

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. №3 (177). С. 14-22.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. №3 (177). P. 14-22.

Научная статья

УДК 620.179.1

doi: 10.30987/2223-4608-2026-3-14-22

Зависимость магнитных свойств лазерных сварных соединений от напряжения при статическом растяжении

Алексей Викторович Завитков¹, аспирант

Никита Алексеевич Марков², аспирант

Валерий Иванович Криворотов³, к.т.н.

^{1,2} Владимирский государственный университет, Владимир, Россия

¹ ООО «ИЦ при ВлГУ», Владимир, Россия

³ ООО «Инженерно-технологический центр «Альянс сварщиков Санкт-Петербурга и северо-западного региона», Санкт-Петербург, Россия

¹ vip.zavitkov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4323-5398>

² mnikita.markovm@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-5180-7352>

³ kvi151149@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-6520-7500>

Аннотация. Представлены результаты комплексных экспериментальных исследований однозначной зависимости между значениями коэрцитивной силы и действующими напряжениями при статическом растяжении. Установленная зависимость является крайне важной и может быть эффективно использована для точной оценки текущего напряженно-деформированного состояния и прогнозирования остаточного ресурса критически важных металлоконструкций со сварными соединениями, полученными современным лазерным методом. В ходе исследования были представлены детальные результаты обширной серии экспериментов, проведенных на стандартных образцах, изготовленных из четырех широко распространенных марок сталей (сталь 3, 10ХСНД, сталь 20 и 09Г2С) в состоянии поставки, а также для образцов, имеющих лазерные сварные швы, выполненные по двум различным технологиям: с подачей проволоки и без ее подачи. В рамках данного комплексного исследования были тщательно проведены механические испытания на универсальной испытательной машине Р-20 с параллельным непрерывным замером коэрцитивной силы высокоточным магнитным структуроскопом. Для всесторонней оценки качества и надежности каждого сварного соединения дополнительно применялся стандартный метод визуально-измерительного контроля, а также были осуществлены предварительные испытания на статическое растяжение и изгиб для определения базовых характеристик. В итоге в работе наглядно представлены графики зависимости значений коэрцитивной силы от приложенного напряжения при растяжении всех исследуемых образцов, кроме того, были построены и проанализированы тарировочные кривые. Важнейшим результатом является демонстрация того, что существует четкая линейная зависимость между коэрцитивной силой и напряжениями в металле вплоть до момента достижения предела пропорциональности материала. Полученные перспективные результаты открывают новые возможности для дальнейшего развития и совершенствования методов неразрушающего контроля и достоверной оценки прочностных характеристик ответственных сварных конструкций, выполненных высокотехнологичным лазерным методом.

Ключевые слова: лазерная сварка, сварные соединения, неразрушающий контроль, магнитный контроль, коэрцитивная сила, напряженное состояние, тарировочные кривые

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования РФ (тема FZUN-2024-0004, госзадание ВлГУ)

Для цитирования: Завитков А.В., Марков Н.А., Криворотов В.И. Зависимость магнитных свойств лазерных сварных соединений от напряжения при статическом растяжении // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. № 3 (177). С. 14–22. doi: 10.30987/2223-4608-2026-3-14-22

Dependence of magnetic properties of laser welded joints on static loading stress

Alexey V. Zavitkov¹, Ph.D student

Nikita A. Markov², Ph.D student

Valery I. Krivorotov³, Ph.D Eng.

^{1,2} Vladimir State University, Vladimir, Russia,

¹ LLC «IC at the All-Russian State University», Vladimir, Russia,

³ Engineering and Technology Center «Alliance of Welders of St. Petersburg and the North-Western Region», St. Petersburg, Russia

¹ vip.zavitkov@mail.ru

² mnikita.markovm@gmail.com

³ kvi151149@mail.ru

Abstract. The results of complex experimental studies of the unique dependence between the values of the coercive field strength and the actual stresses under static loading stress are presented. This dependence is extremely important and can be effectively used as good estimator for current stress strain behavior. It contributes to predicting the residual life of critically important metal structures having welded joints obtained through modern laser method. The study presented detailed results of an extensive series of experiments conducted on standard samples made of four widely used grades of steel (steel 3, 10CrSiNiCu, steel 20 and 09Mn2Si) in the state as received, as well as for samples with laser welds made using two different technologies: with and without wire feed. As part of this comprehensive study, mechanical tests were carefully carried out on a universal testing machine (UTM) R-20 with parallel continuous measurement of the coercive force with a high-precision magnetic structroscope. For an overall estimate of the quality and reliability of each welded joint, a standard visual inspection method was additionally applied, and screening tests on dead-load stress and bend tests were performed to determine basic characteristics. As a result, graphs of the dependence of coercive force values on the applied stress under tension of all the studied samples are clearly given in the paper. Besides, calibration curves were plotted and studied. The most important result is the proof that there is a clear linearity between the coercive force and stresses in the metal up to the moment when material elastic strength is reached. The promising results obtained open up new opportunities for the further development and improvement of methods of non-destructive testing and reliable assessment of the strength characteristics of critical welded structures made using the high-tech laser method.

