



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ, РАБОТАЮЩИХ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

В. А. НЕХОТЯЩИЙ, П. С. ЮХИМЕЦ, Г. Я. БЕЗЛЮДЬКО

Приведены результаты исследований напряженно-деформированного состояния конструкций, работающих под давлением, с помощью магнитного контроля путем измерения коэрцитивной силы. Рассмотренный метод рекомендован для использования при техническом освидетельствовании.

The paper gives the results of investigations of the structure stress-strain state for objects operating under pressure, using magnetic inspection by measurement of the coercive force. The considered method is recommended for application at technical examination.

Безопасность эксплуатации конструкций, работающих под давлением, определяется их запасами прочности и долговечности. Для объективной оценки этих показателей необходима информация о состоянии основного металла и сварных соединений конструкции.

Сосуды давления периодически проходят техническое освидетельствование для установления пригодности к эксплуатации [1]. Основными процедурами этой проверки являются:

- гидравлическое испытание повышенным (пробным), но не более чем в 1,5 раза по сравнению с рабочим, давлением для проверки прочности сосуда и плотности его соединений;
- визуальный осмотр.

В результате такого подхода к освидетельствованию допуск в эксплуатацию объектов, относящихся к категории повышенной опасности, проводится по показателям, не учитывающим в полной мере состояние основного металла и сварных соединений, которое за время эксплуатации могло существенно измениться (из-за наличия дефектов, появления повреждений, перегрузок и т. п.).

В современных условиях, для которых характерно использование более прочных металлов, усложнение условий эксплуатации и в то же время старение оборудования (более 60 % сосудов давления уже отслужили свой нормативный срок) проблема оценки действительного состояния указанных объектов становится еще более актуальной.

В связи со сказанным выше в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины при участии фирмы «Специальные Научные Разработки» (г. Харьков) с использованием опыта магнитной диагностики металлических конструкций [2–4] выполнены исследования по обоснованию возможности применения коэрцитиметрического контроля при техни-

ческом освидетельствовании объектов, работающих под давлением.

На первом этапе изучали изменение коэрцитивной силы (КС) металла цилиндрической оболочки в зависимости от степени деформирования.

Измерения проводили цифровым полуавтоматическим структуроскопом КРМ-ЦК-2М (рис. 1). Для проведения исследований изготовили образец № 1, представляющий собой отрезок трубы диаметром 146×8 мм длиной 500 мм с приваренными плоскими днищами (табл. 1).

Для исключения влияния остаточных напряжений технологического происхождения готовый образец был термообработан.

Измерения проводили на наружной поверхности образца вдоль и поперек его оси симметрии при нагружении:

- пробным давлением 25,5 МПа (режим 1);
- давлением, соответствующим фактической текучести металла 32,5 МПа (режим 2);
- давлением, вызвавшим повсеместное пластическое деформирование металла образца, 35,0 МПа (режим 3);
- при повторном нагружении давлениями, не вызывающими пластическое деформирование металла, 0...32,5 МПа (режим 4).

Результаты измерений представлены на рис. 2–5 (на рис. 3–5 обозначения те же, что и на рис. 2).



Рис. 1. Структуроскоп серии КРМ-ЦК-2М

Таблица 1. Характеристика образцов

Образец	Размер (диаметр, толщина стенки), мм	Материал			Участок стенки номинальной толщины				Участок стенки минимальной толщины	
		Марка стали, НД	Механические свойства, не менее		Толщина стенки, мм	Рабочее давление, МПа	Пробное давление, МПа	Давление текучести, МПа	Толщина стенки, мм	Давление текучести, МПа
			σ_r , МПа	σ_v , МПа						
1	146 × 8	10, ГОСТ 8731–87	220,0	360,0	8	17,0	25,5	27,0	-	-
2	135 × 3	Ст3, ГОСТ 380–71	220,0	380,0	3	6,5	9,7	10,2	-	-
3	209 × 7	20, ГОСТ 8731–87	238,0	429,0	7	11,8	16,0	17,0	3	7,3

Таблица 2. Результаты нагружения образца № 1

Режим нагружения	Давление в образце, МПа	Кольцевые напряжения в % к фактическому пределу текучести	Максимальное приращение КС, %		Остаточное значение КС, %		Остаточная деформация образца по периметру, %
			кольцевое направление	продольное направление	кольцевое направление	продольное направление	
1	25,5	78,7	+ 11,3	+ 46,6	0	0	0
2	32,5	100	+ 15,3	+ 61,6	+ 8,3	+ 8,3	0,10
3	35,0	107,7	+ 25,0	+ 67,5	+ 86,8	+ 28,1	1,08
4	32,5	100	- 34,6	+ 23,0	0	0	0

