

УДК 620.178

ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТНЫХ МЕТОДОВ ПРИ КОНТРОЛЕ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СТАЛЕЙ ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ

Диньмухаметова Л.С.

Филиал Самарского государственного университета путей сообщения в г. Орске

Пояркова Е.В.

Филиал Самарского государственного университета путей сообщения в г. Орске

Орский гуманитарно-технологический институт (филиал)

Оренбургского государственного университета, г. Орск

e-mail: yarko.e@mail.ru

Аннотация. *Приведены результаты определения остаточных напряжений в сварных элементах из низколегированных сталей повышенной прочности классов Х65 и Х75, полученные методом отверстий и посредством конечно-элементного анализа в комплексе ANSYS. Произведена оценка влияния термической обработки (отпуска и термоциклической обработки) на уровень остаточных напряжений в сварных элементах. Сопоставлением значений напряжений, полученных методом отверстий, и величин напряженности магнитного поля размагничивания установлены корреляционные зависимости для оценки напряженно-деформированного состояния сварных элементов из исследуемых сталей в исходном и термически обработанном состоянии*

Ключевые слова: *напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, вычислительный комплекс ANSYS, сварные соединения, термическая обработка, магнитный контроль*

Оценка дефектности и контроль качества сварных металлоконструкций проводится различными методами диагностики. Наиболее эффективным методом диагностики металла сварных соединений на сегодня является магнитный контроль.

Одним из условий безопасной эксплуатации металлоконструкций является наличие методик и нормативной документации, регламентирующих нормы оценки качества металла сварных соединений с целью определения ресурса безопасной эксплуатации выявленных при контроле «проблемных» участков. Итоговую оценку нагруженности металлоконструкции с дефектными участками или степени потенциальной опасности «проблемной» зоны могут дать расчетно-экспериментальные исследования.

Как известно, в результате местного (неравномерного) нагрева металла, обусловленного воздействием концентрированного источника теплоты, в сварной конструкции возникают временные и остаточные сварочные напряжения.

Остаточные напряжения в поверхностных слоях относятся к числу факторов, существенно влияющих на многие характеристики качества изделий. Особен-

но велико их влияние на геометрическую точность изделий со всеми вытекающими последствиями. При этом эксплуатационные свойства изделий определяются как величиной остаточных напряжений на поверхности, так и характером их распределения по глубине поверхностного слоя [1].

Проведение сварочных работ обуславливает дополнительный рост величины остаточных напряжений и принципиально изменяет напряженно-деформированное состояние (НДС) в зоне сварного шва и в прилегающих областях.

Также известно, что в процессе эксплуатации происходит наложение остаточных и рабочих напряжений от различных внешних воздействий, стало быть, наличие остаточных напряжений в некоторых случаях может значительно снижать ресурс сварных конструкций.

Во-первых, собственные напряжения оказывают значительное влияние на сопротивляемость материала конструкций коррозии, так как приложение механических напряжений приводит к нарушению равновесия сил сопротивления притяжению и отталкиванию электронных оболочек, способствуя появлению избыточного давления, которое стремится вернуть тело в исходное недеформированное состояние с минимальным термодинамическим потенциалом. Другими словами, внешняя нагрузка понижает термодинамическую устойчивость металла, что способствует интенсификации процессов взаимодействия металла с окружающей средой, и чем выше степень приложенных напряжений, тем меньше работа выхода ионов из решетки и больше скорость коррозионного проникновения [2].

Во-вторых, увеличение внутренних напряжений повышает риск нестабильного разрушения конструкций в условиях пониженных температур и наличия дефектов.

Для снижения уровня остаточных сварочных напряжений в конструкциях, последние подвергаются определенной термической обработке, целесообразность применения которой обосновывается в каждом конкретном случае исходя из условий эксплуатации. Широкое применение находит такой способ термической обработки, как высокий отпуск металлоконструкций, проведение которого нередко влечет за собой снижение комплекса свойств, характеризующих несущую способность. В настоящее время для повышения эксплуатационных характеристик сварных соединений также используется термоциклическая обработка (ТЦО) [3], вопрос о влиянии которой на НДС сварных элементов еще недостаточно изучен.

