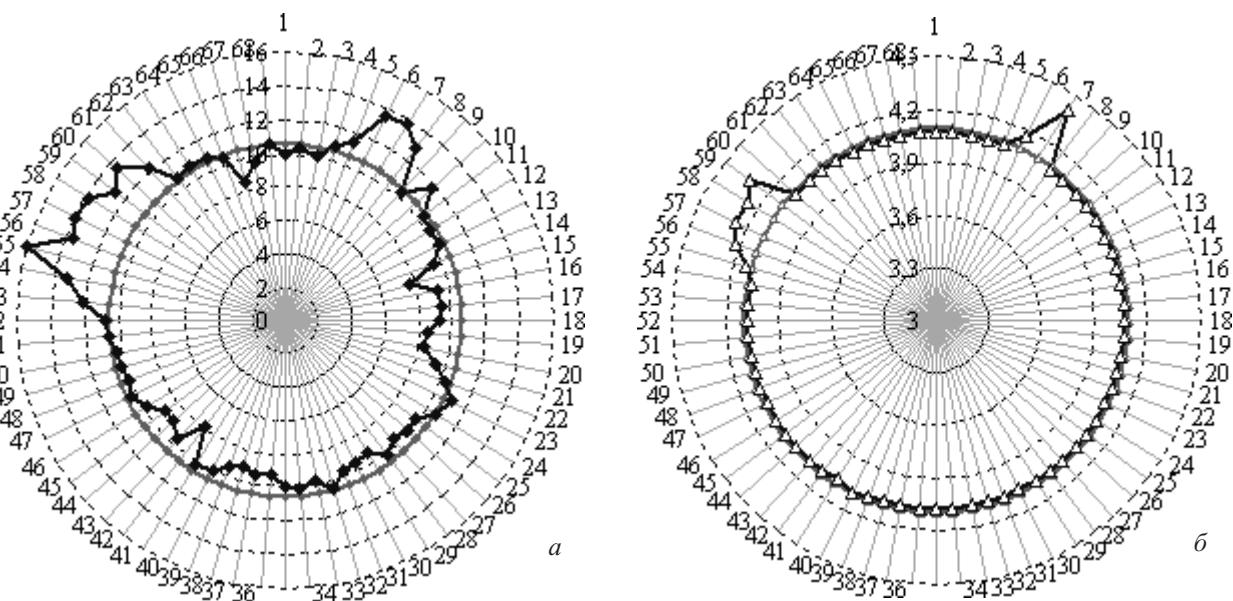


Рис. 1. Распределение механических напряжений (*а*) и удельной электрической проводимости металла (*б*) вдоль поверхности рабочего колеса

клонения в химическом составе легированной стали.

Для выявления мест с существенными отклонениями химического состава стали по результатам магнитного контроля напряженного состояния металла проведен дополнительный контроль электропроводности стали с помощью микроомметра МИКО-10 (рис. 1, *б*). По результатам этого контроля области с повышенными остаточными механическими напряжениями металла рабочих колес были разделены на две группы:

с повышенной удельной электрической проводимостью металла, вероятно, связанной с отклонениями в химическом составе стали и остаточными механическими напряжениями металла (см. рис. 1, *б*);

с неизменной электропроводностью металла, скорее всего, связанной лишь с остаточными механическими напряжениями металла из-за неточности расточек вала РНД и осевой поверхности рабочих колес.

В результате проведения спектрального анализа образцов, взятых в областях с повышенными остаточными механическими напряжениями металла рабочих колес РНД, на микрорентгеноспектральном анализаторе «JXA-6400» были установлены отклонения в химическом составе высоколегированной стали.

Приведем концентрации примесей (%) в металле рабочих колес, полученные в областях с повышенными остаточными механическими напряжениями металла. Колесо 35-й ступени — 1,78 Cr; 0,19 Cu; 0,42 Mn; 0,53 Mo; 3,08 Ni; 0,32 Si; 0,16 V; колесо 40-й ступени — 2,07 Cr; 0,07 Cu; 0,45 Mn; 0,69 Mo; 3,66 Ni; 0,20 Si; 0,16 V. Эти дан-

ные сопоставляли с химическим составом стали, приведенным в ТУ 108.11.847-87, %: 0,25 – 0,3 C; 1,3 – 1,7 Cr; ≤ 0,20 Cu; 0,3 – 0,6 Mn; 0,5 – 0,7 Mo; 3,40 – 3,80 Ni; ≤ 0,015 P; ≤ 0,015 S; ≤ 0,1 Si; 0,12 – 0,18 V. Выявлены существенные отклонения по содержанию легирующих элементов, таких как хром, медь, никель и кремний. Например, в химическом составе металла рабочего колеса РНД-1 35-й ступени имело место превышение содержания хрома (примерно на 5 %), понижение содержания никеля (на 9,4 %) и превышение содержания кремния (в 3,2 раза).

