



УДК: 624.21

DOI: 10.52409/20731523_2022_2_24

EDN: BLOVRM



Исследования коэрцитивной силы стальных конструкций мостовых сооружений.

И. Ю. Майстренко¹, Т. А. Зиннуров¹, Т. И. Майстренко², Д. И. Ерохин²,
В.С.Малыгин²

¹ Казанский государственный архитектурно-строительный университет г. Казань,
Российская Федерация

² ООО Научно-производственный центр «Строй-Экспертиза» г. Казань, Российская
Федерация

Аннотация: Современный метод неразрушающего контроля, основанный на измерении коэрцитивной силы, демонстрирует возможности анализа напряженно-деформированного состояния для любых стальных конструкций, особенно для наиболее ответственных мостовых сооружений. Цель исследования состоит в оценке статистической изменчивости коэрцитивной силы и достоверности перехода между напряжениями и коэрцитивной силы в стальных конструкциях мостовых сооружений. Основные результаты исследования состоят в получении статистических характеристик коэрцитивной силы для стали марки СтЗсп5 толщиной 8 мм в состоянии поставки, после механической обработки образцов и в процессе нагружения образцов. Результаты, полученные методом доверительных интервалов на основе гипотезы о нормальном распределении случайной величины коэрцитивной силы, хорошо согласуются с результатами аналогичных исследований стали СтЗ, а именно с критическим значением коэрцитивной силы 6...7 А/см (600...700 А/м). Исследования и методические приемы предложенные авторами, продемонстрировали процесс совершенствования системы оценки характерных критических значений коэрцитивной силы с определенным уровнем достоверности по данным серии механических испытаний пропорциональных контрольных образцов. Метод анализа коэрцитивной силы позволит оперативно оценивать переход стали из упругой в упругопластическую и пластическую зону деформации. Значимость для строительной отрасли заключается в обеспечении своевременного выявления тех конструктивных элементов мостовых сооружений, состояние которых не в полной мере отвечает требованиям безопасной эксплуатации. Исследование динамики изменчивости коэрцитивной силы в течение всего жизненного срока цикла мостовых сооружений позволит использовать полученную информацию для оптимального планирования ремонтных мероприятий.

Ключевые слова: коэрцитивная сила, механические испытания, статистический анализ, функция распределения вероятностей, надежность.

Для цитирования: И. Ю. Майстренко, Т. А. Зиннуров, Т. И. Майстренко, Д. И. Ерохин, В. С. Малыгин Исследования коэрцитивной силы стальных конструкций мостовых сооружений // Известия КГАСУ 2022 №2 (60) С.24-36, DOI:10.52409/20731523_2022_2_24 EDN: BLOVRM

Studies of coercive force of steel structures of bridge structures

I. Y. Majstrenko¹, T. A. Zinnurov¹, T. I. Maistrenko²
D. I. Erokhin², V. S. Malygin²

¹Kazan State University of Architecture and Engineering Kazan, Russian Federation

²Scientific and production center "Sroy-Expertisa" Ltd. Kazan, Russian Federation

Abstract: The modern method of non-destructive testing based on the measurement of coercive force demonstrates the possibility of analyzing the stress-strain state for any steel structures, especially for the most critical bridge structures. The purpose of the study is to evaluate the statistical variability of the coercive force and the reliability of the transition between stresses and coercive force in the steel structures of bridge structures. The main results of the study are to obtain the statistical characteristics of the coercive force for steel grade St3sp5 with a thickness of 8 mm in the state of delivery, after machining the samples and in the process of loading the samples. The results obtained by the method of confidence intervals based on the hypothesis of the normal distribution of the random value of the coercive force are in good agreement with the results of similar studies of steel St3, namely, with the critical value of the coercive force of 6...7 A/cm (600...700 A/m). The studies and methodological techniques proposed by the authors demonstrated the process of improving the system for evaluating the characteristic critical values of the coercive force with a certain level of reliability according to a series of mechanical tests of proportional control samples. The method of analysis of the coercive force will make it possible to quickly evaluate the transition of steel from elastic to elastic-plastic and plastic deformation zones. The significance for the construction industry lies in ensuring the timely identification of those structural elements of bridge structures, the condition of which does not fully meet the requirements for safe operation. The study of the dynamics of the variability of the coercive force during the entire life cycle of the bridge structures will allow using the information obtained for optimal planning of repair activities.

Keywords: coercive force, mechanical tests, statistical analysis, probability distribution function, reliability.

For citation: I. Y. Maistrenko, T. A. Zinnurov, T. I. Maistrenko, D. I. Erokhin, V. S. Malygin Results of a laboratory study of flat samples made of rolled steel St3sp5 with registration of coercive force values// News KSUAE,2022 №2(60), P.24-36 DOI:10.52409/20731523_2022_2_24 EDN: BLOVRM

1. Введение

На современном этапе развития науки и технологий происходит интенсивное совершенствование контрольно-приборного оборудования. Приборы специалисту-обследователю позволяют получать больший объем информации о наличии или отсутствии дефектов и повреждений обследуемых конструкций мостовых сооружений. Совершенствование оборудования происходит за счет увеличения чувствительности приборов, улучшенной визуализации и автоматической обработки результатов контроля.

Необходимо указать на некоторые ограничения возможности использования отдельных методов контроля. Эти ограничения в большей степени связаны с несовершенством методики интерпретации результатов неразрушающего контроля. В частности, для мостовых сооружений недостаточно для практики проработана методология оценки поврежденности стальных конструкций с применением приборов, основанных на методе коэрцитивной силы. Метод, основанный на контроле коэрцитивной силы, входит в группу методов неразрушающего контроля магнитного

вида несмотря на то, что в смежных областях знаний данный метод достаточно активно используется, даже на уровне нормативных источников¹.

