



## МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ И СТРУКТУРНО-ТЕКСТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МЕТАЛЛА КИСЛОРОДНЫХ БАЛЛОНОВ

**Л. М. ЛОБАНОВ, В. А. НЕХОТЯЩИЙ, М. Д. РАБКИНА, А. А. ПЕРЕПИЧАЙ**

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

**В. В. БЕЛОСТОЧНЫЙ, А. В. БЕЛОСТОЧНЫЙ** (Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича),

**В. П. ЧИЖИЧЕНКО** (ООО «Кислородсервис»)

*Приведены результаты систематических измерений коэрцитивной силы в связи с возможными структурно-текстурными изменениями металла баллонов при их длительном функционировании. Установленная корреляция между толщиной оболочки и коэрцитивной силой открывает перспективу использования коэрцитиметрии для обнаружения опасных зон и повышения срока безопасной эксплуатации баллонов.*

*The results of systematic measurements of coercive force in connection with possible structural-textured changes of metal of cylinders during their long operation are given. The correlation between the thickness of a shell and coercive force was established which opens the prospect of application of coercimetry to detect dangerous areas and increase of level of safe operation of cylinders.*

На сегодня известны две основные причины взрывов кислородных баллонов в Украине: человеческий фактор и изношенность газобаллонного парка. При этом разрушение баллонов носит в основном динамический характер. В отдельных случаях баллоны эксплуатируются 50...60 лет вместо положенных 40 лет [1], однако существующие методы контроля не позволяют своевременно оценить возможность их дальнейшей эксплуатации [2, 3]. Несмотря на глубокий анализ катастрофических разрушений и предпринимаемые меры [4,5], данной проблеме еще не уделяется должного внимания.

Следует отметить, что с влиянием человеческого фактора связаны, как правило, условия возникновения контакта кислорода как сильнейшего окислителя с горючими газами, смазочными материалами и пр. В результате их возгорания резко повышается давление, инициируются очаги разрушения и происходит взрыв баллона с образованием множества осколков [6]. Разрушение баллонов вследствие изношенности начинается преимущественно из одного очага и заканчивается разделением корпуса на несколько частей. По существу такие разрушения инициируются участками металла, в которых произошли изменения в процессе эксплуатации. Например, уменьшение толщины стенки вследствие коррозии или деградация механических свойств из-за нарушения структурно-текстурных характеристик металла. Возможность отбраковки баллонов при освидетельствовании хотя бы по одному из этих показателей методами НК (толщинометрией, коэрцитиметрией и т. п.) имела бы существенное значение в повышении безопасности при эксплуатации баллонов.

Цель работы — установить взаимосвязь между величиной коэрцитивной силы и толщиной стенки

в результате систематических измерений этих параметров, а также исследований структуры металла после длительных сроков эксплуатации баллонов.

Объектом исследования служили баллоны, соответствующие ГОСТ 949–73, рабочее давление 14,7 МПа, емкость 40 л. Объективные данные некоторых из них представлены в табл. 1, в том числе после разрушения — для изучения структурно-текстурных параметров металла.

Рассмотрим химический состав металла после длительного срока эксплуатации баллонов. Анализ полученных результатов (табл. 2) подтверждает их соответствие химическому составу металла баллонов, изготовленных в последние годы на ММК им. Ильича, из стали Дс (табл. 3). Это свидетельствует о том, что в течение многолетней эксплуатации существенных изменений в составе стали не произошло.

Что касается механических свойств, то, как известно, прочностные характеристики стали определяются прежде всего легирующими элементами, создающими твердый раствор на основе железа, который, в свою очередь, в целом можно оценить углеродным эквивалентом (см. табл. 2, 3). Поскольку содержание углерода больше 0,12 %, углеродный эквивалент вычисляется по следующей формуле:

$$C_{\text{экв}} = C + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V}}{5} + \frac{\text{Ni} + \text{Cu}}{15}.$$

В этой связи интересно отметить характер распределения углеродного эквивалента, который отличается несколькими максимумами (рис. 1), а также зависимость от его величины предела текучести металла (рис. 2).