В результате проведения комплексного магнитного контроля напряженного состояния металла установлено, что возникновение коробления рабочих колес РНД в основном связано с отклонениями в химическом составе стали от требований ТУ 108.11.847-87.

На рис. 2 показана графическая развертка поверхности бурильной трубы внешним диаметром 140 мм и длиной около 10 метров (не включая области ниппеля и муфты) с распределением напряженности поля остаточной намагниченности в виде контурной диаграммы, коррелирующим с величиной остаточных механических напряжений металла. Диагностируемые стальные бурильные трубы разрушались в процессе эксплуатации раньше установленного производителем срока.

На поверхности стальной трубы выявлены локальные области как с повышенным, так и с пониженным уровнями остаточных механических напряжений металла, что указывает на наличие значительной неоднородности в их распределении. Измерения электропроводности метал-

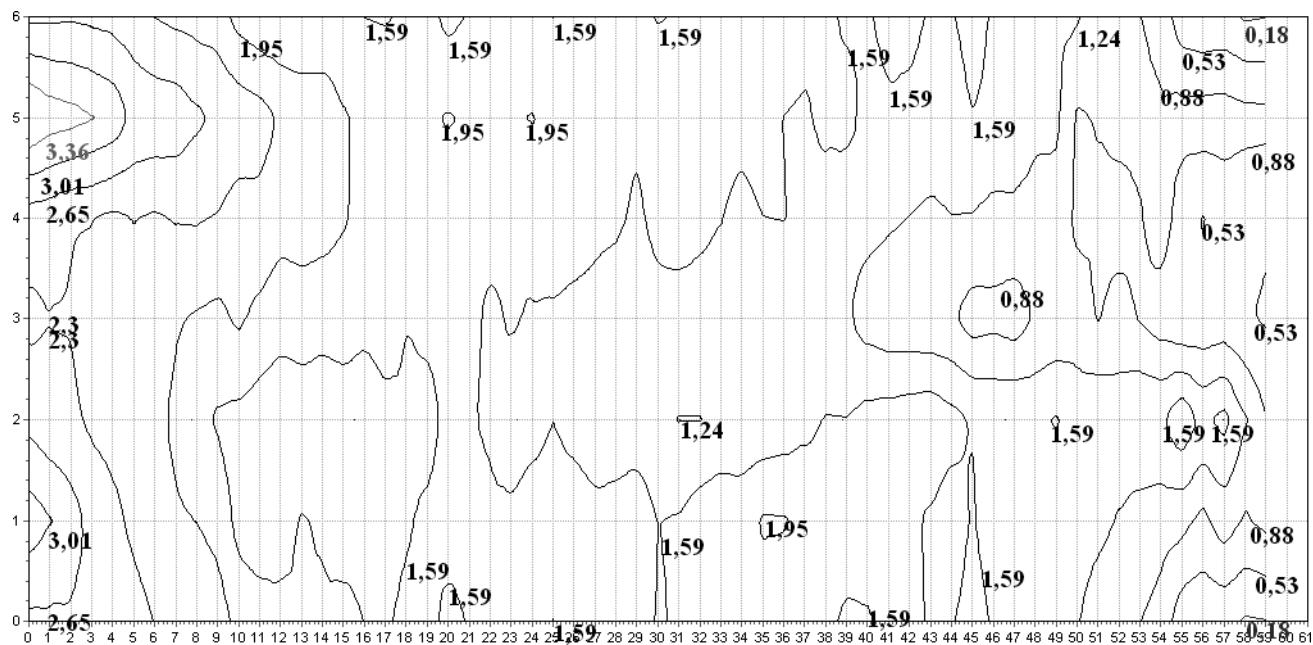


Рис. 2. Распределение механических напряжений металла на поверхности бурильной трубы

ла в областях с повышенным уровнем остаточных механических напряжений металла показали в них пониженные значения удельной электрической проводимости металла (рис. 2).