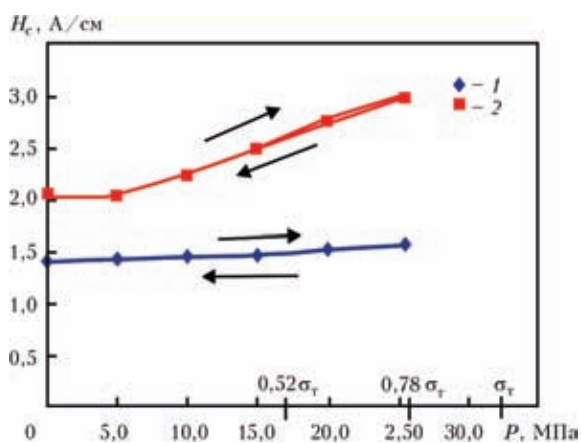


Рис. 2. Нагружение пробным давлением 25,5 МПа (режим 1): 1, 2 — КС в кольцевом и продольном направлении соответственно

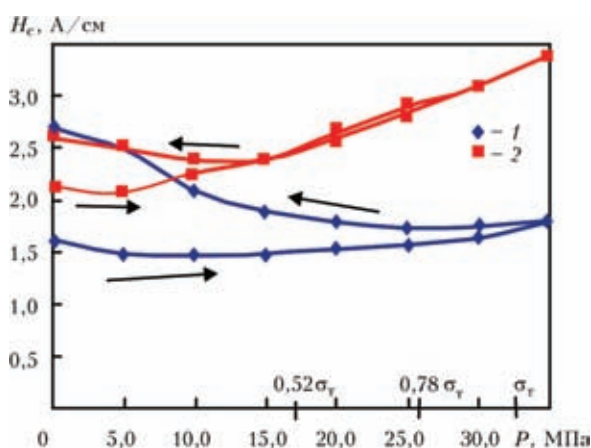


Рис. 4. Нагружение давлением 35,0 МПа, вызвавшим равномерное пластическое деформирование металла (режим 3)

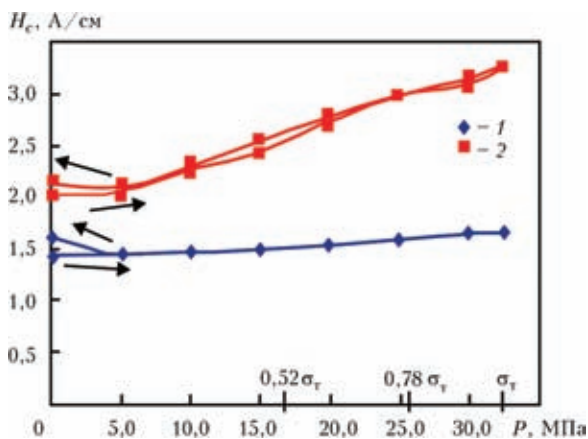


Рис. 3. Нагружение давлением 32,5 МПа, вызвавшим текучесть металла (режим 2)

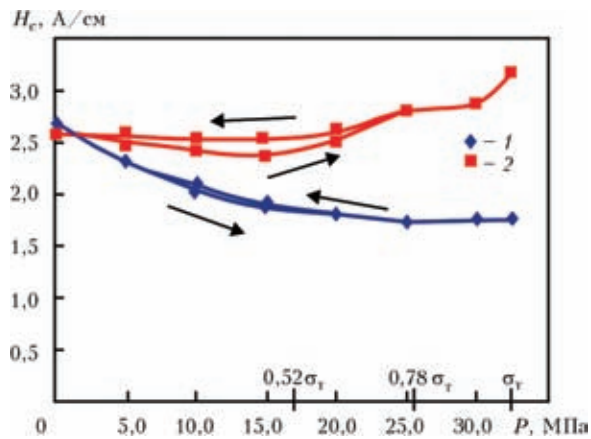


Рис. 5. Зависимость КС от давлений нагрузки и разгрузки при повторном гидроиспытании (режим 4)