Относительно влияния химического состава стали на предел текучести следует подчеркнуть, что  $\sigma_T$  по существу слабо зависит от  $C_{\text{экр}}$ , поскольку необходимый уровень механических характеристик стали  $D_c$  достигается также за счет других видов упрочнения: измельчения размера зерна, увеличения плотности дислокаций, дисперсионного твердения, текстурного фактора и др. Так, в работе в [7] установлено, что предел те-

кучести баллонной стали тем ниже, чем больше размер и количество аномальных зерен перлита.

Для установления взаимосвязи между величиной коэрцитивной силы  $H_c$  — наиболее чувствительным к структуре магнитным параметром — и толщиной стенки баллона на всю наружную поверхность баллонов наносилась координатная сетка с шагом 50 мм. В узлах этой сетки провели за-

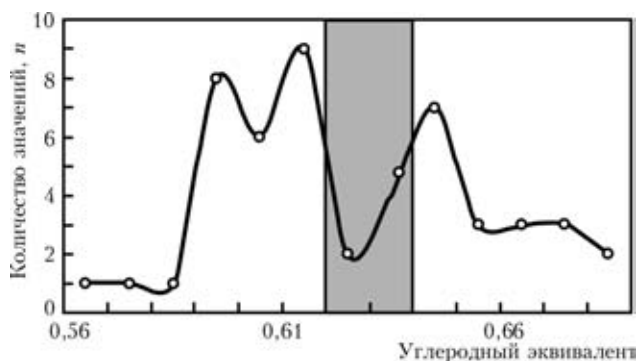


Рис. 1. Распределение величины углеродного эквивалента по выборке объемом  $N = 50$  по данным завода-изготовителя (заштрихованная область соответствует химическому составу металла баллонов после их длительной эксплуатации)

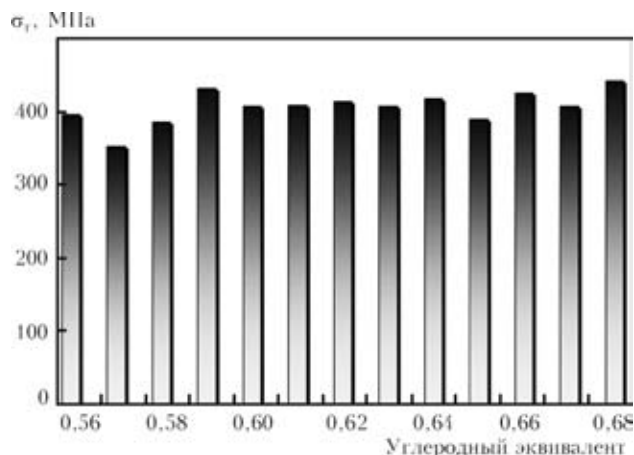


Рис. 2. Влияние величины углеродного эквивалента на предел текучести

Таблица 1. Объективные данные исследуемых баллонов

Исследуемый баллон	Заводской номер	Срок службы, лет	Толщина стенки, мм (min...max)	Коэрцитивная сила $H_c$ , А/см (min...max)	Фактический запас прочности $m$	Достоверность аппроксимации распределения коэрцитивной силы, $R^2_{\text{прод}}/R^2_{\text{кольцев.}}$
Б1	91200	45	5,6...9,0	6,0...9,4	3,16	0,6989/0,9406
Б2	147710	52	7,3...9,2	4,3...6,3	2,98	0,8425/0,9810
Б3	39280	18	8,8...9,8	5,1...7,8	2,45	0,8976/0,9390
Б4	269418	36	6,1...8,9	4,6...8,3	2,91	0,8716/0,9175
Б5	49607	49	7,4...8,0	4,7...6,9	2,50	0,7933/0,8402
Б6	189154	45	7,5...8,6	5,9...7,7	Не испытаны	-
Б7	3917	46	8,2...9,4	4,8...8,1	--"--	0,6039/0,9522
Б8	86482	48	7,4...8,9	4,7...9,2	--"--	Н/у/0,7431
Б9	153737	56	7,8...9,6	4,3...7,1	--"--	0,9261/0,9525
Б10	89952	48	6,1...10,3	4,2...7,7	--"--	0,9275/0,9275
Б11	2063	57	7,9...10,3	4,0...5,2	--"--	-
Б12	129277	27	7,7...10,4	5,8...8,5	--"--	0,7622/0,8763
Б13	35601	56	7,4...10,5	4,7...9,1	--"--	-
Б14	117769	69	7,0...9,9	4,8...8,0	--"--	0,7216/0,9558