Приведем результаты спектрального анализа (%) образцов металла бурильной трубы, взятых в областях с повышенными остаточными механическими напряжениями металла. Химический состав металла бурильной трубы в точке № 6 — 0,47 Si; 0,99 Cr; 0,62 Mn; 96,05 Fe; 1,33 Ni; 0,36 Mo; 0,18 C; в точке № 27 — 0,55 Si; 1,07 Cr; 0,63 Mn; 95,95 Fe; 1,39 Ni; 0,26 Mo; 0,15 C. На основе сопоставления этих данных с химическим составом стали по ГОСТ 4543 – 71 (0,17 – 0,37 Si; 0,45 – 0,75 Cr; 0,50 – 0,80 Mn; 95,87 – 97,15 Fe; 1,00 – 1,40 Ni; 0,00 Mo; 0,36 – 0,44 C) установлено, что содержание таких химических элементов, как углерод, кремний, хром, молибден, в металле бурильной трубы превышает допустимый уровень на 45 – 250 %. Результаты этих исследований показали, что снижение прочностных характеристик бурильных труб связано с отклонениями в химическом составе стали от требований ГОСТ 4543–71 и возможными нарушениями технологии изготовления, которые привели к возникновению областей металла с повышенными остаточными механическими напряжениями.

Известно, что увеличение содержания углерода в химическом составе конструкционных сталей более чем на 0,1 % приводит к значительному ухудшению их магнитных свойств: уменьшается намагниченность насыщения, растут коэрцитивная сила и остаточная намагниченность металла, снижается величина магнитострикции

насыщения [9]. Можно предположить, что изменения концентрации углерода и других постоянных и случайных примесей в химическом составе конструкционных сталей весьма слабо влияет на характер зависимости напряженности поля остаточной намагниченности от механического напряжения.

Это предположение основано на том, что зависимость магнитоупругой чувствительности напряженности поля остаточной намагниченности в формуле (1) от основных магнитных параметров металла имеет вид

$$\beta_{H_r} = \partial H_r / \partial \sigma_{\text{эфф}} = \lambda_s H_{r0} / \mu_0 M_s^2 N.$$

Проведены экспериментальные исследования влияния содержания углерода в химическом составе конструкционных сталей марок 09Г2С и 20 на зависимость напряженности поля остаточной намагниченности металла от величины механического напряжения (1).

В исходном состоянии содержание углерода в химическом составе стали 09Г2С не превышает 0,12 %, а в химическом составе стали 20 — не более 0,24 %. Для значительного повышения концентрации углерода проводили химико-термическую обработку (цементацию) стальных образцов размером 200 × 30 × 5 мм, изготовленных из указанных марок сталей, в твердом карбюризаторе — в среде древесного угля с незначительными добавками углекислых солей.

Цементацию стальных образцов осуществляли при температуре 925 °C в течение 5 ч. При

этом расчетная глубина цементации металла составляет около 0,5 мм, а содержание углерода в поверхностном слое металла возрастает до 1,2 %, т.е. после цементации содержание углерода в поверхностном слое металла увеличивается в 5–10 раз. Такое значительное увеличение содержания углерода в химическом составе конструкционных сталей приводит к заметному изменению электрических и магнитных параметров металла.

В таблице приведены экспериментально измеренные значения некоторых электрических и магнитных параметров металла стальных образцов, изготовленных из стали марки 09Г2С, в исходном состоянии и после цементации металла: удельные электрические сопротивления металла ρ , измеренные микроомметром МИКО-10, и их средние значения $\langle \rho \rangle$; коэрцитивные силы металла H_c , определенные магнитным структуроскопом КРМ-Ц, и их средние значения $\langle H_c \rangle$; напряженности поля остаточной намагниченности металла H_{r0} , измеренные индикатором механического напряжения металла ИН-01м, и их средние значения $\langle H_{r0} \rangle$; средние значения магнитной индукции насыщения металла $\langle B_s \rangle$, измеренные микровеберметром Ф-199.