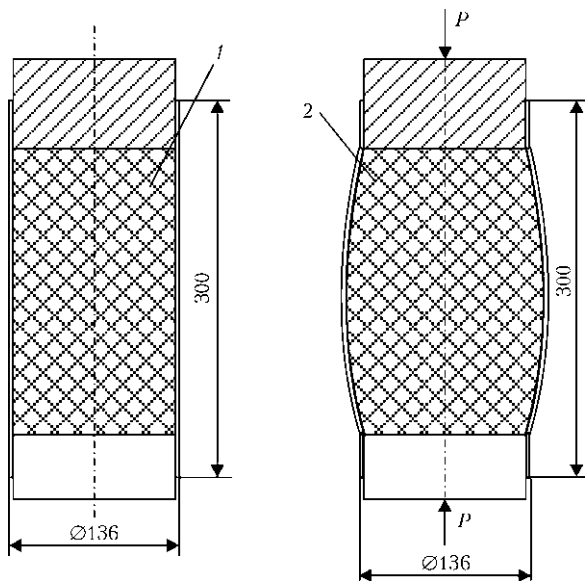


Рис. 6. Схема цилиндрического образца до (1) и после (2) испытания

Анализ зависимостей КС от давления показывает, что их значения различны в продольном и поперечном направлениях (табл. 2).

При нагружении в режиме 1 пробным давлением (25,5 МПа) с ростом давления происходило соответствующее увеличение КС (рис. 2).

Изменение магнитного параметра в продольном направлении было более существенным. Значения КС увеличились на 11,3 и 46,6 % соответственно, поперек и вдоль образца. При сбросе давления исходные значения КС не изменились, что подтвердило упругий характер деформирования исследуемого участка цилиндрической стенки.

После повышения давления в образце до 32,5 МПа, вызвавшем остаточную деформацию 0,1 % (режим 2), зафиксировано появление и остаточной КС (рис. 3).

При давлении 35,0 МПа (режим 3), что в 1,37 раза выше пробного нормативного давления, отмечен существенный рост остаточной КС вследствие пластического деформирования металла (рис. 4).



Рис. 7. Испытание образца в прессе

При этом наиболее существенно (на 86,8 %) возросла КС в кольцевом направлении.

При повторных нагружениях образца внутренним давлением, в том числе и пробным давлением в режиме технического освидетельствования (режим 4), изменение КС вновь стало обратимым. При этом характер изменения КС стал противоположным: с ростом внутреннего давления происходило снижение значения КС в кольцевом направлении (рис. 5). При пробном давлении (25,5 МПа) КС составила лишь 64,7 % значения, имевшего место до нагружения. В продольном направлении, при увеличении давления, наблюдалось незначительное падение и последующий рост КС. Представляется, что данное явление является следствием наличия остаточных сжимающих напряжений, возникших в результате пластического деформирования образца в режиме 3.

Исследование изменения КС при деформациях, предшествующих разрушению, проводилось на трубном образце № 2, сваренном из холоднокатаной стали Ст3 толщиной 3 мм. Образец диаметром 135 мм и длиной 300 мм нагружался в прессе сжатия П-50. Испытание заключалось в деформировании образца под действием радиальной нагрузки (рис. 6).

В качестве рабочей среды, передающей давление на стенку образца, применена листовая резина, обработанная тальком для уменьшения межслойного трения.

В процессе испытания при фиксированной нагрузке и после ее снятия измерялись:

- периметр образца P , мм;
- база a , мм;
- значение КС H_c (А/см) в кольцевом направлении.

Было проведено четыре нагружения образца (рис. 7), сопровождающиеся пластическим деформированием его стенки. После появления трещины в околошовной зоне сварного шва испытание было прекращено. Результаты испытания приведены в табл. 3 и на рис. 8.