Примечание. Н/у — корреляция не установлена

Таблица 2. Химический состав металла исследуемых баллонов, мас. %

Исследуемый баллон	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	$C_{\text{экр}}$
Б1	0,513	1,01	0,319	0,023	0,023	0,14	0,11	0,72
Б2	0,467	0,85	0,247	0,023	0,022	0,11	0,07	0,64
Б3	0,490	0,88	0,255	0,019	0,026	0,23	0,10	0,69
Б4	0,442	0,90	0,366	0,014	0,017	0,11	0,11	0,62
Б5	0,482	0,72	0,257	0,026	0,019	0,10	0,08	0,63



Таблица 3. Химический состав металла баллонов, изготовленных на ММК им. Ильича за период 2001–2008 гг., мас. %

C	Mn	Si	S	P	Ni	Cu	Cr	Ac1	Ac3	C <sub>экв</sub>
0,43	0,74	0,25	0,02	0,011	0,02	0,02	0,03	729,5	810,9	0,56
0,43	0,80	0,29	0,017	0,010	0,02	0,03	0,01	728,5	811,7	0,57
0,43	0,83	0,32	0,016	0,017	0,01	0,01	0,04	729,2	815,0	0,58
0,45	0,80	0,22	0,026	0,021	0,01	0,01	0,01	729,8	811,3	0,59
0,45	0,87	0,27	0,015	0,017	0,02	0,02	0,03	727,0	809,2	0,60
0,47	0,80	0,28	0,018	0,024	0,01	0,01	0,05	729,3	808,1	0,61
0,49	0,73	0,28	0,013	0,023	0,01	0,01	0,04	728,4	801,8	0,62
0,49	0,77	0,30	0,020	0,035	0,01	0,02	0,03	730,2	808,6	0,63
0,50	0,75	0,27	0,022	0,025	0,02	0,03	0,07	730,9	803,4	0,64
0,50	0,84	0,19	0,019	0,017	0,01	0,01	0,03	726,9	798,0	0,65
0,53	0,76	0,26	0,021	0,017	-	-	0,03	729,8	795,6	0,66
0,53	0,77	0,28	0,020	0,019	0,01	0,01	0,04	729,9	796,7	0,67
0,52	0,85	0,23	0,018	0,025	0,02	0,01	0,06	727,6	798,2	0,68

меры толщины оболочки толщиномером ТУЗ-2 и коэрцитивной силы структуроскопом КРМ-Ц-К2М вдоль цилиндра и в кольцевом направлении. Обоснованием измерения магнитных характеристик не менее чем в двух направлениях является, как известно, анизотропия структурных параметров и механических свойств металла оболочек.

Известно, что с увеличением пластической деформации коэрцитивная сила, измеренная вдоль цилиндра, существенно возрастает, а измеренная в кольцевом направлении тоже увеличивается, но меньше, чем в первом случае [5]. Как показано в работе [8], по характеру распределения и величине коэрцитивной силы можно судить о режиме эксплуатации баллонов: надежный (до 7,5 А/см); контролируемый (7,5...9 А/см) и критический (выше 9 А/см), в то время, как в новых баллонах значения коэрцитивной силы составляют  $H_c = 4...6$  А/см.

Наши исследования показали, что в баллонах после продолжительной эксплуатации значения коэрцитивной силы преимущественно не превышают контролируемый порог (см. табл. 1). Однако в некоторых баллонах обнаружены локальные участки, отвечающие критическому режиму эксплуатации. Так, в баллоне Б1 при испытании хоть и достигнут высокий запас прочности ( $m = 3,16$ , табл. 1), наблюдаются участки (100 см<sup>2</sup>) с высокими значениями коэрцитивной силы.