Из таблицы видно, что наибольшее отклонение экспериментально измеренных величин электромагнитных параметров ρ и H_c стальных образцов от их средних значений (в исходном состоянии и после цементации металла) не превышает 2,5 %, а для параметра H_{r0} — 5 %.

После цементации образца из стали 09Г2С среднее удельное электрическое сопротивление металла увеличивается на 12 %, коэрцитивная сила металла — примерно на 13 %, напряженность поля остаточной намагниченности металла — более чем на 21 %, магнитная индукция насыщения металла уменьшается примерно на 8 %, что хорошо согласуется с ранее опубликованными экспериментальными данными [9].

Экспериментально измерить величину магнитострикции насыщения металла стальных образцов не удалось. Известно, что повышение содержания кремния (углерод и кремний принадлежат одной группе периодической системы химических элементов) в электротехнической стали на 1 % приводит к снижению магнитострикции насыщения примерно на 40 % [9]. С учетом этого (см. таблицу) расчетные значения магнитоупругой чувствительности напряженности поля остаточной намагниченности от эффективного механического напряжения согласно формуле (1) для стали 09Г2С в исходном состоянии и после цементации будут примерно равны.

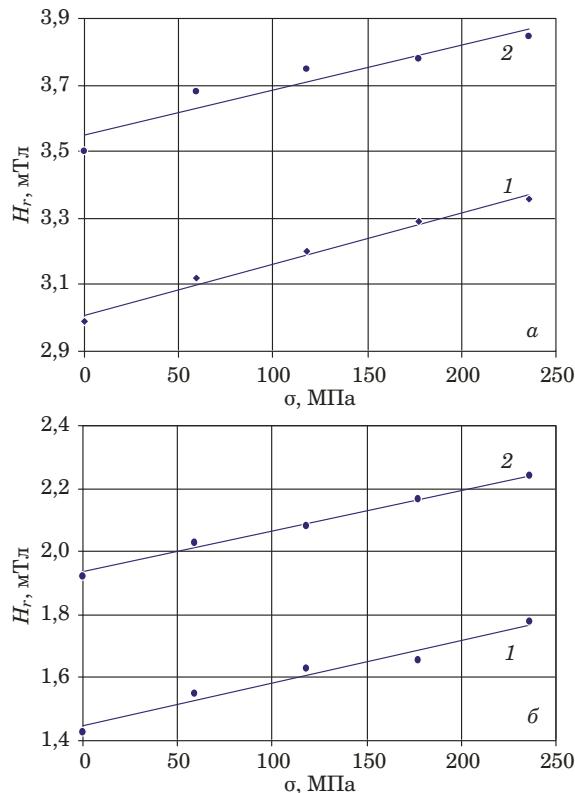


Рис. 3. Зависимости напряженности поля остаточной намагниченности металла от механического напряжения для стали 09Г2С (а) и для стали 20 (б): 1 — исходное состояние металла; 2 — после цементации

На рис. 3 приведены экспериментально полученные зависимости напряженности поля остаточной намагниченности металла от механического напряжения стальных образцов в исходном состоянии и после цементации. Стальные образцы подвергали изгибной деформации, при которой на одной из поверхностей возникают наибольшие в сечении механические напряжения растяжения металла ($\sigma > 0$), на другой (противоположной) — наибольшие механические напряжения сжатия металла ($\sigma < 0$) [8]. В этом случае величина эффективного механического напряжения в формуле (1) равна механическому напряже-

Электромагнитные параметры стали 09Г2С

Параметры	Исходное состояние металла			Состояние металла после цементации		
	1	2	3	1	2	3
ρ , нОм/м	244	243	243	273	273	273
$\langle \rho \rangle$, нОм/м	243,3			273		
H_c , А/см	4,7	4,8	4,5	5,4	5,1	5,3
$\langle H_c \rangle$, А/см	4,67			5,27		
H_{r0} , мТл	3,2	2,9	2,9	3,74	3,57	3,62
$\langle H_{r0} \rangle$, мТл	3,0			3,64		
$\langle B_s \rangle$, Тл	1,33			1,22		



Рис. 4. Схема магнитного контроля напряженного состояния металла

жению в одноосном напряженном состоянии металла ($\sigma_{\text{эфф}} = \sigma$).