Keywords: laser welding, welded joints, non-destructive testing, magnetic control, coercive force, stress state, calibration curves

Acknowledgments: this work was completed as part of a state assignment in the field of scientific activity of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic FZUN-2024-0004, state assignment to VISU)

For citation: Zavitkov A.V., Markov N.A., Krivorotov V.I. Dependence of magnetic properties of laser welded joints on static loading stress / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. № 3 (177). P. 14–22. doi: 10.30987/2223-4608-2026-3-14-22

Введение

Обеспечение безопасного функционирования металлоконструкций остается основным требованием на протяжении всего жизненного цикла металлопродукции, в том числе, на этапах проектирования и расчетов, а также строительства и эксплуатации. Все большее количество изделий, расчетный срок эксплуатации которых давно истек, продолжают функционировать. Эти факторы неизбежно влекут за собой повышение риска возникновения чрезвычайных происшествий. Для предотвращения случаев аварийного разрушения металлоконструкций используют методы разрушающего и неразрушающего контроля, позволяющие определить состояние и своевременно заменить наиболее нагруженные участки. Особое внимание при технической диагностике следует уделять оценке напряженного состояния исследуемых объектов [1]. Важность и актуальность такой оценки состоит в том, что, по данным Международного Института Сварки (МИС-ИВ), причины катастрофических

разрушений сварных конструкций, в значительной степени, связаны с их напряженным состоянием, в совокупности с воздействием прочих отрицательных факторов [2]. Необходимо отметить, что наибольшие структурные деформации, обуславливающие повышение внутренних напряжений, в сварных соединениях происходят в зоне расплава металла, однако, разрушение сварных металлоконструкций зачастую происходит или зарождается в зоне термического влияния. В этой ситуации особую актуальность приобретает задача оценки напряжений и деформаций, создаваемых в различных зонах сварного соединения: основном металле, металле шва и зоне термического влияния).

Метод коэрцитиметрического контроля напряженно-деформированного состояния, благодаря высокой чувствительности к структурным изменениям и фазовым превращениям, признан пригодным для контроля и оценки напряженного состояния крановых, трубопроводных, судовых, гидроэнергетических и др. металлоконструкций и сооружений, а также транспортного

оборудования (карьерных экскаваторов, железнодорожной и др. техники), поднадзорных органам государственного (Ростехнадзор) и отраслевого (Морской и Речной регистры РФ) надзора [3 – 8]. Однако недостатком данного метода является малая изученность зависимости коэрцитивной силы от напряженно-деформированного состояния металлоконструкций. Это связано с тем, что на значения коэрцитивной силы, оказывает влияние множество факторов, таких как: толщина металла, наличие покрытий (в том числе, слоя коррозии), химический состав металла и сварочного материала, термическая обработка [9, 10].

Для оценки напряженно-деформированного состояния сварных конструкций, полученных, в том числе, с применением лазерной сварки возможно применение магнитоструктурного анализа [2]. Однако в указанных работах не рассмотрено влияние прикладываемых к сварному соединению нагрузок на значение коэрцитивной силы. Поэтому весьма затруднительно установить значимость корреляции между значениями H_c после сварки с механическими свойствами материала конструкции.

Целью настоящей работы является исследование корреляции между механическими и магнитными характеристиками (коэрцитивной силой, в частности) сварных соединений из конструкционных сталей, полученных с применением лазерного излучения.

Материал и методы

Для проведения исследований были выбраны конструкционные стали: 3, 20, 09Г2С и 10ХСНД. Рассмотрены 2 вида сварных соединений: лазерная сварка с подачей проволоки в сварочную ванну и без нее. При сварке с подачей проволоки использована марка Св-08Г2С диаметром 1,2 мм (ГОСТ 2246). Исследованию подвергались образцы, вырезанные из листового проката толщиной 5 мм каждой из марок сталей.

Для определения значений коэрцитивной силы применялся магнитный структуроскоп КРМ-Ц-К2М. Механические испытания образцов на статическое растяжение проведены на универсальной разрывной машине Р-20.

