

УДК. 620.192.7

Белосточный А.В.<sup>1</sup>, Троцан А.И.<sup>2</sup>, Коротич И.К.<sup>3</sup>

### **ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАЛЛА ЦЕЛЬНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ БАЛЛОНОВ ДЛЯ СЖАТЫХ ГАЗОВ, РАЗРУШИВШИХСЯ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

*По результатам исследования металла газовых баллонов, разрушившихся при эксплуатации, установлены основные закономерности характера разрушения, особенности изменения механических свойств, микроструктуры и изломов в зависимости от причин, вызвавших разрушение.*

Цельнометаллические баллоны для сжатых газов представляют самую многочисленную группу сосудов, работающих под давлением. Подавляющую долю их общего количества составляют баллоны среднего объема из углеродистой стали.

Баллоны относятся к потенциально опасным объектам. Высвобождение накопленной потенциальной энергии газа, находящегося под высоким давлением, при аварийном разрушении корпуса баллона приводит к значительным разрушениям конструкций зданий, травмам и гибели людей.

Аварии баллонов при эксплуатации происходят по ряду причин технического или эксплуатационного характера. К техническим относятся причины, обусловленные неудовлетворительным состоянием сосудов из-за интенсивного коррозионного износа стенок, приводящего к снижению величины параметров ниже проектных, наличия скрытых дефектов металла, не выявленных изготовителем сосудов методами контроля, либо дефектов, внесенных при эксплуатации и др. Причиной разрушения сосудов при удовлетворительном их техническом состоянии является превышение в процессе эксплуатации напряжений в стенках выше предельно допустимых. Такое превышение может быть вызвано силами как статического характера при создании в сосуде давления значительно выше рабочего, так и динамического характера в результате детонационного возгорания газа внутри баллона. Объективная информация, необходимая для установления конкретных причин аварии сосудов, может быть получена только при исследовании металла разрушившихся баллонов. В настоящее время данные по исследованию этого металла в литературе, за исключением [1, 2], практически отсутствуют.

Целью данной работы является установление закономерностей разрушения корпусов баллонов, особенностей изменения механических свойств, микроструктуры металла, строения изломов, характерных для конкретных причин, вызвавших эти разрушения.

Исследование проводилось на металле баллонов объемом 40 л из углеродистой стали марки Дс, изготовленных по ГОСТ 949-73, разрушившихся при эксплуатации за период 1996 – 2008 г.г. (более 10 случаев), по которым авторами производилось независимое расследование в том числе и непосредственно на местах аварий, а также по результатам полигонных исследований и изучения причин разрушения баллонов при гидравлических испытаниях. Для оценки исходного (до разрушения баллонов) состояния металла принимались, в качестве базовых, статистические данные свойств, определяемых при сдаточных испытаниях партий баллонов текущего производства ОАО «ММК им. Ильича».

Особенностью цельнометаллических баллонов, имеющих в конструктивном исполнении вытянутую цилиндрическую часть и две сферические, является неоднородное распределение при эксплуатации рабочих напряжений в их различных зонах. Эта особенность во многом предопределяет характер аварийного разрушения сосудов при эксплуатации.

<sup>1</sup>ОАО "ММК им. Ильича", инж.

<sup>2</sup>ПГТУ, д-р техн. наук, проф.

<sup>3</sup>ПГТУ, канд. техн. наук, доц.

Исследования показали, что разрушение баллонов, имевших неудовлетворительное техническое состояние из-за значительного коррозионного повреждения поверхностей и наличия скрытых дефектов металла, начинается из единичного очага, находящегося, как правило, на их цилиндрической части. Аналогично происходит разрушение баллонов, подвергнутых локальным ударным нагрузкам по корпусу при эксплуатации или нагруженных внутренним давлением, значительно превышающим расчетное. Ход развития разрушения и количество образовавшихся осколков зависит от ряда факторов: от размеров сосудов и величины давления в них на момент разрушения, определяющих запасенную энергию, механических свойств стали, в первую очередь, уровня ударной вязкости, от которого зависит характер разрушения [4, 5], от технического состояния поверхности сосудов.