Экспериментальные точки на рис. 3 получены по средним значениям нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности металла, измеренным над поверхностью трех стальных образцов индикатором механического напряжения металла ИН-01м. Видно, что экспериментальные зависимости напряженности поля остаточной намагниченности металла от механического напряжения хорошо согласуются с расчетной формулой (1).

Наклон экспериментальных кривых к оси абсцисс (см. рис. 3), полученных для стальных образцов в исходном состоянии и после цементации металла, примерно одинаков, при этом они хорошо интерполируются полиномами первого порядка. Например, для образцов, изготовлен-

ных из конструкционной стали 09Г2С, в исходном состоянии металла получаем

$$H_r(\sigma) = 3,01 + 0,0015\sigma, \quad (2a)$$

после цементации металла —

$$H_r(\sigma) = 3,55 + 0,0014\sigma \quad (2b)$$

(достоверность аппроксимации $R^2 = 0,9$).

Для образцов, изготовленных из конструкционной стали 20, в исходном состоянии металла имеем

$$H_r(\sigma) = 1,45 + 0,0043\sigma, \quad (3a)$$

после цементации металла —

$$H_r(\sigma) = 1,93 + 0,0041\sigma \quad (3b)$$

(достоверность аппроксимации $R^2 = 0,99$).

Из формул (2) – (3) следует, что магнитоупругие коэффициенты перед параметром σ в эмпирической зависимости напряженности поля остаточной намагниченности от механического напряжения металла для образцов конструкционных сталей в исходном состоянии и после цементации металла отличаются друг от друга не более чем на 5 %.

Таким образом, существенное увеличение содержания углерода в химическом составе конструкционных сталей марок 09Г2С и 20 практически не повлияло на характер зависимости напряженности поля остаточной намагниченности от механического напряжения (1). Поэтому оценку приращения механического напряжения металла конструкционных сталей с отклонениями содержания углерода в химическом составе сплава можно проводить на основе экспериментальной зависимости напряженности поля остаточной намагниченности от величины механического напряжения металла, предварительно полученной на стальных образцах из конструкционных сталей в исходном состоянии металла путем проведения механических испытаний на растяжение.

Можно предположить, что данное обстоятельство может быть справедливо и для других примесей, содержащихся в конструкционных сталях, если изменение их концентрации в химическом составе сплава приводит к разнонаправленному изменению основных магнитных параметров металла, входящих в формулу зависимости напряженности поля остаточной намагниченности от величины механического напряжения.

На рис. 4 показана схема магнитного контроля напряженного состояния металла, в которой предусмотрен комплексный подход, включа-

ющий контроль электропроводности металла, рентгеноспектральный анализ и оптическую металлографию. Она показала свою эффективность в практике технической экспертизы стальных изделий и металлоконструкций, результаты которой частично отражены в работах [2, 10]. Согласно этой схеме на начальном этапе магнитного контроля напряженного состояния металлоконструкции индикатором механического напряжения металла выявляют области с повышенными механическими напряжениями. Далее в этих областях металла с помощью микроомметра осуществляют контроль изменения электропроводности относительно ненапряженного участка металла. На основе сравнения полученных результатов принимают решение о вероятной причине возникновения локальной области с повышенными механическими напряжениями металла. При необходимости назначают дополнительные исследования металла, включающие рентгеноспектральный анализ и оптическую металлографию.

На завершающем этапе магнитного контроля напряженного состояния металла в областях с повышенными механическими напряжениями металла оценивают величину эффективного механического напряжения $\sigma_{\text{эфф}}$ или ее приращения $\Delta\sigma_{\text{эфф}}$ относительно выбранного базового значения в сложном (плоском, объемном) напряженном состоянии металла.

Очевидно, что результаты комплексного магнитного контроля напряженного состояния металла имеют высокую надежность и позволяют объективно оценивать фактическое состояние металла стального изделия, элемента металлоконструкции.

Таким образом, в результате комплексного магнитного контроля напряженного состояния и электропроводности металла можно выявить области с повышенными механическими напряжениями, а также с существенными изменениями структуры и химического состава металла.