Предварительно проведена отработка и выбор режимов получения сварных соединений, оказывающих наименьшее влияние на магнитные свойства каждого из исследуемых материалов. Это было сделано исходя из того, что изменение магнитных свойств металла (повышение коэрцитивной силы, в частности) говорит о наличии в материале структурных неоднородностей, микродефектов и остаточных напряжений [3].

Проведение эксперимента

Перед проведением испытаний с замером H_c , необходимо было убедиться в том, что выбранные режимы сварки обеспечивают получение равнопрочных сварных соединений. Для этого были проведены предварительные механические испытания на статическое растяжение и изгиб на образцах из выбранных марок сталей.

Далее, на ранее подобранных режимах, была произведена сварка заготовок 380×145 мм по длинной стороне, после чего вырезаны образцы для испытаний по представленной схеме (рис. 1). Такая схема вырезки образцов позволяет не применять «заходные» и «выводные» планки для устранения отрицательных краевых эффектов. Специальный стандартный образец типа (СОП) рекомендован авторами работы [3]. Его эффективность и целесообразность применения нами в данном исследовании состоит в том, что за один цикл испытания на статическое растяжение можно регистрировать изменения коэрцитивной силы в трех зонах с отличающимся напряжением.

Испытания на растяжение были проведены в соответствии с ГОСТ 1497 (образцы основного металла) и ГОСТ 6996 (образцы сварных соединений), за исключением соблюдения требования к длине рабочей части образцов, которая выбиралась аналогичной соответствующей величине на образцах для механических испытаний с одновременным замером коэрцитивной силы.

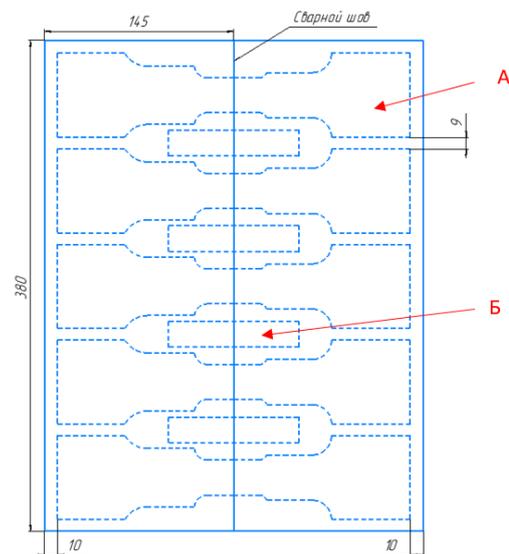


Рис. 1. Схема расположения образцов по поверхности заготовки:

a – для испытаний на растяжение; *b* – для испытаний на изгиб

Fig. 1. Layout of the samples on the surface of the workpiece:

a – for tensile tests; *b* – for bending tests

Испытания образцов на растяжение с замером коэрцитивной силы были проведены в следующей последовательности:

– на зажатом в захватах испытательной машины образце замерялись значения H_c без нагрузки;

– образец нагружался с шагом 15...30 МПа до разрушения. Величина шага определялась на контрольном образце в зависимости от марки материала и термической обработки (так, чтобы изменение нагрузки на каждом шаге не приводило к изменению значения H_c более чем на 1,0 А/см);

– на каждом шаге нагружения, до появления первых признаков разрушения образца, производилось измерение значений коэрцитивной силы вдоль и поперек направления приложения нагрузки, согласно схеме, приведенной на рис. 2. Измерения проводилось в 3-х различных сечениях рабочей части (шириной 27, 35 и 45 мм). Для удобства, в дальнейшем обозначим эти зоны как «Зона 1», «Зона 2» и «Зона 3», соответственно. По достижении необходимой нагрузки, производилась выдержка на ней образца в течении 15 с, только после этого начинались измерения.

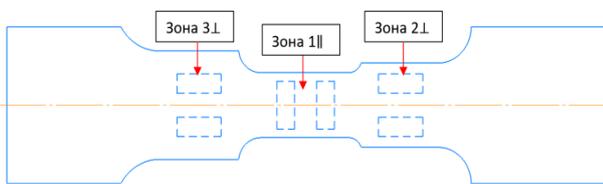


Рис. 2. Схема замера H_c с указанием расположения полюсов магнитных датчиков

Fig. 2. The scheme of measuring the H_c with indication of the location of the poles of the magnetic sensors

На основании полученных данных для каждого вида (серии) образцов строились тарировочные зависимости в координатах: оси абсцисс – значения напряжения, МПа; ось ординат – значения H_c , А/см. Данные тарировочные кривые строились отдельно для продольного и поперечного направления измерений. Важно отметить, что эффекты Баушингера, Хаазена-Келли, Портевена-Лешателье, гетерогенность структуры со значительной разностью свойств структурных составляющих, а также масштабный фактор и др., участвующие в формировании физико-механических свойств металла при деформации [11], в настоящем исследовании не учитывались.