Деление корпусов баллонов из углеродистой стали при разрушениях, вызванных указанными факторами, происходит на относительно крупные части от 3 – 5, в отдельных случаях до десяти и более (рис. 1).



Рис. 1 – Характер разрушения корпусов баллонов под действием статистических сил, вызванных внутренним давлением

Большинство осколков претерпевают деформацию по форме как непосредственно в процессе разрыва оболочки, что было экспериментально установлено при полигонных исследованиях, так и в результате удара их о препятствия при разлете. Следует отметить, что при этом толщины стенок всех осколков по краям и вдали от зоны разрушения остаются практически равными. Поверхность изломов осколков имеет строение, характерное для хрупкого скоростного разрушения. Исследования механических свойств металла осколков показали, что величины прочностных, пластических и вязких характеристик находятся на уровне базовых статистических значений стандартных испытаний (табл. 1, баллоны 1, 2).

Таблица 1 – Механические свойства металла баллонов

Условный № баллона	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta_5$ , %	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	НВ
1	376-384	731-747	18-19	29,4-58,9	207-217
2	373-351	724-733	20-22	41,7-58,0	207-197
3	740-750	810-830	6-10	37,0-47,0	235-248
4	626-652	859-874	16-17	36,8-51,5	223-241
Базовый уровень	374-457	641-841	16-28	32,0-125	171-229
Требования ГОСТ 949-73 (не менее)	373	638	15	29,4	-

Разрушение корпусов, вызванное детонационным (взрывным) горением газа внутри сосудов, имеет свои особенности. Динамический характер приложенных сил приводит к делению корпуса как на крупные осколки, так и на мелкие. Размер отдельных осколков колеблется от десятков до нескольких сотен миллиметров. В зависимости от величины сил, вызвавших разрушение, количество осколков может достигать нескольких сотен (рис. 2).

Крупные осколки в большинстве случаев представляют собой сферические части сосудов, а также примыкающие к ним части цилиндра. Эти осколки практически не претерпевают деформацию. Исследования показали, что твердость и механические свойства металла этих осколков находятся практически на уровне базовых. Изменений в микроструктуре металла не выявлено. Наличие на поверхности многих осколков характерного шевронного узора различной направленности свидетельствует о многоочаговости разрушения (рис. 3).



Рис. 2 – Характер разрушения корпусов баллонов под действием динамических сил, вызванных взрывом газа внутри сосуда



Рис. 3 – Характер изломов крупных осколков разрушенных баллонов (очаги разрушения указаны стрелками)

Мелкие осколки представляют собой части разрушившейся цилиндрической зоны баллона. Существенное различие толщины осколков, неоднородность твердости по их площади, повышенный уровень прочностных характеристик (табл. 1, баллоны 3, 4) свидетельствуют о том, что разрушению предшествует значительная неоднородная пластическая деформация цилиндрической части баллона. О протекании такой пластической деформации свидетельствуют также выявленные на осколках трещины, форма осколков (рис. 4) и наличие в микроструктуре металла вытянутых зерен.



Рис. 4 – Форма мелких осколков при разрушении в результате взрыва газа внутри сосуда

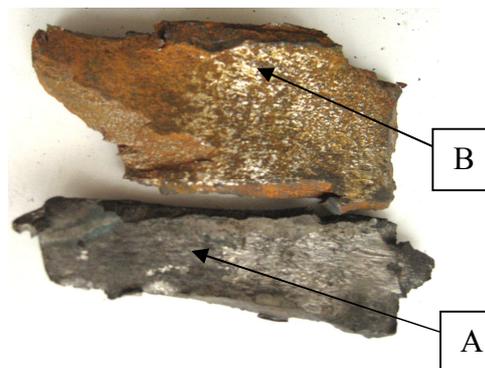


Рис. 5 – Характер внутренней поверхности осколков баллонов при взрыве газа внутри сосуда