При контроле качества сварных конструкций (в частности, уровня внутренних напряжений в материале) широко используются методы неразрушающего контроля, основанные на измерении магнитных характеристик. В случае применения подобных методов необходимо располагать статистически обоснованными корреляционными зависимостями контролируемых свойств материала конструкции от измеряемых физических величин.

С целью получения таких зависимостей определялись значения остаточных напряжений в различных точках сварных элементов из доэвтектоидных сталей классов прочности Х65 (марок 09Г2С, 17Г1СУ и 09Г2ФБ) и Х75 (10ХСНД и 10Г2ФБЮ) методом конечно-элементного моделирования в комплексе ANSYS и методом отверстий (по Матару). Найденные значения напряжений сопоставлялись с величиной напряженности магнитного поля размагничивания, измеряемой в этих точках. В качестве контрольных образцов использовались фрагменты трубы диаметром 200 мм толщиной 10 мм с кольцевым сварным швом по центру. Исследованию подлежали однородные соединения труб из всех обозначенных марок сталей, а также разнородные соединения сталей марок 09Г2С и 10ХСНД.

На первом этапе в программном комплексе ANSYS проводился тепловой расчет, цель которого – анализ распределения и изменения температуры в процессе остывания сварного соединения от температуры конца сварки до температуры окружающей среды. В результате получены поля внутренних напряжений в сварных соединениях.

На втором этапе выполнен конструкционный анализ влияния температуры остывания сварного соединения на напряженно-деформированное состояние исследуемой модели и определение накопления остаточных сварочных напряжений. Пример результатов расчета представлен на рис. 1.

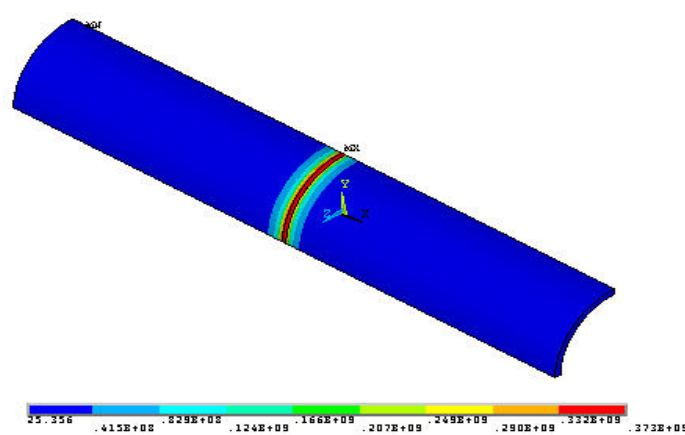


Рис. 1. Расчет остаточных эквивалентных напряжений (по Мизесу) в сварных соединениях труб из сталей повышенной прочности

Таким образом, с помощью метода конечных элементов (МКЭ) установлено, что в наплавленном металле и прилегающем к нему участке исследуемых сварных соединений имеют место остаточные растягивающие напряжения, достигающие максимальной величины для однородных сварных соединений в центре шва, для соединений из разных марок сталей – в зоне термовлияния менее прочной стали. Анализ рассчитанных экстремальных значений напряжений приведен в табл. 1.

Таблица 1. Максимальные значения остаточных напряжений в сварных соединениях, полученные МКЭ

Напряжения	Сварное соединение из сталей марок					
	09Г2С	17Г1СУ	09Г2ФБ	10ХСНД	10Г2ФБЮ	09Г2С+10ХСНД
$\sigma_{ост}$, МПа	100	120	125	200	250	220

Замечено, что при увеличении исходной прочности свариваемой стали повышается и уровень внутренних остаточных напряжений, в отдельных случаях приближенно стремящийся к уровню механической характеристики прочности $\sigma_{0.2}$. Для дальнейшей эксплуатации сварной конструкции из такого материала подобное явление недопустимо.

В сопоставлении с пределом текучести сталей установлено, что остаточные напряжения составляют в процентном соотношении от его величины:

- для однородных сварных соединений до 30 %;
- для соединений из сталей разных марок около 35 %.