Большинство исследований направлены на изучение усталостных повреждений, которые сопровождаются движением дислокаций в стальных образцах. Теоретические и экспериментальные исследования авторов демонстрируют, что наиболее важным магнитным параметром для измерения напряженно-деформированного состояния ферритовых сталей является коэрцитивная сила H_c . Попов В. предложили поправочный коэффициент уточнения H_c для различных толщин углеродистой стали [1]. Коэффициент может количественно оценить степень повреждения конструкционных сталей, используемых в металлических конструкциях крана. Аналогичные исследования в данном направлении ведутся другой группой авторов Xin W., Ding K., Ботвина Л.Р., Левин В.П., Тютин М.Р. и другие [2, 3].

Многие авторы проводят исследования, направленные на изменения механических свойств сталей, а магнитные методы могут быть использованы для контроля состояния упрочненного материала. Авторы Макаров А.В., Горкунов Е.С., Иванов А.М., Васильченко С.С. рассматривают механические и термические способы упрочнения, применяемые на наиболее распространенных строительных сталях Ст3, 15ХН4Д и 09Г2С [4-8]. Из списка магнитных параметров коэрцитивная сила наиболее чувствительна к структурным изменениям в процессе статических и циклических нагружений. По мнению авторов, коэрцитивная сила может служить параметрами для контроля и диагностирования качества стали. В работе Kikuchi H. Kamada Y. продемонстрирована однозначная взаимосвязь между магнитными и механическими характеристиками стали [9].

Наиболее интересны работы Иванов А.М. и Курашкин К.В., где исследованы зависимости коэрцитивной силы от одноосных и двухосных напряжений в сварных соединениях из сталей Ст3, 20, 09Г2С и 13Г1С-У [4, 10]. Измерения коэрцитивной силы проводились в центральной части пластины во взаимно перпендикулярных направлениях. По результатам проведенного исследования, автором выдвинуто предположение в виде аналитической зависимости между величиной коэрцитивной силы от одноосных H_{C1}^0 и двухосных H_{C2}^0 напряжений и остаточными осевыми σ_1 и кольцевыми σ_2 напряжениями:

$$H_{C1}^0 = H_{C1}^0 + q_{11}\sigma_1 + q_{12}\sigma_2, \quad (1)$$

$$H_{C2}^0 = H_{C2}^0 + q_{21}\sigma_1 + q_{22}\sigma_2, \quad (2)$$

где q_{ij} – коэффициенты, значения которых зависят от магнитострикции, магнитной анизотропии материала, от вида напряженного состояния.

Авторами Карпунин И.И., Корнилова А.В., Тет П. сформулирована функциональная зависимость эффективного объема V_d макродефекта от отношения величин коэрцитивной силы над дефектом и над бездефектным участком на примере обследования тяжело нагруженного металлургического оборудования:

$$V_d = 272,8 \cdot \ln \frac{H_{сд}}{H_{сбд}} + 40,25 \text{ мм}^3, \quad (3)$$

где: $\overline{H_{сбд}}$ – среднее значение коэрцитивной силы над бездефектным участком зачищенной поверхности образца; $H_{сд}$ – значение коэрцитивной силы над дефектом по экспериментальным данным [11].

В работе авторов Попов Б.Е. и другие показаны методические приемы использования магнитного контроля напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса сосудов, работающих под давлением [1, 12]. Зависимость, связывающая текущее значение коэрцитивной силы H_c с ее исходным значением H_c^0 и соответствующим числом циклов нагружений N , аппроксимируется уравнением

$$H_c = H_c^0 + b \times \ln N, \quad (4)$$

¹ РД ИКЦ «Кран»-007-97-02. Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса подъемных сооружений при проведении их обследования и техническом диагностировании (экспертизе промышленной безопасности). – Москва, 1997. – 62 с.

где b – коэффициент, определяющий скорость роста H_c . Выразив из выражения (4) N , получим

$$N = C_1 \times \exp(C_2 \times H_c), \quad (5)$$

где C_1 и C_2 – постоянные, определяемые из решения системы трех уравнений с тремя неизвестными (N_0 , C_1 и C_2), получаемые после подстановки результатов трех измерений коэрцитивной силы $H_{C,i}$ с интервалами ΔN_2 и ΔN_3 : ($N_0, H_{C,1}$), ($N_0 + \Delta N_2, H_{C,2}$), ($N_0 + \Delta N_3, H_{C,3}$); N_0 – число циклов нагружений, соответствующее первому измерению коэрцитивной силы $H_{C,1}$.

В работе Майстренко И.Ю. и других авторов представлен обобщенный алгоритм анализа структурного состояния стали конструктивных элементов мостовых сооружений состоящий из шести основных этапов [13].

Нужно отметить, что недостаточно исследований направленных на установление определенных зависимостей между механическими и магнитными характеристиками сталей в различных состояниях. В связи с этим целью исследования – является оценка статистической изменчивости коэрцитивной силы и достоверности перехода между напряжениями и коэрцитивной силы в стальных конструкциях мостовых сооружений.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- установить закон распределения значений коэрцитивной силы для стали марки СтЗсп5 толщиной 8 мм. на основе экспериментальных данных;
- обосновать надежность получаемых значений коэрцитивной силы при различных уровнях напряжений в стальных конструкциях мостовых сооружений.

Исследование даст научно обоснованную форму для оценки остаточного ресурса строительных конструкций мостов.

2. Материалы и методы

Статистическое исследование, проведенное в данной работе, включало два основных этапа. Первый этап состоял в исследовании значений коэрцитивной силы в плоских образцах из стали СтЗсп5 толщиной 8 мм. Второй этап предусматривал испытание трёх пропорциональных образцов на растяжение с регистрацией значений коэрцитивной силы на разрывной машине серии ИР 5082-500.