Результаты и обсуждение

Результаты предварительные механических испытаний образцов приведены в табл. 1.

Как следует из результатов предварительных испытаний на растяжение, предел прочности образцов, выполненных лазерной сваркой на ранее выбранных технологических режимах, находится на уровне предела прочности контрольных образцов основного металла. Подтверждением этому является то, что разрушение образцов в результате механических испытаний проходило по ОМ околошовной зоны, то есть вне зоны термического влияния и металла шва.

1. Результаты испытаний на растяжение

1. Tensile test results

№ п/п	Серия (группа) образцов из металлопроката	Предел прочности, МПа	
		Результаты испытаний (среднее)	Справочные данные [12]
1	Образцы Сталь 3 без сварки: горячекатаный прокат	486	370...480
2	Образцы Сталь 3 после лазерной сварки	493	-
3	Образцы Сталь 3 после лазерной сварки с подачей проволоки	495	-
4	Образцы 10ХСНД без сварки: горячекатаный и нормализованный	642	530...685
5	Образцы 10ХСНД после лазерной сварки	649	-
6	Образцы 10ХСНД после лазерной сварки с подачей проволоки	655	-

Внешний вид образцов после испытаний на растяжение представлен на рис. 3. Верхний ряд – без сварного соединения (основной

металл); средний ряд – после лазерной сварки; нижний ряд – после лазерной сварки с подачей проволоки

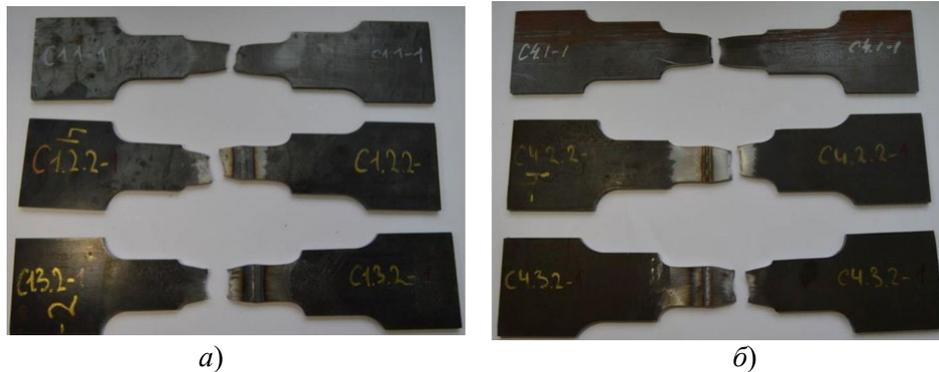


Рис. 3. Внешний вид образцов после испытаний:
a – сталь Ст3; *б* – сталь 10ХСНД

Fig.3. The appearance of the samples after testing:
a – steel St3; *b* – steel 10CrSiNiCu

Также, в соответствии с требованиями ГОСТ 6996, были проведены испытания на статический изгиб различных серий (групп) образцов сварных соединений. Образцы были изогнуты с двух сторон: с лицевой и оборотной стороны шва после лазерной односторонней

односторонней сварки. Каждый образец подвергался изгибу до достижения угла $\alpha = 120^\circ$. Внешний вид образцов лазерных сварных соединений из стали 10ХСНД после проведения испытаний приведен на рис. 4.

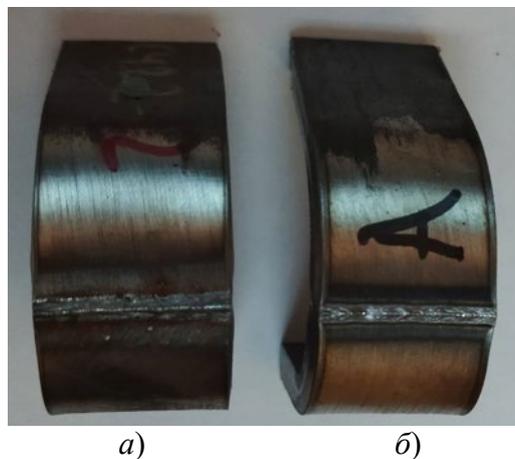


Рис. 4. Внешний вид образцов стали 10ХСНД после испытаний на статический изгиб:
a – с лицевой стороны шва; *б* – с оборотной стороны шва

Fig. 4. Surface appearance of 10CrSiNiCu steel samples after static bending tests:
a – from the front side of the seam; *b* – from the back side of the seam

Ни на одном из образцов со сварными соединениями после проведения испытаний трещин в зоне шва и ЗТВ не обнаружено. Результаты предварительных механических испытаний свидетельствуют о том, что выбранные ранее режимы сварки обеспечивают выполнение требований к равнопрочности исследуемых сварных соединений.