Методом отверстий определяли максимальные значения остаточных напряжений в сварных соединениях в точках, расположенных в центре шва, и в десяти точках, расположенных симметрично от его центра к периферии по обе стороны с шагом 5 мм. Используемый метод основан на измерении деформаций при удалении фрагмента металла, вызывающем релаксацию напряжений. Учитывая, что касательные напряжения соизмеримо малы по сравнению с нормальными, и пренебрегая их величиной, остаточные напряжения вычисляли по формулам:

$$\sigma_{хост} = - E (\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y) / (1 - \mu^2),$$

$$\sigma_{уост} = - E (\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x) / (1 - \mu^2),$$

где ε_x и ε_y – деформации по двум главным направлениям;

μ – коэффициент Пуассона.

Величины деформаций определяли при помощи измерительной системы на основе тензометрических датчиков. В точках, где необходимо определить значения напряжений, наклеивали тензорезисторы КФ5РЗ. В центре тензорозетки сверлили плоскодонные отверстия диаметром 3 мм и глубиной 4 мм по нормали к плоскости розетки.

Результаты экспериментального определения максимальных послесварочных напряжений растяжения, полученные методом отверстий, (представлены на рис. 2) подтверждают установленный численным методом характер распределения поля собственных напряжений.

Погрешность расчетного метода при этом составляет порядка 10 %.

Исследовали изменение коэрцитивной силы в точках, для которых были определены величины напряжений. Результаты измерений представлены на рис. 3.

Анализ изменения напряженности магнитного поля размагничивания по сечению сварных соединений подтверждает установленный ранее характер распределения внутренних напряжений: для наплавленного металла и ОШЗ значения H_c превосходят величину 3,5 А/м, что свидетельствует о наличии напряжений растяжения [4].

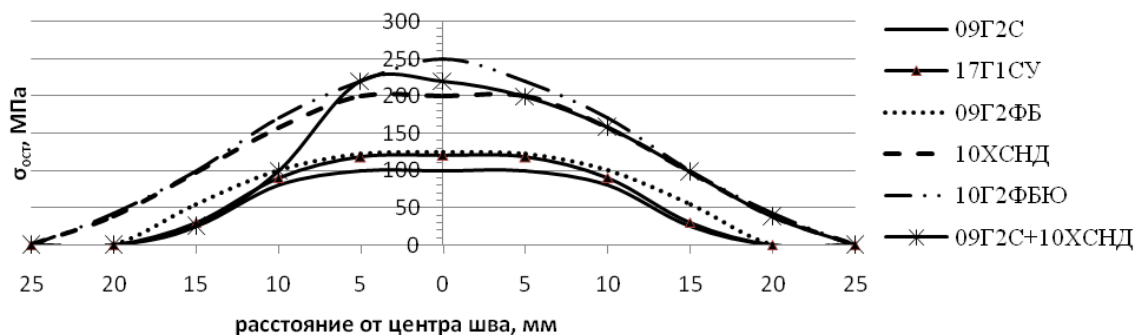


Рис. 2. Поле максимальных остаточных растягивающих напряжений в сварных соединениях сталей повышенной прочности

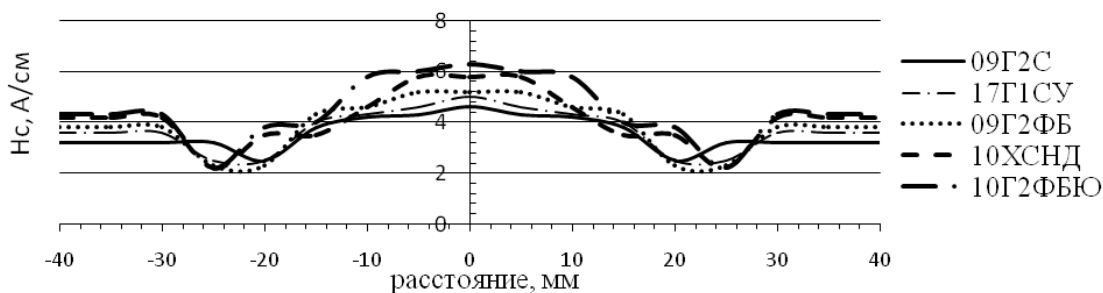


Рис. 3. Распределение величины коэрцитивной силы в сварных соединениях

Используя полученные экспериментальные данные, для всех исследуемых сварных соединений построили частные и обобщенные графические зависимости величины внутренних напряжений от коэрцитивной силы, приведенные на рис. 4.