На первом этапе проведем статистическое исследование значений коэрцитивной силы в плоских образцах из стали СтЗсп5. Образцы заранее подготовленных для испытаний на растяжение, следовательно, размеры образцов приняты по габаритам разрывной машины. В таблице 1 представлены принятые размеры плоских образцов из стали СтЗсп5 толщиной 8 мм. Для определения значений коэрцитивной силы используется коэрцитиметр-структуроскоп КСП-01.

Требования к выборкам, планам испытаний и статистики распределений представлены в национальных стандартах^{2 3}. Руководствуясь указанными требованиями и принимая во внимание общую концепцию плана испытаний объекта исследования, при лабораторном испытании плоских стальных образцов на растяжение принято: допускаемая относительная ошибка (степень точности) $\alpha=0.05$; уровень достоверности $\beta=0.95$.

Таблица 1

Принятые размеры плоских образцов из стали СтЗсп5 толщиной 8 мм

Номер образца	Толщина образца, мм	Ширина образца, мм	Площадь поперечного сечения, мм ²	Длина образца, мм
8-Нс-1	7.75±0.05	72.5±2.0	562.0±19.1	603.0±1.0
8-Нс-2	7.93±0.03	71.5±1.5	567.0±14.0	602.0±1.0
8-Нс-3	7.93±0.05	72.5±2.0	575.0±19.5	599.0±1.0

² ГОСТ 27772-2015. Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия / Утвержден: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 07.04.2016. – 30 с.

³ ГОСТ Р 27.403-2009. Надежность в технике. Планы испытаний для контроля вероятности безотказной работы / Утвержден: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 15.12.2009. – 15 с.

В ходе проведения статистического исследования значения коэрцитивной силы в контрольных образцах, каждый из контрольных образцов размечен на равные десять зон (от 1 до 10). В каждой зоне измерения коэрцитивной силы производились в четырех направлениях $H_C^{0^\circ}$, $H_C^{90^\circ}$, $H_C^{180^\circ}$ и $H_C^{270^\circ}$ под углами 0° , 90° , 180° и 270° соответственно.

Процедура проведения механических испытаний включала для каждого образца вычисление выборочное среднее $\hat{\mu}_{Hc.i}$ и коэффициент вариации $v_{Hc.i}$ коэрцитивной силы:

$$\hat{\mu}_{Hc.i} = \frac{\sum_{k=1}^4 H_C^{\circ}}{4}, \quad (6)$$

$$v_{Hc.i} = \frac{\Delta_{Hc.i}}{\hat{\mu}_{Hc.i}}, \quad (7)$$

где: H_C° – значения коэрцитивной силы при характерных k -х положениях коэрцитиметра-структуроскопа относительно оси контрольного образца, А/м;

$$\Delta_{Hc.i} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^4 (\hat{\mu}_{Hc.i} - H_{C,j}^{\circ})^2}{15}}. \quad (8)$$

В формуле (8) приведена оценка выборочного среднеквадратического отклонения j -х отдельных значений коэрцитивной силы, а также минимальное a_{Hc} и максимальное b_{Hc} значение выборки. Полученные результаты этих измерений и рассчитанные выборочные статистические характеристики по каждому контрольному образцу сведены в таблицу 2.

Второй этап лабораторного исследования пропорциональных стальных образцов из стали СтЗсп5 толщиной 8 мм состоял в их испытании на растяжение с регистрацией значений коэрцитивной силы на разрывной машине серии ИР 5082-500.

Процедура проведения механических испытаний контрольных образцов включала их ступенчатое нагружение испытательной нагрузкой, при которой фиксировалось одно значение коэрцитивной силы в четырех характерных положениях $H_C^{0^\circ}$, $H_C^{90^\circ}$, $H_C^{180^\circ}$ и $H_C^{270^\circ}$ коэрцитиметра-структуроскопа в центральной части (в зонах 4...7), а так же вычислялись для каждой i -й ступени выборочное среднее $\hat{\mu}_{Hc.i}$, коэффициент вариации $v_{Hc.i}$ коэрцитивной силы по формулам (6, 7).

Таблица 2

Результаты исследования значений коэрцитивной силы в плоских образцах из стали СтЗсп5 толщиной 8 мм, подготовленных для испытаний на растяжение

Маркировка образца	Выборочные статистические характеристики				
	μ_{Hc}	Δ_{Hc}	v_{Hc}	a_{Hc}	b_{Hc}
1	2	3	4	5	6
8-Нс-1	344.90 А/м	25.65 А/м	0.0744	302 А/м	412 А/м
8-Нс-2	402.18 А/м	24.02 А/м	0.0597	312 А/м	440 А/м
8-Нс-3	360.65 А/м	18.63 А/м	0.0517	329 А/м	396 А/м
Все образцы	369.24 А/м	33.27 А/м	0.0901	302 А/м	440 А/м

Значения напряжений σ_i и приращений напряжений $\Delta\sigma_i$ вычислялись с учетом начальных фактических отклонений размеров контрольных образцов:

$$\sigma_i = \frac{P_i}{F_0}, \text{ кН/мм}^2, \quad (9)$$

$$\Delta\sigma_i = \frac{\Delta P_i}{F_0}, \text{ кН/мм}^2, \quad (10)$$

где: P_i – усилие, создаваемое испытательным оборудованием (разрывной машиной), кН; $\Delta P_i = P_{i+1} - P_i$ – приращение усилия на очередной ступени нагружения контрольного образца, кН (кгс); F_0 – начальная площадь поперечного сечения контрольного образца, вычисленная с учетом начальных фактических отклонений размеров ширины и толщины проката, мм².