Приведенные значения являются усредненными по результатам механических испытаний 3-х образцов каждого вида (серии). Результаты этих испытаний с замером H_c образцов основного металла и лазерных сварных соединений (с проволокой и без проволоки) из исследуемых сталей представлены на рис. 5, 6 и 7.

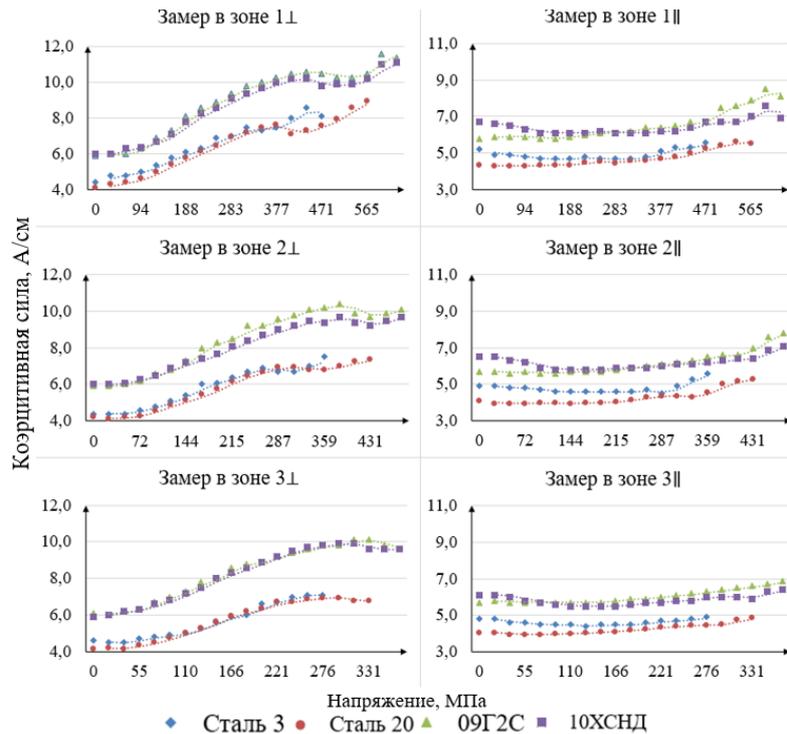


Рис. 5. Кривые зависимости значений H_c от напряжения нагружения при растяжении образцов основного металла

Fig. 5. Curves of dependence of H_c values on load action stress under tension for base metal samples

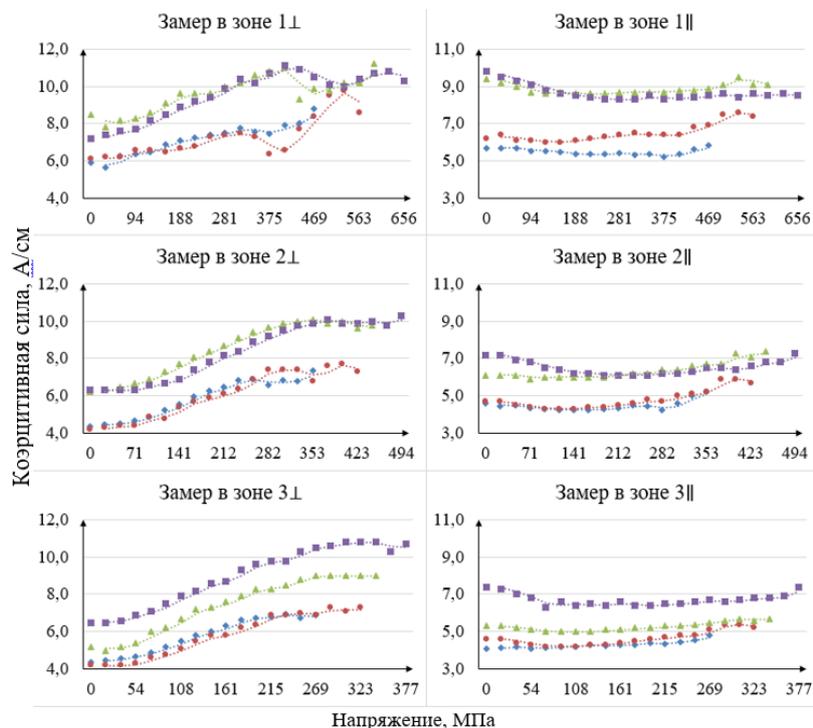


Рис. 6. Кривые зависимости значений H_c от напряжения нагружения при растяжении образцов после лазерной сварки

Fig. 6. Curves of dependence of H_c values on the tensile stress of samples after laser welding

Исходя из представленных данных, можно сказать, что коэрцитивная сила всех

исследуемых материалов схожим образом изменяется в зависимости от величины

прикладываемой статической нагрузки. Также необходимо отметить, что коэрцитивная сила пар сталей 09Г2С и 10ХСНД; сталь 3 и сталь 20 практически совпадает при различных значениях напряжений. Данное свойство сохраняется и на образцах со сварными соединениями.