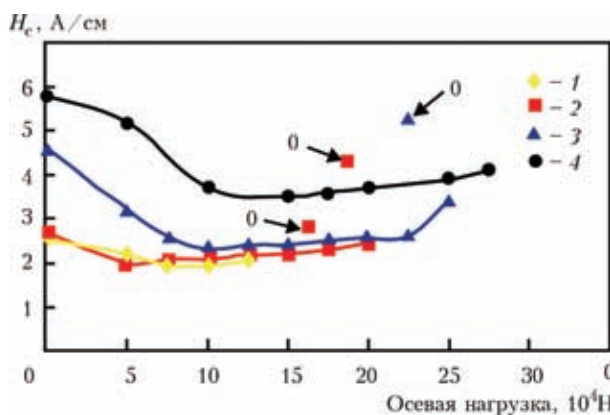


Рис. 8. Зависимость КС от осевой нагрузки: 1-4 — номера нагружений

Таблица 3. Результаты испытаний образца № 2

Осевая нагрузка, 10 ⁴ Н	Нагрузки											
	1			2			3			4		
	H _c , А/см	a, мм	П, мм	H _c , А/см	a, мм	П, мм	H _c , А/см	a, мм	П, мм	H _c , А/см	a, мм	П, мм
0	2,6	98	427,5	2,6	98	427,5	4,6	101	437	5,8	110	472
5	2,2	98	427,5	2,0	98	427,5	3,2	102	437	5,2	111	473
7,5	2,0	98	427,5	2,0	98	427,5	2,6	102	437	–	–	–
10	2,0	98	427,5	2,0	98	427,5	2,3	102	437	3,7	111	473
12,5	2,1	98	427,5	2,1	98	427,5	2,4	102	437	–	–	–
0	2,6	98	427,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–
15	–	–	–	2,2	99	428,5	2,4	102	437	3,5	111	473
0	–	–	–	2,8	98	427,5	–	–	–	–	–	–
17,5	–	–	–	2,3	100	430,5	2,5	102	437	3,6	113	480
0	–	–	–	4,3	99	430,0	–	–	–	–	–	–
20	–	–	–	2,5	102	438,0	2,5	102	437	3,7	114	485
0	–	–	–	4,6	101	437,0	–	–	–	–	–	–
22,5	–	–	–	–	–	–	2,6	104	446	–	–	–
0	–	–	–	–	–	–	5,3	103	445	–	–	–
25	–	–	–	–	–	–	3,4	111	473	3,9	115	490
0	–	–	–	–	–	–	5,4	110	472	–	–	–
27,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	4,1	117	491
0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	6,3	116	490

По аналогии с результатами исследований на образце № 1 в процессе деформирования образца № 2 отмечено снижение КС до определенного предела (табл. 3).

Результаты испытаний трубного образца (см. рис. 9, табл. 4) подтвердили существование линейной зависимости между КС и пластической деформацией [5]:

$$H_c = H_c^0 + A\varepsilon,$$

где ε — остаточная деформация; H_c^0 — КС металла образца перед испытанием; A — коэффициент, характерный для каждой марки стали.

Таблица 4. Изменение КС при деформировании образца до разрушения

Осевая нагрузка, 10 ⁴ Н	Под нагрузкой		Без нагрузки	
	H _c , А/см	Степень деформации, %	H _c , А/см	Степень деформации, %
0	–	–	2,6	–
15	2,2	1	2,8	–
17,5	2,3	2	4,3	1
20	2,5	4	4,6	3
22,5	2,6	6	5,3	5
25,0	3,4	13	5,4	12
27,5	4,1	19	6,3	18

На момент разрушения трубного образца, которое произошло при деформации 18 %, КС, измеренная после снятия нагрузки, увеличилась в 2,4 раза по сравнению с исходным состоянием ($H_c = 2,6$ А/см).

Отмеченное ранее различие между значениями КС в нагруженном и разгруженном состояниях прослеживалось с момента начала пластического деформирования вплоть до разрушения образца и находилось в пределах 2...2,3 А/см. При наступлении текучести металла КС под нагрузкой была на уровне 2,3 А/см, в разгруженном состоянии она увеличилась до 4,3 А/см. Перед разру-

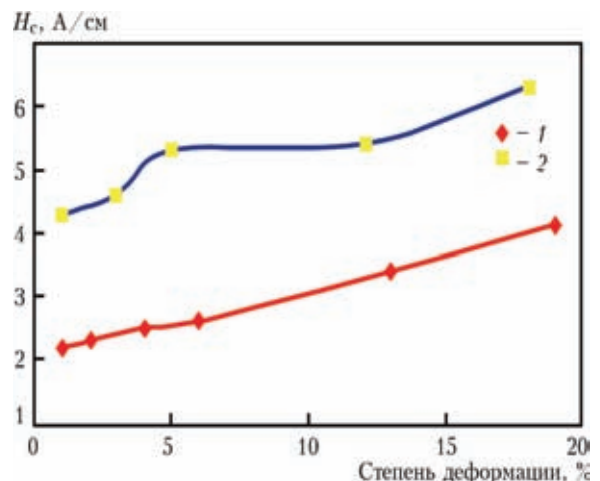


Рис. 9. Зависимость КС от степени пластической деформации: 1, 2 — соответственно под нагрузкой и без нагрузки