Согласно сертификату на использованный стальной прокат, производитель заявил следующие механические характеристики: временное сопротивление $\sigma_B = 450,0 \text{ Н/мм}^2$; предел текучести $\sigma_T = 325,0 \text{ Н/мм}^2$.

Основные результаты, полученные в ходе механических испытаний трёх стальных образцов из стали СтЗсп5 толщиной 8 мм, представлены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты испытаний на растяжение пропорциональных стальных образцов из стали СтЗсп5 толщиной 8 мм

Маркировка образца / ступень нагружения	Усилие, P_i , кН	Напряжение σ_i , кН/мм ²	Статистические характеристики полученной выборки	
			Среднее значение $\hat{\mu}_{нс.1}$	Коэффициент вариации $\nu_{нс.1}$
1	2	3	4	5
8-Нс-1/1	50	0.089 ± 0.003	356.500	0.120
8-Нс-1/2	100	0.178 ± 0.006	411.813	0.203
8-Нс-1/3	120	0.214 ± 0.007	426.250	0.213
8-Нс-1/4	140	0.249 ± 0.009	425.938	0.188
8-Нс-1/5	160	0.284 ± 0.010	431.813	0.151
8-Нс-1/6	180	0.321 ± 0.011	466.063	0.161
8-Нс-1/7	200	0.356 ± 0.012	500.500	0.168
8-Нс-1/8	258	0.459 ± 0.016	688.375	0.275
8-Нс-2/1	50	0.088 ± 0.002	447.500	0.131
8-Нс-2/2	100	0.177 ± 0.005	512.125	0.190
8-Нс-2/3	120	0.212 ± 0.005	538.188	0.199
8-Нс-2/4	140	0.247 ± 0.006	543.875	0.199
8-Нс-2/5	160	0.282 ± 0.007	543.125	0.188
8-Нс-2/6	180	0.318 ± 0.008	532.750	0.186
8-Нс-2/7	200	0.353 ± 0.009	565.750	0.150
8-Нс-2/8	259	0.457 ± 0.011	688.438	0.275
8-Нс-3/1	50	0.087 ± 0.003	383.063	0.146
8-Нс-3/2	100	0.174 ± 0.006	452.875	0.218
8-Нс-3/3	120	0.209 ± 0.007	462.688	0.232
8-Нс-3/4	140	0.244 ± 0.008	474.125	0.228
8-Нс-3/5	160	0.278 ± 0.010	467.625	0.183
8-Нс-3/6	180	0.313 ± 0.011	480.500	0.161
8-Нс-3/7	200	0.348 ± 0.012	496.563	0.159
8-Нс-3/8	261	0.454 ± 0.016	645.750	0.271

3. Результаты и дискуссия

Для получения расчетных значений параметра с заданным уровнем достоверности может быть использован метод доверительных интервалов, в рамках данного исследования в первом приближении озвучена гипотеза о нормальном распределении случайной величины коэрцитивной силы. Анализируя полученные данные таблицы 2, можно отметить, что по магнитным свойствам сталь весьма неоднородна. Наибольший разброс значений коэрцитивной силы получен для образца 8-Нс-1, который составил 7.44%, наименьший разброс 5.17% зафиксирован для образца 8-Нс-3. Неоднородность стали по магнитным характеристикам может быть связана с изменчивостью толщины проката и дефектами кристаллической решетки, примененной обработкой стали при подготовке контрольных образцов в соответствии с принятыми размерами и различного рода неоднородностями.

Полученные значения обобщенных статистических характеристик выборочных данных, представленных в таблице 2, в целом не противоречат гипотезе о нормальном законе распределения случайной величины коэрцитивной силы, так как наблюдается сравнительно небольшое (порядка 2%) расхождение значений среднего и медианы выборки, а также относительно небольшая положительная асимметрия. Так как полигон распределения коэрцитивной силы обладает положительной асимметрией, то график

эмпирической функции распределения будет вытянут в сторону больших значений (Рис. 1).