При нагружении до достижения 0,8...0,9 от предела текучести ($\sigma_{0,2}$) материала, зависимость H_c от σ (при перпендикулярных направлению приложения нагрузки замерах) близка к линейной (коэффициент корреляции не менее 0,95). Завершение линейного участка функции H_c (σ), вероятно, связано с достижением предела пропорциональности металла. После достижения предела текучести материала, коэрцитивная сила в перпендикулярном

направлении незначительно снижается, а затем вновь возрастает вплоть до разрушения образца. Важно отметить, что значения коэрцитивной силы, измеренные в зонах 2 и 3 образцов, при статическом нагружении практически совпадают, несмотря на различие в напряжении в данных участках.

Из рис. 5, 6 и 7 следует, что при замерах H_c параллельно оси приложения нагрузки к образцу, зависимость меняется. Здесь, на смену линейной зависимости, приходит параболическая. С увеличением нагрузки, сначала происходит постепенно замедляющееся снижение значений H_c , затем сменяющееся схожим увеличением. Схожий вид зависимостей также получали авторы других работ [13 – 15].

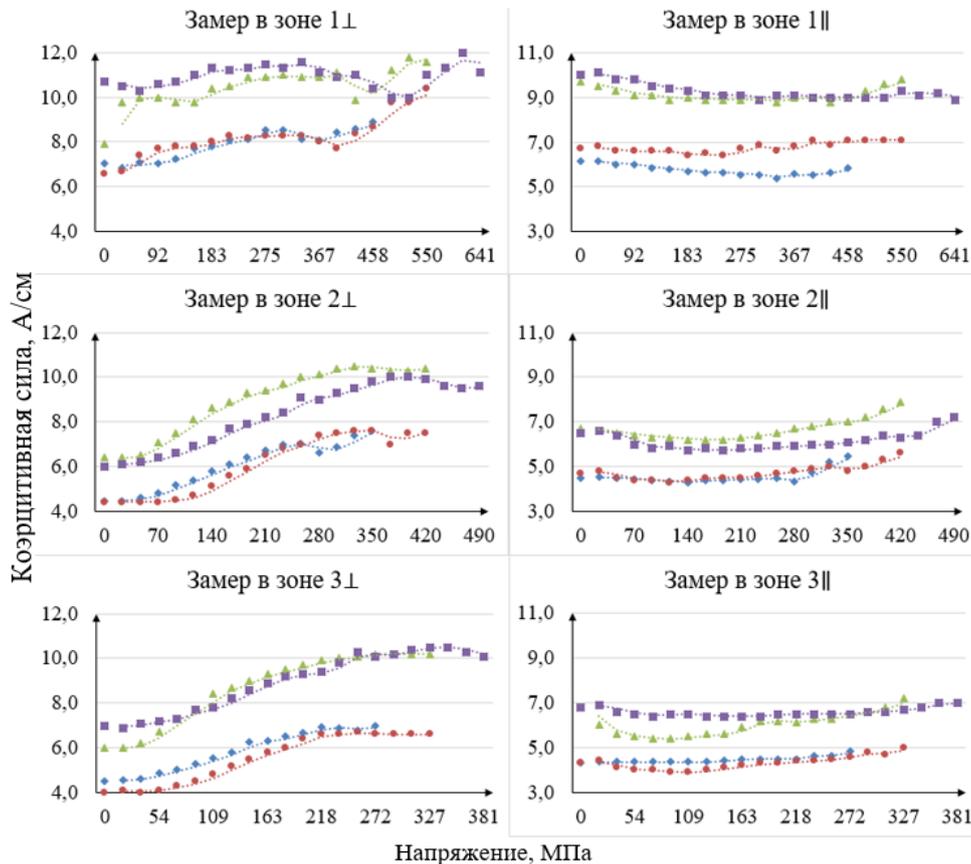


Рис. 7. Кривые зависимости значений H_c от напряжения нагружения при растяжении образцов после лазерной сварки с подачей проволоки

Fig. 7. Curves of dependence of H_c values on the tensile stress of samples after laser welding with wire feed

Применение подачи проволоки при лазерной сварке оказывает большее влияние на значения коэрцитивной силы исследуемых материалов, чем обычная лазерная сварка. До

приложения нагрузки в поперечном направлении H_c отличалась на 2,5...3,0 А/см для сталей 3 и 20 и на 4,0...5,0 для сталей 09Г2С и 10ХСНД; в продольном направлении на

1,0...3,0 для сталей 3 и 20 и на 3,0...4,0 для сталей 09Г2С и 10ХСНД, по сравнению с образцами без сварных соединений.