Статистический анализ данных, полученных с 480-ти участков каждой цилиндрической оболочки, показал, что распределение коэрцитивной силы в ней можно аппроксимировать полиномом 6-й степени (рис. 3). Величина достоверности составляет  $R^2 = 0,6...0,96$  (см. табл. 1). При этом максимальному количеству повторяющихся значений в продольном направлении (рис. 3, а, в) соответствуют более высокие показатели коэрцитивной силы, чем в кольцевом (рис. 3, б, г).

Таким образом, учитывая, что значения коэрцитивной силы в новых баллонах составляют  $H_c = 4...6$  А/см, а в состоянии предразрушения  $H_c \geq 9,5$  А/см, полученные результаты свидетельствуют о том, что при отсутствии недопустимых повреждений в стенках баллонов состояние металла после длительного срока эксплуатации в основном продолжает оставаться удовлетворительным.

Сопоставление данных толщинометрии (рис. 4) и коэрцитивной силы показало, что с уменьшением толщины оболочки коэрцитивная сила увеличивается (рис. 5). Подтверждением установленной закономерности может служить испытание вплоть до разрушения баллона Б1. Несмотря на то, что баллон, как отмечалось, имеет высокий запас прочности, место разрушения было определено до испытания, поскольку в результате измерений обнаружили участок с высокой коэрцитивной силой (9,3...9,4 А/см), которому соответствовала минимальная толщина стенки (5,6...5,9 мм).

Следует отметить, что корреляция между  $H_c(y)$  и  $\delta(x)$  в основном характеризуется линейной зависимостью типа  $y = Ax + B$ , а значения коэрцитивной силы, измеренные в одних и тех же точках вдоль цилиндра и в кольцевом направлении, располагаются эквидистантно. При этом значения, измеренные в продольном направлении, лежат выше значений, измеренных в кольцевом направлении (рис. 5). Однако в ряде случаев линейность нарушается, что, по всей видимости, может быть обусловлено накоплением усталостных повреждений [9, 10], особенностями напряженно-деформированного состояния стенок баллонов, а также структурными изменениями в металле и требует дальнейшего изучения.

Полученные результаты хорошо согласуются с выводами, приведенными в работе [11], где при увеличении деформации (на основании данных оптической металлографии и кристаллографичес-