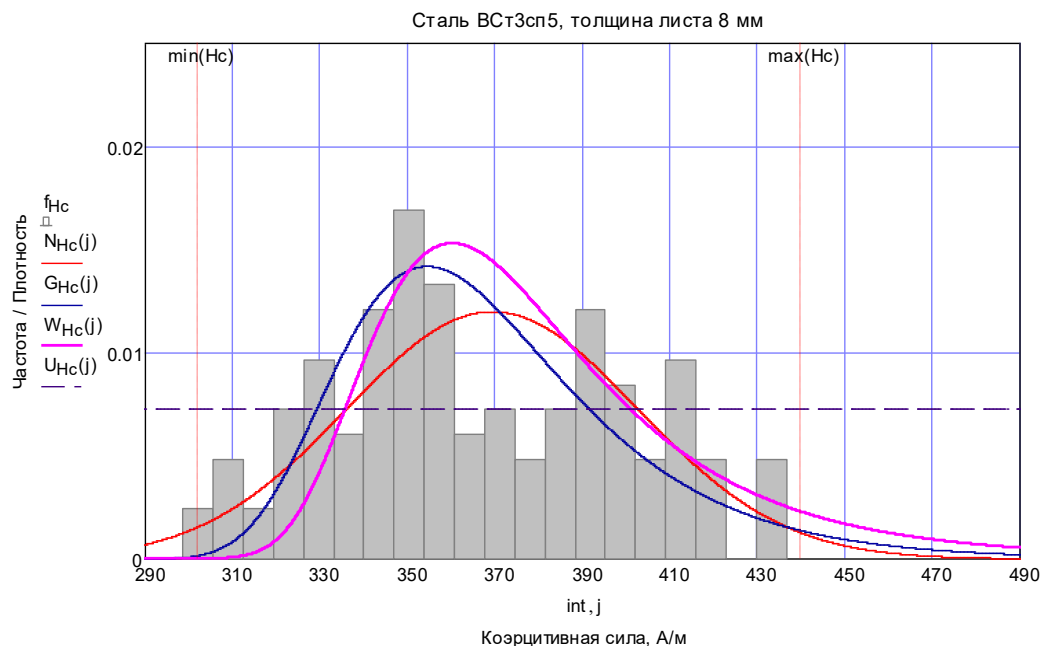


Рис. 1. Гистограмма эмпирической плотности распределения и теоретические кривые плотности распределения: нормальное распределение $N_{Hc}(j)$, трехпараметрическое (смещенное) распределение Вейбулла $W_{Hc}(j)$, распределение экстремальных значений Гумбеля (тип I) $G_{Hc}(j)$ и равномерное распределение $U_{Hc}(j)$

Fig. 1. Histogram of empirical distribution density and theoretical distribution density curves: normal distribution $N_{Hc}(j)$, three-parameter (biased) Weibull distribution $W_{Hc}(j)$, distribution of extreme Gumbel values (type I) $G_{Hc}(j)$ and uniform distribution $U_{Hc}(j)$

При исследовании установлено, что обобщенное значение коэффициента вариации коэрцитивной силы v_{Hc} , равное 9.01%, сопоставимо с разбросом предела текучести стали v_{σ_T} марки Ст3сп5, которое по данным работы Яковлева оценивается на уровне 9.09% [14]. То есть расхождение между v_{σ_T} и v_{Hc} составляет порядка 1%, что не превышает допустимой погрешности 5%, использованного коэрцитиметра-структуроскопа КСП-1. Механические характеристики стали, заявленные производителем в сертификате соответствия, в целом не противоречат полученным результатам механических испытаний стальных пропорциональных образцов.

Учитывая, что для практических расчетов инженер руководствуется требуемым уровнем достоверности расчетных параметров, проведем анализ результатов исследования коэрцитивной силы от состояния поставки к состоянию упругой работы и далее к состоянию пластического деформирования стали, в вероятностной постановке.

В выполненном нами статистическом исследовании было установлено, что для описания коэрцитивной силы в плоских образцах из стали Ст3сп5 возможно использование нормального закона распределения случайной величины, определим границы ожидаемых областей $H_{c,i}^{inf}$ и $H_{c,i}^{sup}$ параметра $H_{c,i}$ с заданным уровнем достоверности на основе известного распределения Стьюдента [15, 16]:

$$H_{c,i}^{inf} < H_{c,i} < H_{c,i}^{sup}, \quad (11)$$

где: $H_{c,i}^{inf} = \hat{\mu}_{Hc,i} - t_{\beta,v} \cdot \frac{\Delta_{Hc,i}}{\sqrt{N}}$ и $H_{c,i}^{sup} = \hat{\mu}_{Hc,i} + t_{\beta,v} \cdot \frac{\Delta_{Hc,i}}{\sqrt{N}}$ – соответственно нижняя и верхняя граница параметра $H_{c,i}$; $t_{\beta,v}$ – квантили распределения Стьюдента для принятого уровня достоверности β с $v = N - 1$ степенями свободы; N – общее число измерений коэрцитивной силы в центральной части контрольного образца.

Значения напряжений σ_i ранжированы в соответствии с их значениями при том, что число проведенных измерений напряжений достаточно мало, определим доверительный интервал для среднего совокупности на основе размаха выборки:

$$\sigma_i^{\inf} < \sigma_i < \sigma_i^{\sup}, \quad (12)$$

где: $\sigma_i^{\inf} = \hat{\mu}_{\sigma,i} - q_{\beta,n} \cdot W_{q,i}$ и $\sigma_i^{\sup} = \hat{\mu}_{\sigma,i} + q_{\beta,n} \cdot W_{q,i}$ – соответственно нижняя и верхняя граница параметра σ_i ; $q_{\beta,n}$ – значение коэффициента Стьюдента для принятого уровня достоверности β и объема выборки n ; $W_{q,i} = \sigma_{i,\max} - \sigma_{i,\min}$ – размах выборки в пределах i -й ступени нагружения контрольного образца.

Границы областей ожидаемых значений коэрцитивной силы и напряжений, вычисленные по формулам (11) и (12) при различном уровне достоверности (0.95 и 0.99), для исходных данных, принятых по таблице 2, и до начала испытаний (ступень нагружения «0»), представлены соответственно в таблицах 4 и 5. Примечания: $t_{\beta,v} = 1.761$ – для одностороннего доверительного интервала при $\beta = 0.95$, $v = 15$; $q_{\beta,n} = 0.885$ – для одностороннего доверительного интервала при $\beta = 0.95$, $n = 3$.

Таблица 4

Границы областей ожидаемых значений коэрцитивной силы и напряжений в центральной части контрольных образцов из стали СтЗсп5 толщиной 8 мм при их испытании на растяжение при уровне достоверности 0.95