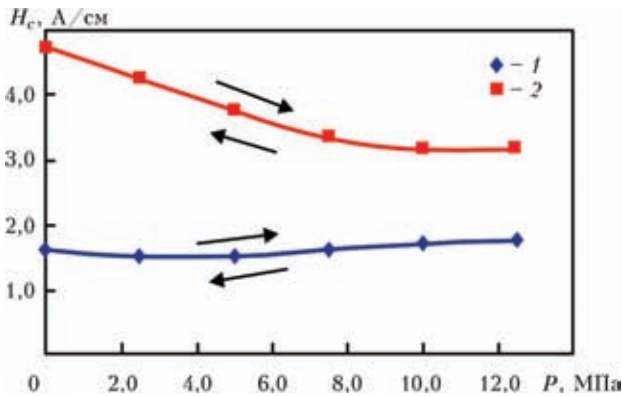


Рис. 10. Зависимость КС от давления нагрузки (1) и разгрузки (2) при гидроиспытании образца № 3

шении образца КС равнялась 4,1 А/см, а после снятия нагрузки 6,3 А/см.

Как следует из измерений, выполненных при проведении исследований, с помощью КС появляется альтернативный метод оперативного обнаружения участков конструкции с повреждениями. В этой связи на следующем этапе исследований был поставлен опыт по оценке технического состояния трубы с локальным утонением. Исследовался образец № 3, изготовленный из трубы 209Х7 мм длиной 1100 мм (табл. 1).

Измерения КС проводили на участках с номинальной и минимальной толщиной стенки после нагружения давлением, вызывавшем, по результатам измерения КС, пластическое деформирование в зоне утонения. Подъем давления происходил с шагом 2,5 МПа. Результаты измерений КС представлены на рис. 10 (кривые 1 и 2).

Кривая 1 свидетельствуют об отсутствии пластического деформирования стенки номинальной толщины в процессе предварительного нагружения: с ростом давления при повторном нагружении снижение КС не происходит. Напротив, кривая 2 отображает КС участка стенки, который подвергся пластической деформации: во-первых, она более чем в два раза превосходит значения КС участков стенки номинальной толщины, во-вторых, с ростом нагрузки происходит существенное снижение КС в кольцевом направлении. Полученный результат находится в полном соответствии с данными табл. 3, согласно которым при рабочем давлении участок с минимальной толщиной стенки, начиная с давления 7,3 МПа, находился в состоянии текучести.

Проведенный опыт наглядно показал, что измерения КС позволяют обнаружить участки конструкции с остаточной деформацией.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

В результате проведения исследований на трубных образцах установлено следующее:

— при упругопластическом деформировании монотонный рост КС происходит в случае отсутствия в металле остаточных напряжений;

— при наличии в металле остаточных напряжений рост КС при упругопластическом деформировании начинается с момента компенсации остаточных напряжений напряжениями от внешней нагрузки (на момент компенсации фиксируется минимальное значение КС);

— при многократных нагружениях в упругопластической области, не сопровождающихся увеличением степени деформирования, зависимость КС от нагрузки повторяет график разгрузки в первом цикле нагружения;

— при упругопластическом деформировании КС металла под нагрузкой ниже, чем в разгруженном состоянии, причем значение КС после разгрузки тем больше, чем выше уровень пластического деформирования;

— превышение КС после разгрузки по сравнению с нагруженным состоянием сохраняется при упругопластическом деформировании вплоть до разрушения;

— вне зависимости от наличия давления в образце измерения КС позволяют обнаружить участки, претерпевшие локальные пластические деформации.

Практическая ценность полученных результатов состоит в том, что их использование расширяет возможности оценки технического состояния объектов, работающих под внутренним давлением.

1. ДНАОП 0.00-1.07-98. Правила будови та безпечної експлуатації посудин, що працюють під тиском.
2. Методические указания «Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса подъемных сооружений при проведении их обследования и техническом диагностировании». РД ИКЦ «Кран»-007-97.
3. Безлюдько Г. Я., Мужичицкий В. Ф., Попов Б. Е. Магнитный контроль (по коэрцитивной силе) напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса стальных металлоконструкций // Завод. лаб. — 1999. — № 9. — С. 53-57.
4. Долинский В. М., Рязов Д. Г., Новик В. Г. О возможности контроля состояния металла по результатам измерения коэрцитивной силы // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2000. — № 4. — С. 65-67.
5. Христенко И. М., Кривова В. В. Влияние пластической деформации на коэрцитивную силу малоуглеродистой стали // Дефектоскопия. — 1984. — № 6. — С. 90-92.

Поступила в редакцию 05.09.2009