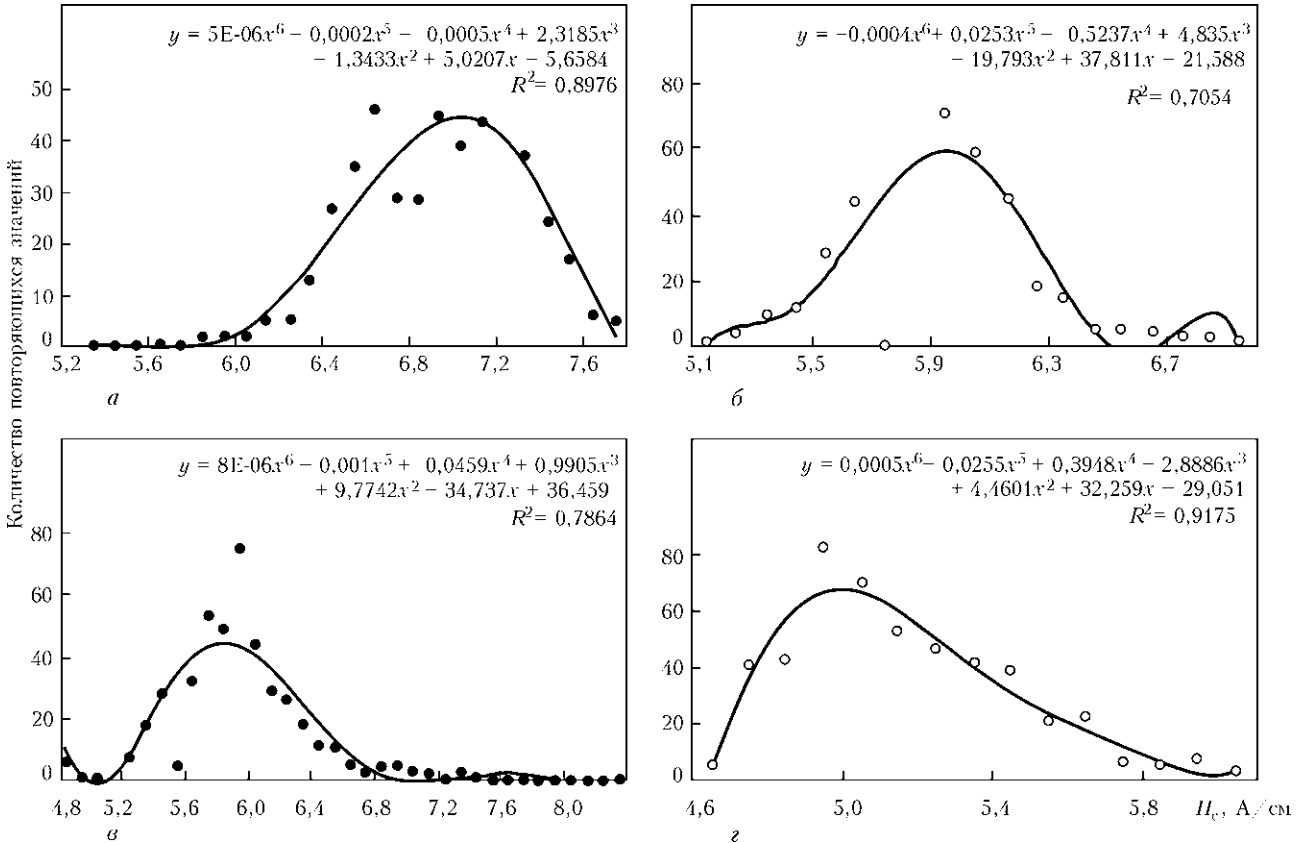


Рис. 3. Статистический анализ распределения коэрцитивной силы в оболочках баллонов: Б3 (а, б); Б4 (в, г); а, в — продольное; б, г — кольцевое направление

кой текстуры) установлена линейная корреляция между коэрцитивной силой  $H_c$  и структурно-текстурными параметрами.

Для развития этих представлений на фрагментах из отобранных пяти баллонов (см. табл. 1) были проведены металлофизические исследования.

Прежде всего представляется целесообразным рассмотреть микроструктуру металла, которая в стенках баллонов Б1, Б2, Б4 и Б5 по существу идентична и представляет собой ферритно-перлитную смесь с баллом зерна феррита № 8 по шкале [12]. При этом с внутренней поверхности сформирована четкая текстура проката, тогда как в середине толщины — слабовыраженная полосчатость и с наружной поверхности — практически равноосная структура (рис. 6, а, в).

Что касается повреждений, то в Б1 с внутренней поверхности кроме общей коррозии наблю-

дается обезуглероженный слой, в котором происходит снижение микротвердости до HV0,1—1810...1930 МПа по сравнению со средним сечением HV0,1—2210...2280 МПа. В меньшей степени подвержена общей коррозии наружная поверхность баллона Б1. Повреждения внутренней поверхности в Б2 более существенны по сравнению с Б1. Кроме того, характерной особенностью здесь является обезуглероживание не только с внутренней, но и с наружной поверхности, где происходит снижение микротвердости до HV0,1—1470 МПа, по сравнению с серединой толщины — HV0,1—1970...2030 МПа. В Б4 внутренняя и наружная поверхности повреждены об-

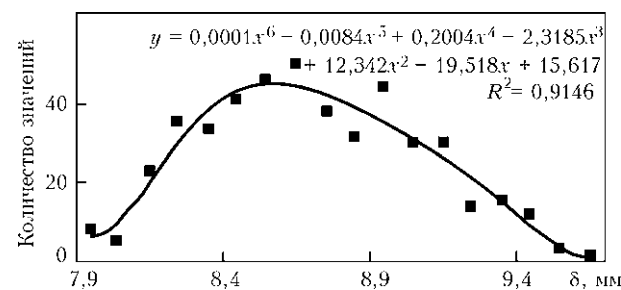


Рис. 4. Статистический анализ распределения толщины оболочки  $\delta$  в баллоне Б9