Маркировка образца	Ступень нагружения	Напряжение σ_i , Н/мм ²			Значения коэрцитивной силы в центральной части образца, $H_{c,i}$, А/м		
		$\hat{\mu}_{\sigma,i}$	$\sigma_i^{\inf}$	$\sigma_i^{\sup}$	$\hat{\mu}_{H_{c,i}}$	$H_{c,i}^{\inf}$	$H_{c,i}^{\sup}$
1	2	3	4	5	6	7	8
8-Нс-1	0	0	0	0	344.900	333.603	356.197
	1	89	84	94	356.500	337.666	375.334
	2	178	167	189	411.813	375.009	448.617
	3	214	202	226	426.250	386.279	466.221
	4	249	233	265	425.938	390.684	461.192
	5	284	266	302	431.813	403.107	460.519
	6	321	302	340	466.063	433.028	499.098
	7	356	335	377	500.500	463.482	537.518
	8	459	431	487	688.375	605.034	771.716
8-Нс-2	0	0	0	0	402.180	391.610	412.750
	1	88	84	94	447.500	421.691	473.309
	2	177	168	186	512.125	469.287	554.963
	3	212	203	221	538.188	491.037	585.339
	4	247	236	258	543.875	493.592	594.158
	5	282	270	294	543.125	498.172	588.078
	6	318	304	332	532.750	489.125	576.375
	7	353	337	369	565.750	528.389	603.111
	8	457	437	487	688.438	605.090	771.786
8-Нс-3	0	0	0	0	360.650	352.441	368.859
	1	87	82	92	383.063	358.441	407.685
	2	174	163	185	452.875	409.411	496.339
	3	209	197	221	462.688	415.430	509.946
	4	244	230	258	474.125	426.534	521.716
	5	278	260	296	467.625	429.950	505.300
	6	313	293	333	480.500	446.442	514.558
	7	348	327	369	496.563	461.804	531.322
	8	454	426	482	645.750	568.707	722.793

Таблица 5

Границы областей ожидаемых значений коэрцитивной силы и напряжений в центральной части контрольных образцов из стали СтЗсп5 толщиной 8 мм при их испытании на растяжение при уровне достоверности 0.99

Маркировка образца	Степень нагружения	Напряжение σ_i , Н/мм ²			Значения коэрцитивной силы в центральной части образца, $H_{c,i}$, А/м		
		$\hat{\mu}_{\sigma,i}$	$\sigma_i^{\inf}$	$\sigma_i^{\sup}$	$\hat{\mu}_{H_{c,i}}$	$H_{c,i}^{\inf}$	$H_{c,i}^{\sup}$
1	2	3	4	5	6	7	8
8-Нс-1	0	0	0	0	344.900	328.067	361.733
	1	89	76	102	356.500	328.436	384.564
	2	178	153	203	411.813	356.973	466.653
	3	214	184	244	426.250	366.691	485.809
	4	249	211	287	425.938	373.408	478.468
	5	284	242	326	431.813	389.039	474.587
	6	321	275	367	466.063	416.839	515.287
	7	356	305	407	500.500	445.341	555.659
8-Нс-2	0	0	0	0	402.180	386.429	417.931
	1	88	80	96	447.500	409.044	485.956
	2	177	156	198	512.125	448.294	575.956
	3	212	191	233	538.188	467.931	608.445
	4	247	222	272	543.875	468.951	618.799
	5	282	252	312	543.125	476.142	610.108
	6	318	284	352	532.750	467.746	597.754
	7	353	315	391	565.750	510.080	621.420
8-Нс-3	0	0	0	0	360.650	348.418	372.882
	1	87	74	100	383.063	346.375	419.751
	2	174	149	199	452.875	388.110	517.640
	3	209	179	239	462.688	392.271	533.105
	4	244	210	278	474.125	403.211	545.039
	5	278	236	320	467.625	411.488	523.762
	6	313	267	359	480.500	429.752	531.248
	7	348	297	399	496.563	444.769	548.357
	8	454	386	522	645.750	530.951	760.549

Примечания: $t_{\beta,v} = 2.624$ – для одностороннего доверительного интервала при $\beta = 0.99$, $v = 15$; $q_{\beta,n} = 2.111$ – для одностороннего доверительного интервала при $\beta = 0.99$, $n = 3$.

Для наглядности представим полученные расчетные данные, содержащиеся в таблицах 4 и 5.

Для выбора наиболее подходящей модели аппроксимации результатов испытаний проведен их регрессионный анализ, которым установлено, что наиболее подходящей моделью (детерминированная составляющая) является степенная функция вида:

$$H_c(\sigma) = a \cdot \sigma^b + c, \quad (13)$$

для которой коэффициенты a , b и c определялись в среде многофункциональной вычислительной системы Mathcad. График функции $H_c(\sigma)$ представлен на рисунке 2.

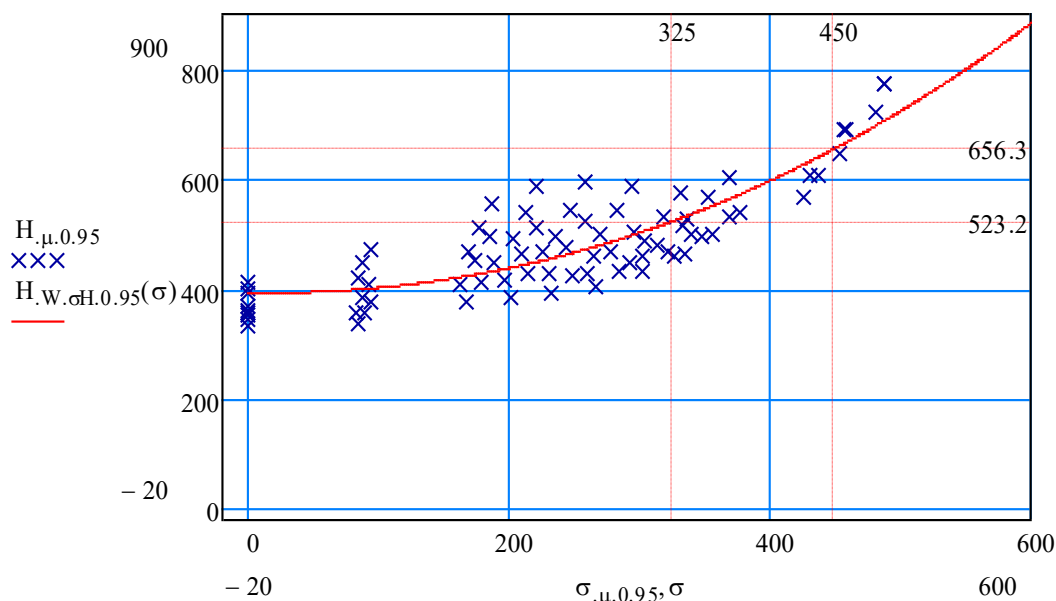


Рис. 2. График функции вида $H_c(\sigma) = (5.008 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma^{2.157} + 392.325)$ по результатам испытания образцов