Установленные таким образом уравнения аппроксимации позволяют определять значения остаточных напряжений на основании замеров напряженности магнитного поля размагничивания в элементах конструкций из низколегированных сталей с достоверностью не ниже 87 %.

Исследовали влияние термической обработки на изменение уровня собственных напряжений для однородных сварных соединений из сталей 09Г2С (Х65) и 10ХСНД (Х75) и разнородных соединений 09Г2С+10ХСНД посредством описанных выше методов.

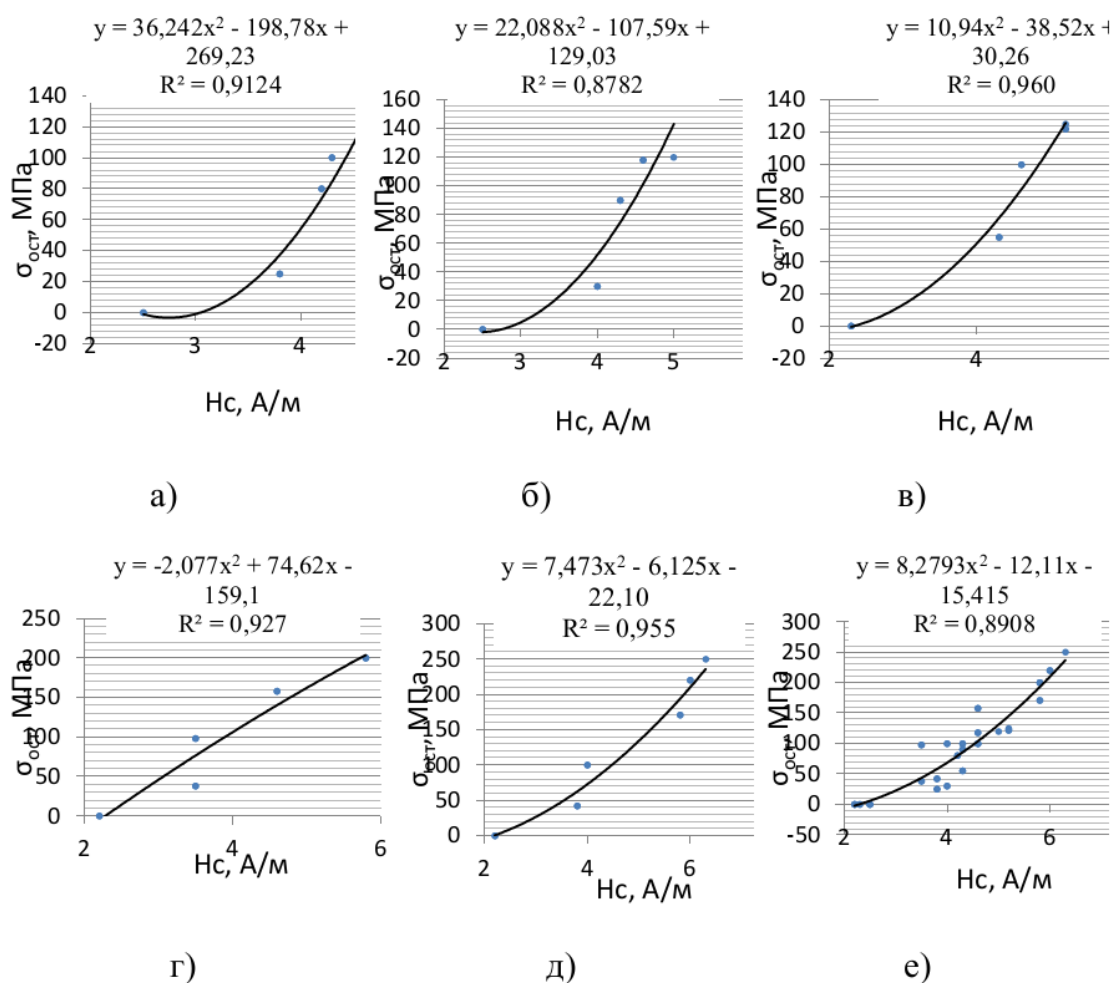


Рис. 4. Зависимости величины остаточных напряжений от коэрцитивной силы в сварных соединениях:
а) 09Г2С; б) 17Г1СУ; в) 09Г2ФБ; г) 10ХСНД; д) 10Г2ФБЮ;
е) для всех исследуемых сталей (обобщенная)

В ходе конечно-элементного моделирования, результаты которого представлены в табл. 2, установили, что проведение термической обработки оказывает различное влияние на НДС контрольных соединений. Наиболее существенное положительное влияние оказывает отпуск сварных соединений, в результате которого собственные напряжения снижаются в среднем в 10 раз, достигая уровня менее 1 % от предела текучести.