Отличительной особенностью разрушения сосудов, вызванного взрывом газа внутри них, является также наличие на внутренней поверхности осколков, а в случае значительной пластической деформации и на поверхности их изломов цветов побежалости (рис. 5, стрелка А), свидетельствующих о нагреве металла до высоких температур. Отдельные осколки разрушенных баллонов в ряде случаев имеют характерную блестящую внутреннюю поверхность белого или золотистого цвета (рис. 5, стрелка В). В микроструктуре металла это проявляется в виде тонких пленок на поверхности шлифов. Наличие таких пленок в ряде экспертных заключений по исследованию металла разрушившихся при эксплуатации баллонов связывают с высоким содер-

жанием примесей цветных металлов (цинка, меди, олова) и обусловленной этими элементами значительной ликвационной неоднородностью стали, проявляющейся в трубах, использованных для изготовления этих сосудов. Для проверки этого положения был проведен анализ химического состава металла осколков, имеющих цветную пленку на поверхности (табл. 2).

Таблица 2 – Содержание примесей цветных металлов в осколках баллона из стали Дс

Место отбора пробы	Содержание элементов (в % по массе)		
	Cu	Zn	Sn
Основной металл	0,025	–	–
Поверхностная пленка	0,43	0,057	0,001
Требование ТУ (не более)	0,30	–	–

Полученные данные показали отсутствие ликвационной неоднородности основного металла баллона: во всех пробах содержание примесей было значительно ниже требований ТУ. Повышенное количество примесей цветных металлов было обнаружено только в поверхностной пленке. Очевидно, образование таких пленок обусловлено детонационным напылением на внутреннюю поверхность осколков элементов, входящих в состав латунных вентилях сосудов, претерпевающих при высоких температурах взрыва поверхностное оплавление.

#### Выводы

1. Установлено, что разрушение баллонов под действием сил статического характера начинается из единичного очага, деление корпуса происходит на небольшое количество частей, не сопровождается деформацией по толщине стенок и не приводит к изменению механических свойств и микроструктуры металла.
2. Разрушение баллонов под действием сил динамического характера, обусловленных взрывным горением газа в их рабочем объеме, инициируется из множества очагов с образованием большого количества как мелких, так и относительно крупных осколков. Мелкие осколки претерпевают значительную неоднородную деформацию по толщине, приводящую к изменению микроструктуры и увеличению прочностных свойств. На внутренней поверхности осколков наблюдаются пленки высокотемпературных окислов стали.
3. Направлением дальнейших исследований является разработка методики выявления причин разрушения баллонов по результатам исследования металла образовавшихся осколков.

#### Перечень ссылок

1. Исследование металла автомобильных баллонов после эксплуатации в различных регионах / Т.А. Бейлинова, И.А. Стороженко, В.В. Белосточный, Е.Н. Василенко, А.Ф. Дудник // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1992. – № 4. – С. 37 – 38.
2. Анализ разрушений и возможности контроля состояния металла кислородных баллонов / В.М. Долинский, В.Н. Стогний, В.Г. Новик и др. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2001. – № 4. – С. 33 – 36.
3. ГОСТ 949-73. Баллоны стальные малого и среднего объема для газов на  $P_p \leq 19,6$  МПа. Технические условия.
4. Мирошниченко Б.И. Разработка расчетно – экспериментальных методов локализации протяженных разрушений в магистральных газопроводах: автореф. дис ...канд. техн. наук: 05.15.07 / Б.И. Мирошниченко; Московск. ин-т нефтехим. и газов. пром. – М., 1981. – 22 с.
5. К оценке надежности стали 38ХА для баллонов высокого давления / Т.А. Бейлинова, В.М. Янковский, В.А. Бурнос и др. // Заводская лаборатория. – 1974. – № 5. – С. 590 – 591.

Рецензент: В.Г. Ефременко  
д-р техн. наук, проф. ПГТУ

Статья поступила 17.02.2009