Fig. 2. Graph of a function of the form $H_c(\sigma) = (5.008 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma^{2.157} + 392.325)$ according to the test results of the samples

При построении аппроксимирующей функции (13) рассматривалось условие минимума суммы квадратов отклонений от экспериментальных данных $H_{c,i}(\sigma_i)$ лабораторного исследования пропорциональных стальных образцов из стали Ст3сп5 толщиной 8 мм:

$$\sum_{i=0}^k [H_c(\sigma) - H_{c,i}(\sigma_i)]^2 \Rightarrow \min. \quad (14)$$

Расчет случайной составляющей регрессионной модели выполнен по формуле:

$$\varepsilon_{Hc}(\sigma) = \sqrt{\frac{D_{Hc}}{k-2}} \cdot t_{\beta} \cdot \sqrt{\frac{1}{k} + \frac{(\sigma - \mu_{\sigma})^2}{\Delta_{\sigma}^2}}, \quad (15)$$

где: D_{Hc} – сумма квадратов отклонений детерминированной составляющей регрессионной модели от массива значений коэрцитивной силы в центральной части контрольного образца, объемом $k = 9$, соответствующему циклу испытаний для трех образцов; μ_{σ} и Δ_{σ} – выборочное среднее и стандартное отклонение напряжений для выборки, соответствующему циклу испытаний для трех образцов. В итоге получаем следующую формулу:

$$H_c(\sigma) = a \cdot \sigma^b + c \pm \sqrt{\frac{D_{Hc}}{k-2}} \cdot t_{\beta} \cdot \sqrt{\frac{1}{k} + \frac{(\sigma - \mu_{\sigma})^2}{\Delta_{\sigma}^2}}, \quad (16)$$

Проведенный регрессионный анализ позволил получить обобщенные математические модели зависимости между растягивающими напряжениями σ (Н/мм²) и коэрцитивной силой H_c (А/м) для серии испытаний контрольных образцов толщиной 8 мм из стали марки Ст3сп5:

Выражение (16) позволяет вычислить коэрцитивную силу при достижении стали Ст3сп5 предела текучести стали ($\sigma_T = 325,0$ Н/мм²) значения следует ожидать в пределах 486.58...559.78 А/м при уровне достоверности 0.95, а при уровне достоверности 0.99 – в пределах 470.59...575.76 А/м. При достижении временного сопротивления стали Ст3сп5 ($\sigma_B = 450,0$ Н/мм²) следует ожидать значения коэрцитивной силы в пределах 619.95...692.66 А/м при уровне достоверности 0.95, а при уровне достоверности 0.99 – в пределах 604.07...708.54 А/м.

Полученные результаты в целом хорошо согласуются с результатами аналогичных исследований приведенных в работах Попова Б.Е. и Иванова А.М. для стали Ст3, а критические значения коэрцитивной силы находятся в интервале 6...7 А/см (600...700

А/м) [1, 4]. Однако отметим, что в данных рекомендациях не приведены сведения об уровне достоверности полученных критических значений коэрцитивной силы.

Приобретенные в настоящей работе методические приемы, основанные на статистических методах, позволяют усовершенствовать систему оценки характерных критических значений коэрцитивной силы с определенным (заданным) уровнем достоверности по данным серии механических испытаний пропорциональных контрольных образцов.

4. Выводы

1. Для аппроксимации опытных полигонов частот коэрцитивной силы в плоских образцах из стали марки СтЗсп5 толщиной 8 мм в состоянии поставки и в процессе их нагружения установлен нормальный закон распределения, который может быть использован для определения расчетной величины коэрцитивной силы в стальных конструкциях методом доверительных интервалов. В ходе эксперимента установлено, что на протяжении всего цикла нагружения фиксировались монотонно увеличивающиеся наибольшие значения коэрцитивной силы вдоль растягивающего усилия (положения $H_C^{0^\circ}$ и $H_C^{180^\circ}$), а при разрушении образца наибольшие значения коэрцитивной силы получены поперек усилия (положения $H_C^{270^\circ}$ и $H_C^{90^\circ}$). Описываемое явление показывает, что для стали марки СтЗсп5 характерна анизотропия коэрцитивной силы.

2. Обоснована надежность получаемых значений коэрцитивной силы при различных уровнях напряжений в стальных конструкциях мостовых сооружений методом доверительных интервалов. Путем статической обработки результатов эксперимента было установлено, что коэрцитивная сила, при достижении предела текучести стали СтЗсп5, будет находиться в пределах 486.58...559.78 А/м с достоверностью 0.95, а при уровне достоверности 0.99 – в пределах 470.59...575.76 А/м. При достижении временного сопротивления стали СтЗсп5, следует ожидать значения коэрцитивной силы в пределах 619.95...692.66 А/м при уровне достоверности 0.95, а при уровне достоверности 0.99 – в пределах 604.07...708.54 А/м.