После маятниковой термоциклической обработки напряжения снижаются на 10-15 %, а среднетемпературная ТЦО практически не оказывает влияния на величину последних.

Следует также отметить, что локализация максимальных величин собственных напряжений в сварных соединениях в процессе термической обработки не изменяется.

Таблица 2. Максимальные значения внутренних напряжений в сварных соединениях после термической обработки, полученные в ANSYS

Сварное соединение	Исходное состояние	отпуск	МТЦО	СТЦО
	$\sigma_{ост}$, МПа			
09Г2С	100	10	90	97
10ХСНД	200	15	170	198
09Г2С+10ХСНД	220	20	185	215

Таким образом, произведенные расчеты показывают, что проведение термоциклической обработки не повышает уровня внутренних напряжений в сварных соединениях, а для случая маятниковой обработки способствует некоторому его снижению (на величину порядка 15 %), однако, собственные напряжения при этом остаются достаточно высокими.

Результаты экспериментального определения максимальных остаточных напряжений растяжения в образцах после сварки и термообработки, полученные методом отверстий (представлены на рис. 5), подтверждают установленный ранее аналитическим путем характер изменения НДС контрольных образцов при термообработке.

Погрешность расчетного метода при этом составляет порядка 12 %.

Результаты измерений величины напряженности магнитного поля размагничивания в контрольных точках исследуемых образцов представлены на рис. 6.

Используя экспериментальные данные, получена обобщенная графическая зависимость величины внутренних напряжений от коэрцитивной силы для исследуемых сварных соединений после термической обработки, обозначенная на рис. 7.

Полученные регрессионные зависимости позволяют давать оценку уровню остаточных напряжений в сварных конструкциях из исследуемых сталей с достоверностью свыше 90 %.