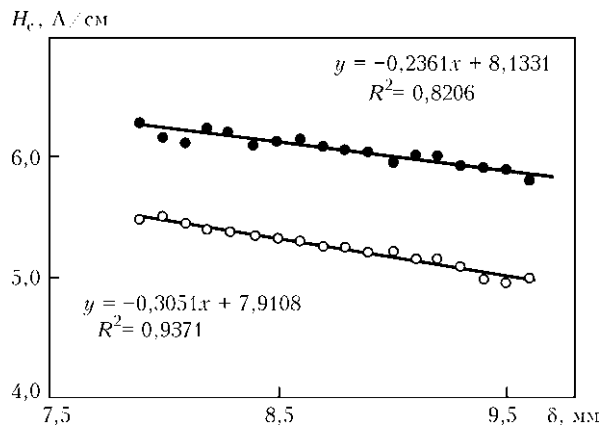


Рис. 5. Влияние толщины оболочки  $\delta$  на  $H_c$  в Б9: темные точки — продольное направление, светлые — кольцевое

щей коррозией. В Б5 с внутренней поверхности наиболее значительные повреждения, однако здесь наблюдается повышение микротвердости до HV0,1—2320...2740 МПа. Микроструктура металла стенки баллона Б3 существенно отличается от структуры металла Б1, Б2, Б4 и Б5 и представляет собой крупнозернистую перлитную структуру с тонкими выделениями феррита по границам перлитных зерен, балл зерна № 3...4. На обеих поверхностях стенки имеет место обезуглероживание, более ярко проявившееся на наружной поверхности (рис. 6, б), что, по всей видимости, вызванное высокотемпературным нагревом.

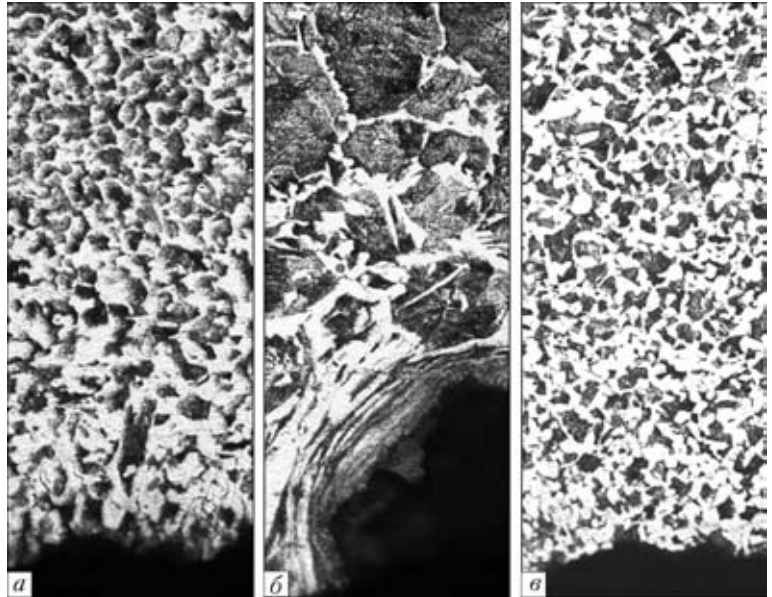


Рис. 6. Микроструктура (×200) металла на наружной поверхности стенки баллонов: а — Б1; б — Б3; в — Б5

Таким образом, наиболее неблагоприятная микроструктура у металла баллона Б3 — крупное зерно и обезуглероживанные слои как с наружной, так и с внутренней поверхности.

Для дальнейшего исследования влияния структурных составляющих на изменение коэрцитивной силы в связи с изменением толщины стенки была определена кристаллографическая текстура металла методом построения обратных полюсных фигур [13, 14]. Измерение интегральных интенсивностей дифракционных рефлексов от кристаллографических плоскостей (110), (200), (211), (220), (310), (222), (321) проводили на образцах из наружного и внутреннего приповерхностного сечения цилиндрической оболочки корпуса после снятия окалины, а также из срединного слоя в сравнении с эталоном, который был приготовлен из мелких рекристаллизованных опилок исследуемой стали. Для удаления деформированного при механической шлифовке слоя осуществляли его химическую полировку на глубину 0,1 мм. Сканирование проводили на дифрактометре ДРОН-3 в одинаковых условиях съемки. Находили отношения интегральных интенсивностей линий дифракции исследуемых образцов и эталона. Приведенная полюсная плотность  $P_{hkl}$  пропорциональна отношению интенсивности линии в текстурированном образце и образце без текстуры [13, 14]:

$$P_{hkl} = \frac{I_{hkl}^T}{I_{hkl}^0} K.$$

Как показали исследования, текстура металла баллонов в основном представлена семейством плоскостей {110} и {001} (рис. 7), так как их плотность на полюсных фигурах превышает единицу, которая соответствует отсутствию текстуры.