Необходимо отметить наличие большого количества выбросов значений H_c при замерах в МШ на образцах со сварными соединениями, по сравнению с контрольными образцами. Вероятно, это связано с невозможностью измерения H_c строго в одном положении, вызванной наличием даже незначительных усиленных или подрезов.

Выводы

В работе показано наличие зависимости между напряжениями внутри металла и коэрцитивной силой, в том числе в зонах со сварными соединениями. Исходя из полученных данных, выявлены следующие закономерности:

– до достижения предела пропорциональности металла, коэрцитивная сила, измеренная в поперечном главному вектору приложения нагрузки направлении, линейно зависит от напряжений, что позволит определять момент перехода наиболее опасных участков металлоконструкций из области упругих в область пластических деформаций;

– незначительное падение коэрцитивной силы после достижения предела текучести металла способно внести дополнительную погрешность в точность определения текущего напряженно-деформированного состояния при проведении неразрушающего контроля. Для устранения этой погрешности целесообразно проводить контроль в двух взаимно перпендикулярных направлениях;

– наличие незначительных усиленных или подрезов у сварных соединений способно значительно снизить точность определения коэрцитивной силы. Поэтому, целесообразно проводить контроль H_c на незначительном удалении от сварного шва, где закон изменения функции $H_c(\sigma)$ остается практически неизменным.

Несмотря на дискретный характер измерения H_c как показателя напряженного состояния образца в целом, использованная методика позволила построить зависимость между экспериментальными значениями коэрцитивной

силы и напряжением при растяжении. В практическом использовании по значениям H_c возможно определить уровень напряжений, действующих в основном металле или сварных соединениях, а при использовании зависимости H_c от напряжений внутри металла при различного рода циклических нагрузках – описать изменения магнитных характеристик реальных металлоконструкций в условиях эксплуатации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. BJORHEIM F., SIRIWARDANE S.C., PAVLOU D. A review of fatigue damage detection and measurement techniques // International Journal of Fatigue, 2022. № 154. P. 106556. DOI 10.1016/j.ijfatigue.2021.106556

2. Криворотов В.И. Оценка напряженного состояния и качества лазерных сварных соединений из стали 40ХН2МА магнитным методом // MEGATECH Новые технологии в промышленной диагностике и безопасности, 2012. № 4. С. 8–15.

3. Безлюдько Г.Я. Главные особенности метода коэрцитивной силы как нового уровня эффективности и культуры слежения за усталостью и ресурсом металлоконструкций и оборудования // В мире неразрушающего контроля, 2014. № 3 (65). С. 66–73.

4. Vengrinovich V. Magnetic Barkhausen effect in steel under biaxial strain/stress: influence on stress measurement // Journal of Nondestructive Evaluation, 2019. № 38. С. 1–8. DOI: 10.1007/s10921-019-0576-7

5. Криворотов В.И. Применение метода коэрцитивметрии для оценки уровня остаточных напряжений при термической обработке железнодорожных колес // Сварочное производство. 2021. № 6. С. 42–50.

6. Криворотов В.И. Исследование методом коэрцитивной силы напряженно-деформированного состояния железнодорожных рельсов при испытаниях на сжатие // MEGATECH. Новые технологии в промышленной диагностике и безопасности, 2012. № 4. С. 34–39.

7. Орищук Р.Н., Семенов Ю.Д., Штенгель В.Г. Техническое обследование строительных конструкций и действующих гидротехнических и энергетических сооружений с использованием методов и средств НК // В мире неразрушающего контроля, 2015. № 2 (68). С. 6–10.

8. Агиней Р.В. Анализ вида напряженного состояния газопроводных труб коэрцитивметрическим методом // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2008. № 74 (12). С. 52–54.

9. Kaczowski Z., Bienkowski A., Szewczyk R. Compressive stress dependence of magnetic properties of Co66Fe4Ni1B14Si15 alloy // Czechoslovak journal of physics. 2002. № 52. P. 183–186. DOI 10.1023/A:1014455225853

10. Rautioaho R., Karjalainen P., Moilanen M. Stress response of Barkhausen noise and coercive force in 9Ni steel // Journal of magnetism and magnetic materials.