Список литературы/References

1. Popov B., Evdokimov S., Leonova O., Sokolov Y. The method of magnetic coercimetry and its application to assess the residual life of lifting equipment E3S Web Conf., 97 2019 06016 DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199706016>
2. Xin W., Ding K., Lv Q. Theory and experimental study on magnetic monitoring of steel structure fatigue damage based on different exciting current. (2018) Proceedings of the 7th Asia-Pacific Workshop on Structural Health Monitoring, APWSHM 2018, 2018. p. 536-546.
3. Botvina L.R., Levin V.P., Tyutin M.R., Soldatenkov A.P., Demina Yu.A. Evaluation of cyclic damage of structural steels by magnetic NDT methods: ICF 2017 - 14th International Conference on Fracture, 2. 2017. p. 225-226.
4. Ivanov A.M. Vashenko S.S. Changes of coercive force of steel samples with various ductility reached by thermomechanical processing at stretching. Reviews on Advanced Materials Science, 25 (3), 2010. p. 269-272.
5. Makarov, A.V., Savrai, R.A., Gorkunov, E.S. et al. Effect of friction-induced hardening on the features of magnetic and eddy-current behavior of an annealed structural steel under cyclic loading conditions. Russ J Nondestruct Test 44, 2008. p. 496-508. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1061830908070085>
6. Makarov, A.V., Gorkunov, E.S., Savrai, R.A. et al. The peculiarities of magnetic and eddy-current testing of quenched structural steel hardened by nanostructuring frictional treatment. Russ J Nondestruct Test 48, 2012. p. 615-622 DOI: <https://doi.org/10.1134/S1061830912110034>
7. Gorkunov, E.S., Zadvorkin, S.M., Goruleva, L.S. et al. The effect of equal channel angular pressing on the mechanical and magnetic properties of 09Г2С steel. Russ J Nondestruct Test 48, 2012. p. 568-575. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1061830912100051>
8. Gorkunov E.S., Yakushenko E.I., Zadvorkin S.M., Mushnikov A.N., Mel'nikova E.V. Effect of elastic deformation by compression, tension, and torsion on the critical magnetic

- field distribution in a steel 15XH4I. Russian Journal of Nondestructive Testing, 46 (2), 2010. p. 75-83.
9. Kikuchi H. Kamada Y., Kobayashi S., Ara K. Diagnosis of degradation in structural ferromagnetic materials by magnetic measurement. 6th International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies 2, 2009. p. 776-786.
 10. Курашкин К.В. Определение напряжений в стальных конструкциях методом коэрцитивной силы: сб. докладов XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Казань. 2015. С. 2190-2192.
 11. Карпухин И.И., Корнилова А.В., Тет П. Возможности применения метода коэрцитивной силы для обследования технического состояния металлургического оборудования: сб. материалов IV Международной научной конференции / Научно-технический прогресс в черной металлургии. 2019. С. 88-96.
 12. Попов Б.Е. и др. Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса сосудов, работающих под давлением // Безопасность труда в промышленности. – 2001. – № 3. С. 27-36.
 13. Maystrenko I., Zinnurov T., Erohin D., Maystrenko T. Analysis of the efficiency of obtaining reliable data when operating with number sets in simulation of bridges. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 890(1), 012030
 14. Яковлева В.С. Малоуглеродистая полуспокойная сталь для металлических конструкций: сб. трудов ЦНИИСК, вып. 29. – М.: Стройиздат, 1976. С. 42-70.
 15. S. Mirzaee, S. F. Shayesteh, S. MahdaviFar, and S. H. Hekmatara Synthesis, characterization and Monte Carlo simulation of CoFe₂O₄ / Polyvinylpyrrolidone nanocomposites: the coercivity investigation, Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2015, vol. 393, no. 11, p. 1–7.
 16. Law A.M., Kelton W.D. Simulation modeling and analysis. McGraw-Hill, 2000, 368 p.
 17. Vdovin E., Mavliev L., Stroganov V., IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. (2020)
 18. Grishyn I. V., Ivanov G. P., Kayumov R. A., Durability of bridge asphaltic concrete pavements under temperature loads, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 786(1), 012032 (2020) DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012032
 19. Galeev R., Nizamov R., Abdrakhmanova L., Khozin V., in IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. (2020)

Информация об авторах.

Игорь Юрьевич Майстренко – кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г.Казань, Российская Федерация

E-mail: igor_maystr@mail.ru

Тагир Альмирович Зиннуров – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г.Казань, Российская Федерация

E-mail: leongar@mail.ru

Татьяна Игоревна Майстренко – инженер по промышленной безопасности, ООО Научно-производственный центр «Строй-Экспертиза», г.Казань, Российская Федерация
E-mail: maystrenko1496@mail.ru

Дмитрий Игорьевич Ерохин – проектировщик, ООО Научно-производственный центр «Строй-Экспертиза», г.Казань, Российская Федерация
E-mail: erokhin1604@mail.ru

Виталий Сергеевич Малыгин – проектировщик, ООО Научно-производственный центр «Строй-Экспертиза», г.Казань, Российская Федерация
E-mail: krasmal@gmail.com

Information about the authors.

Igor Y. Maistrenko – candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation
E-mail: igor_maystr@mail.ru

Tagir Almirovic Zinnurov – candidate of technical sciences, senior researcher, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: leongar@mail.ru

Tatiana Igorevna Maistrenko - industrial Safety Engineer, Scientific and production center "Sroy-Expertisa" ltd. Kazan, Russian Federation

E-mail: maystrenko1496@mail.ru

Dmitry Igorevich Erokhin – project designer, Scientific and production center "Sroy-Expertisa" ltd. Kazan, Russian Federation

E-mail: erokhin1604@mail.ru

Vitaly Sergeyevich Malygin – project designer, Scientific and production center "Sroy-Expertisa" ltd. Kazan, Russian Federation

E-mail: krasmal@gmail.com