При этом основными компонентами текстуры являются ориентировки {001} <110>, {112} <110> и {110} <001-112>, типичные для текстуры прокатки ОЦК-металлов и сплавов. Следует отме-

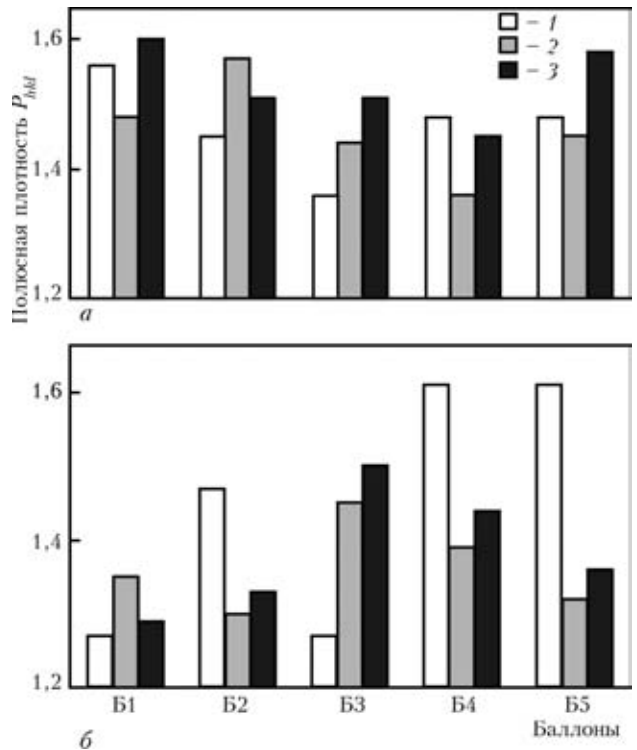


Рис. 7. Распределение кристаллографических плоскостей в разных сечениях стенки корпуса: а — плоскости семейства {110}; б — {001}; 1 — наружная поверхность; 2 — срединное сечение; 3 — внутренняя поверхность

тить, что кристаллографическая текстура по толщине стенки баллонов неоднородна. Особенно обращает на себя внимание равномерное ступенчатое уменьшение полюсной плотности плоскостей {110} и {001} от внутренней к наружной поверхности стенки в металле баллона Б3. Существенное снижение этих величин со стороны наружной поверхности по сравнению с внутренней свидетельствует о том, что в металле произошли фазовые и структурные изменения, связанные, по-



видимому, с высокотемпературным нагревом наружной поверхности баллона.

Проведенный анализ показал, что между фазовыми превращениями и структурными параметрами, с одной стороны, и кристаллографическим типом текстуры, с другой, существует определенная корреляция. Тем не менее, наличие крупного зерна в БЗ (рис. 6, б) обусловило, по всей видимости, снижение фактического запаса прочности (см. табл. 1), несмотря на подавление «хрупкой» компоненты (001) с наружной поверхности (см. рис. 7), что требует дальнейших исследований.

## Выводы

1. Установлено, что химический состав металла баллонов после длительного срока эксплуатации (45 лет и более) не претерпевает существенных изменений по сравнению с металлом новых баллонов, о чем свидетельствует величина углеродного эквивалента.

2. Показано, что предел текучести металла баллонов  $\sigma_T$  по существу не зависит от незначительных колебаний в содержании основных легирующих элементов в составе стали Дс.

3. Обнаружено, что структура металла баллонов после длительных сроков эксплуатации представляет собой ферритно-перлитную смесь с баллом зерна феррита № 8, переходящей от структуры проката с внутренней поверхности к практически равноосной структуре с наружной. При этом среди повреждений, кроме общей коррозии, наблюдается обезуглероженный слой, в ряде случаев с обеих поверхностей.