1987. № 68 (3). Pp. 321–327. DOI 10.1016/0304-8853(87)90008-4

11. Казакевич Г.С. Прогнозирование прочности и анизотропного состояния деформируемых конструкционных материалов. Л.: Издательство Ленинградского университета, 1988. 180 с.

12. Сорокин В.Г. Марочник сталей и сплавов / под ред. А.С. Бережнова. М.: Машиностроение, 1989. 640 с.

13. Миронов А.И., Грибов В.В. Исследование зависимости коэрцитивной силы от величины механических напряжений при неразрушающем контроле стали 08кп // Техническое регулирование в едином экономическом пространстве. 2021. С. 119–126.

14. Teschke M. Characterization of damage evolution on hot flat rolled mild steel sheets by means of micromagnetic parameters and fatigue strength determination // Materials. 2020. № 13 (11). P. 2486. DOI 10.3390/ma13112486

15. Paltanea G. Correlation between magnetic properties and chemical composition of non-oriented electrical steels cut through different technologies // Materials. 2020. № 13 (6). P. 1455. DOI 10.3390/ma13061455

REFERENCES

1. BJORHEIM F., SIRIWARDANE S.C., PAVLOU D. A review of fatigue damage detection and measurement techniques // International Journal of Fatigue, 2022. № 154. P. 106556. DOI 10.1016/j.ijfatigue.2021.106556

2. Krivorotov V.I. Performance assessment of full strength and tension of laser welds for 40CrNi2MnAl obtained by the magnetic method // MEGATECH New technologies in industrial diagnostics and Safety, 2012. no. 4. pp. 8–15

3. Bezlyudko G.Ya. The main possibilities of the coercive force method as a new level of efficiency and the culture of monitoring on fatigue and resource of metal and equipment // Journal of Non-destructive Testing Method, 2014. No. 3 (65), pp. 66–73

4. Vengrinovich V. Magnetic Barkhausen effect in steel under biaxial strain/stress: influence on stress measurement // Journal of Nondestructive Evaluation, 2019. № 38. С. 1–8. DOI 10.1007/s10921-019-0576-7

5. Krivorotov V.I. Application of the method of coercimetry for assessing the level of residual stresses arising during the heat treatment of railway wheels // Welding production. 2021. No. 6, pp. 42–50.

6. Krivorotov V.I. Investigation through coercive force method of the stress-strain state of railway rails under compression tests // MEGATECH. New Technologies in Industrial Diagnostics and Safety, 2012, No. 4, pp. 34–39.

7. Orishchuk R.N., Semenov Yu.D., Shtengel V.G. Technical inspection of operating and being built hydraulic and power building structures by means of ndt methods and instruments. // Journal of Non-destructive Testing Method, 2015. No. 2 (68), pp. 6–10.

8. Aginei R.V. Analysis of stress state type for gas piping using the coercimetric method // FIndustrial laboratory. Materials diagnostics, 2008. No. 74 (12), pp. 52–54.

9. Kaczowski Z., Bienkowski A., Szweczyk R. Compressive stress dependence of magnetic properties of Co66Fe4Ni1B14Si15 alloy // Czechoslovak journal of physics. 2002. № 52. P. 183–186. DOI 10.1023/A:1014455225853

10. Rautioaho R., Karjalainen P., Moilanen M. Stress response of Barkhausen noise and coercive force in 9Ni steel // Journal of magnetism and magnetic materials. 1987. № 68 (3). pp. 321–327. DOI 10.1016/0304-8853(87)90008-4

11. Казакевич Г.С. Прогнозирование прочности и анизотропного состояния деформируемых конструкционных материалов. Л.: Ленинградский университет издательство, 1988, 180 с.

12. Sorokin V.G. Steels and alloys grade guide / eds. A.S. Berezhnov. Moscow: Mashinostroenie, 1989. 640 p.

13. Mironov A.I., Gribov V.V. 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 // Technical regulation in the single Economic Space. 2021, pp. 119–126.

14. Teschke M. Characterization of damage evolution on hot flat rolled mild steel sheets by means of micromagnetic parameters and fatigue strength determination // Materials. 2020. № 13 (11). P. 2486. DOI 10.3390/ma13112486

15. Paltanea G. Correlation between magnetic properties and chemical composition of non-oriented electrical steels cut through different technologies // Materials. 2020. № 13 (6). P. 1455. DOI 10.3390/ma13061455

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 23.09.2025; одобрена после рецензирования 05.01.2026; принята к публикации 21.01.2026.

The article was submitted 23.09.2025; approved after reviewing 05.01.2026; assepted for publication 21.01.2026.