Увеличение содержания углерода в конструкционных сталях изменяет электропроводность, но практически не влияет на характер зависимости напряженности поля остаточной намагниченности от величины механического напряжения металла. Это обстоятельство может быть спрятано также для других примесей в конструкционных сталях, если изменение их концентрации в химическом составе сплава приводит к разнонаправленному изменению основных магнитных параметров металла, входящих в формулу зависимости напряженности поля остаточной намагниченности от величины механического напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

- Попов Б. Е., Левин Е. А., Котельников В. С. и др. Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса сосудов, работающих под давлением / Безопасность труда в промышленности. 2001. № 3. С. 25 – 30.
- Загидуллин Т. Р. Применение индикатора механического напряжения металла ИН-01 при технической диагностике и экспертизе элементов металлоконструкций / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2014. Т. 80. № 9. С. 62 – 66.
- Загидуллин Р. В., Загидуллин Т. Р., Абдрахманов Р. Г. Контроль усилия затяжки стальных болтов и шпилек с помощью индикатора механического напряжения металла ИН-01 / Контроль. Диагностика. 2012. № 4. С. 15 – 23.
- Р. В. Загидуллин и др. Методика исследования напряженно-деформированного состояния металла стальных изделий и элементов металлоконструкций. — М.: ФБУ РФЦСЭ при Министерстве России, 2016. — 34 с.
- ГОСТ 1497-84. Сталь углеродистая обыкновенного качества. — М.: Изд-во стандартов, 1984.
- ГОСТ 10006-80. Трубы металлические. Методы испытания на растяжение. — М.: Изд-во стандартов, 1980.
- Загидуллин Р. В., Загидуллин Т. Р., Аминев А. Ф. Зависимость напряженности поля остаточной намагниченности от величины механических напряжений в плоскости металла / Нефтегазовое дело. 2016. Т. 14. № 1. С. 225 – 233.
- Дарков А. В., Шпиро Г. С. Сопротивление материалов. — М.: Высшая школа, 1989. — 624 с.
- Мишин Д. Д. Магнитные материалы. — М.: Высшая школа, 1981. — 335 с.
- Загидуллин Т. Р., Загидуллин Р. В., Горчаков Р. К. Применение магнитного контроля напряженно-деформированного состояния металла при технической диагностике и экспертизе стальных изделий и элементов металлоконструкций / Контроль. Диагностика. 2015. № 3. С. 54 – 61.

REFERENCES

- Popov B. E., Levin E. A., Kotel'nikov V. S., et al. Magnetic inspection of stressed state and residual service life of vessels working under pressure / Bezopasn. Truda Promyshl. 2001. N 3. P. 25 – 30 [in Russian].
- Zagidulin T. R. Application of IN-01m the mechanical strain of metal indicator in technical diagnosing and inspecting of metal structures elements / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2014. Vol. 80. N 9. P. 62 – 66 [in Russian].
- Zagidulin R. V., Zagidulin T. R., Abdrachmanov R. G. Inspecting steel bolts and studs tightening effort by IN-01m the mechanical strain indicator of metal / Kontrol. Diagn. 2012. N 4. P. 15 – 23 [in Russian].
- Zagidulin R. V. et al. Guidelines of steel items made from magnetic materials stress-strain state inspection. — Moscow: FBU RFTsSÉ pri Minyuste Rossii, 2016. — 34 p. [in Russian].
- GOST1497-84. Ordinary quality structural carbon steel. — Moscow: Izd-vo standartov, 1984 [in Russian].
- GOST 10006-80. Metal pipes. Techniques of tensile tests. — Moscow: Izd-vo standartov, 1980 [in Russian].
- Zagidulin R. V., Zagidulin T. R., Aminev A. F. Residual magnetic field strength dependence on mechanical strain value in the plane of metal / Neftegaz. Delo. 2016. Vol. 14. N 1. P. 225 – 233 [in Russian].
- Darkov A. V., Shpilo G. S. Strength of the materials. — Moscow: Vysshaya shkola, 1989. — 624 p. [in Russian].
- Mishin D. D. Magnetic materials. — Moscow: Vysshaya shkola, 1981. — 335 p. [in Russian].
- Zagidulin T. R., Zagidulin R. V., Gorchakov R. K. Stress-strain state of metal evaluating magnetic technique practice in technical diagnostics and forensic inspection of steel parts and constructions / Kontrol. Diagn. 2015. N 3. P. 54 – 61 [in Russian].