4. Показано, что в результате высокотемпературного нагрева в металле баллона БЗ произошли фазовые превращения, сопровождающиеся ростом зерна, с одной стороны, и изменением кристаллографических параметров, с другой, что обусловило снижение фактического запаса прочности по сравнению с другими баллонами, подвергнутыми испытаниям.

5. Определено, что с увеличением толщины стенки коэрцитивная сила уменьшается, а соотношение между  $H_c(y)$  и  $\delta(x)$  в основном можно аппроксимировать линейной зависимостью типа  $y = Ax + B$ . При этом значения коэрцитивной силы, измеренные в одних и тех же точках вдоль цилиндра и в кольцевом направлении, эквидистантны.

6. Установленная корреляция между толщиной оболочки и коэрцитивной силой открывает перспективу использования коэрцитиметрии для об-

наружения опасных зон и повышения безопасной эксплуатации баллонов.

Авторы благодарят: В. В. Усова — д-ра физ.-мат. наук, проф. ЮГПУ им. К. Д. Ушинского МОН Украины и Н. М. Шкатуляк — канд. физ.-мат. наук, доц. ЮГПУ им. К. Д. Ушинского МОН Украины за проведение рентгеноструктурного анализа; Р. И. Дмитриенко — инженера ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ за участие в проведении расчетов по определению коэрцитивной силы.

1. Рубан А. Г. Международный опыт обновления газобаллонного парка производителей промышленных газов // Технические газы. — 2009. — № 6. — С. 54–63.
2. ДНАОП 0.00-1.07-94. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением (с изменениями и дополнениями).
3. ГОСТ 949-73. Баллоны стальные малого и среднего объема для газов на  $P_p \leq 19,6$  МПа.
4. Чижиченко В. П. Взрывобезопасность кислородных баллонов // Технические газы. — 2009. — № 6. — С. 64–65.
5. Анализ разрушений и возможности контроля состояния металла кислородных баллонов / В. М. Долинский, В. М. Стогний, В. Г. Новик и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2001. — № 4. — С. 33–36.
6. Белосточный А. В., Троцан А. И., Коротич И. К. Исследование металла цельнометаллических баллонов для сжатых газов, разрушившихся при эксплуатации // Вісник Приазовського держ. техн. ун-ту. — 2009. — Вип. 19. — С. 91–94.
7. Белосточный А. В., Лаухин Д. В. Исследование структурных особенностей металла цельнометаллических сосудов, работающих под давлением, с целью стабилизации механических свойств // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. научных тр.: Стародубовские чтения, Днепропетровск. — 2005. — Вып. 32. — Ч.1. — С. 133–135.
8. Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса сосудов, работающих под давлением / Б. Е. Попов, Е. А. Левин, В. С. Котельников и др. // Безопасность труда в промышленности. — 2001. — № 3. — С. 25–30.
9. Оценка усталостного состояния и остаточного ресурса сварных соединений неразрушающими магнитными методами для обеспечения качества сварных конструкций и изделий / Л. М. Лобанов, Ю. К. Бондаренко, Г. Я. Безлюдько, А. Ю. Бондаренко // Докл. 54-й Ежегодной конф. Международного института сварки (Словения), 2001, июль.
10. Безлюдько Г. Я., Елкина Е. И., Соломаха Р. Н. Коэрцитиметрия делает диагностику достовернее и дешевле // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2009. — № 3. — С. 59–60.
11. Анизотропия коэрцитивной силы и текстура деформируемой стали / Л. М. Лобанов, В. А. Нехотящий, М. Д. Рабкина и др. // Деформация и разрушение материалов. — 2010. — № 10. — С. 19–25.
12. ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна.
13. Бородкина М. М., Спектор Э. Н. Рентгенографический анализ текстур в металлах и сплавах. — М.: Металлургия, 1982. — 272 с.
14. Горелик С. С., Расторгуев Л. Н., Скаков Ю. А. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. — М.: Металлургия, 1970. — 366 с.

Поступила в редакцию  
28.11.2010