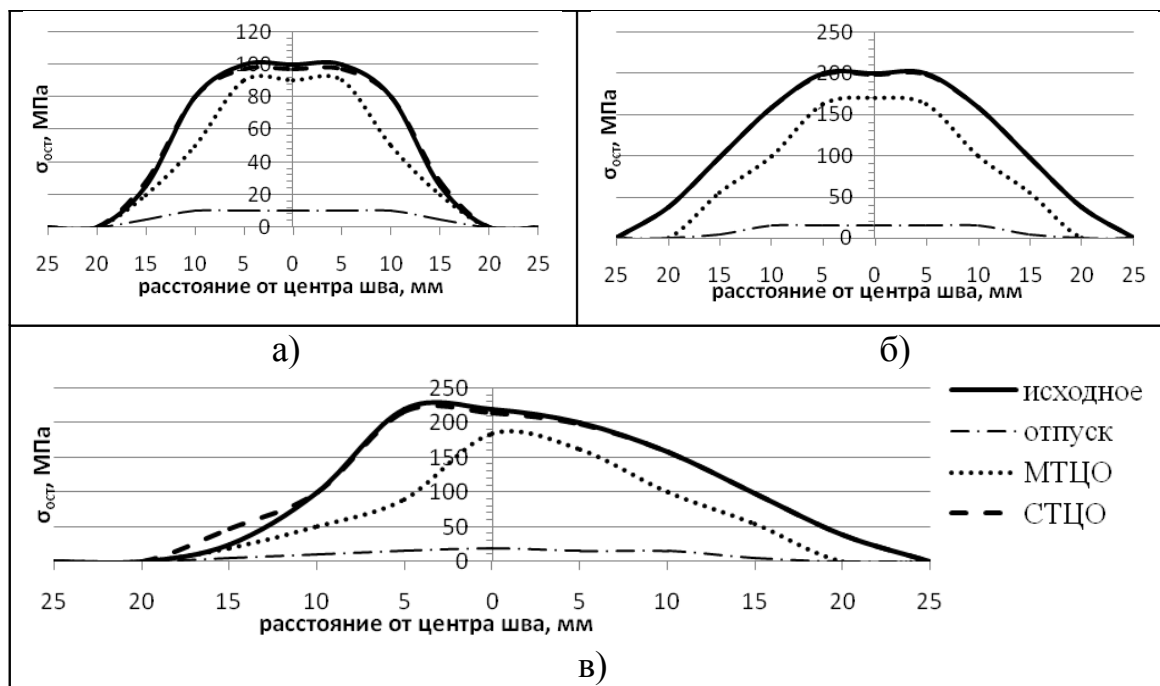


Рис. 5. Поле максимальных остаточных растягивающих напряжений в сварных соединениях:

а) стали 09Г2С; б) стали 10ХСНД;

в) сталей 09Г2С (слева направо 09Г2С → 10ХСНД)

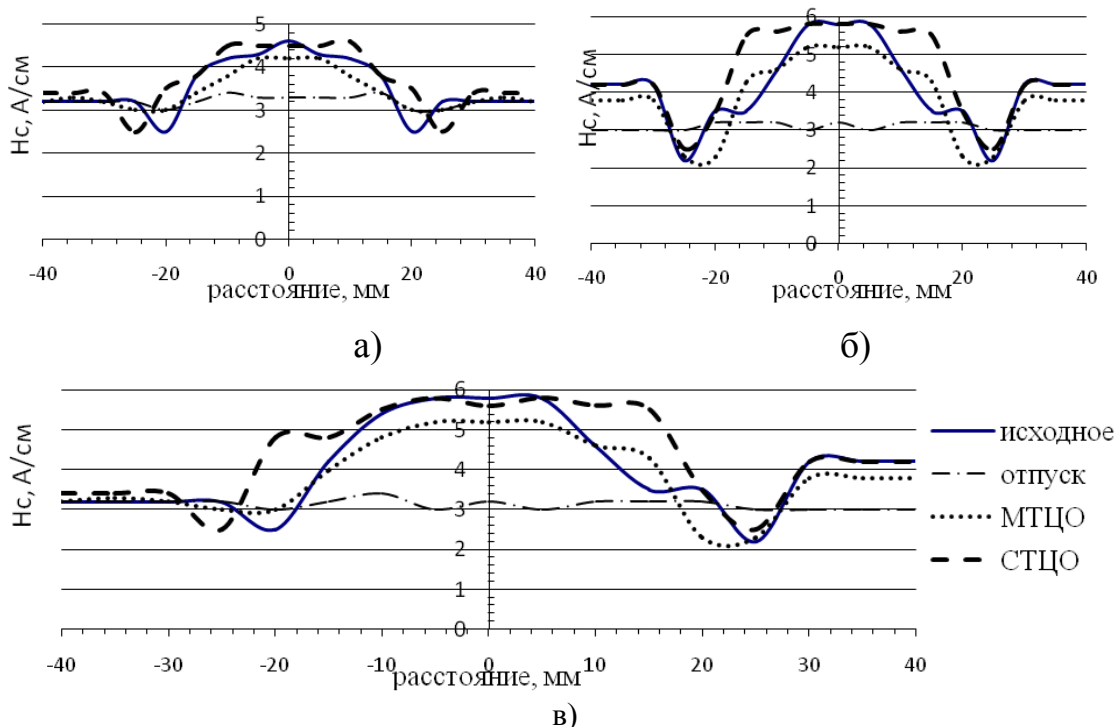


Рис. 6. Распределение величины напряженности магнитного поля размагничивания в сварных соединениях:

а) стали 09Г2С; б) стали 10ХСНД;

в) сталей 09Г2С (слева направо 09Г2С → 10ХСНД)

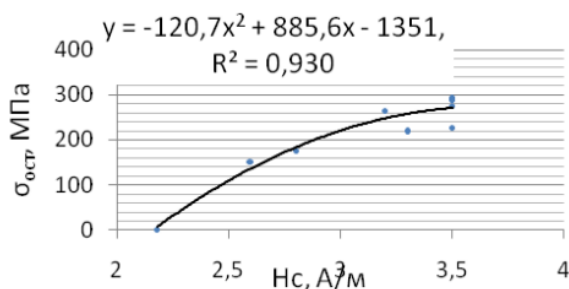


Рис. 7. Зависимость величины остаточных напряжений от коэрцитивной силы в сварных соединениях после термической обработки

Таким образом, использование методов контроля, основанных на измерении напряженности магнитного поля размагничения, позволяет с высокой достоверностью (порядка 90 %) определять уровень внутренних напряжений в сварных соединениях низколегированных сталей повышенной прочности, как в исходном состоянии, так и после термической обработки. В свою очередь это позволяет неразрушающим методом производить оценку эффективности того или иного метода термической обработки сварных конструкций по критерию величины остаточных напряжений.

Литература

1. Пояркова Е.В., Диньмухаметова Л.С., Халитов Т.Ф. Роль остаточных напряжений в оценке напряженно-деформированного состояния сварных соединений // Инновации. Инициатива. Опыт. 2011. № 1. С. 77 - 82
2. Ланчаков Г.А., Зорин Е.Е., Пашков, Ю.И., Степаненко А.И. Работоспособность трубопроводов. В 3-х ч. Ч. 2. Сопротивляемость разрушению. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2001. 350 с.
3. Кузеев И.Р., Диньмухаметова Л.С., Пояркова Е.В. Эволюция градиентных структурно-механических состояний сварных соединений при термоциклическом воздействии // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2011. № 1. С. 254 - 267. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Kuzeev/Kuzeev_3.pdf
4. Скуднов В.А. Предельные пластические деформации металлов. М.: Металлургия, 1989. 176 с.

**THE APPLICATION OF MAGNETIC METHODS
AT THE QUALITY CONTROL OF WELDED DESIGNS
MADE FROM INCREASED DURABILITY STEEL**

L.S. Dinmukhametova

Orsk Branch of Samara State University of Railway Transport, Orsk, Russia

E.V. Poyarkova

Orsk Branch of Samara State University of Railway Transport, Orsk, Russia

Orsk Humane and Technological Institute

(Branch of Orenburg State University), Orsk, Russia

e-mail: yarko.e@mail.ru

Abstract. *The results of determination of the residual tensions in welded elements from the low-alloyed increased durability steel classes X65 and X75, received by a method of holes and means of the final element analysis in the ANSYS softwrae are given in this work. The assessment of influence of thermal processing on the level of the residual tensions in welded elements is made. The comparison of values of the tension received by a method of holes and sizes of intensity of the magnetic field of demagnetized has established correlation dependences for an assessment of tensely deformed condition of welded elements from investigated steel in the initial and thermally processed condition.*

Keywords: *tensely deformed condition, finite elements method, FEM, ANSYS, welded connections, thermal processing, magnetic control*

References

1. Poyarkova E.V., Din'mukhametova L.S., Khalitov T.F. Rol' ostatochnykh napryazhenii v otsenke napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya svarnykh soedinenii (The role of residual stress in the assessment the stress-strain state of the welded joints), *Innovatsii. Initsiativa. Opyt*, 2011, Issue 1, pp. 77 - 82
2. Lanchakov G.A., Zorin E.E., Pashkov, Yu.I., Stepanenko A.I. Rabotosposobnost' truboprovodov. V 3-kh ch. Ch. 2. Soprotivlyaemost' razrusheniyu (Serviceability of pipelines. In 3 parts. Part 2. Resistance to destruction). Moscow, Nedra-Biznestsentr, 2001. 350 p.
3. Kuzeev I.R., Dinmukhametova L.S., Poyarkova E.V. Evolyutsiya gradient-nykh strukturno-mekhanicheskikh sostoyanii svarnykh soedinenii pri termotsiklicheskom vozdeistvii (The evolution of gradient of structural and mechanical conditions of welded connections under thermocyclic influence), *Electronic scientific journal "Neftegazovoe delo - Oil and Gas Business"*, 2011, Issue 1, pp. 254 - 267.
URL: http://www.ogbus.ru/authors/Kuzeev/Kuzeev_3.pdf
4. Skudnov V.A. Predel'nye plasticheskie deformatsii metallov (Limiting plastic deformations of metals). Moscow, Metallurgiya, 1989. 176 p.