

АНАЛИЗ РАЗРУШЕНИЙ И ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА КИСЛОРОДНЫХ БАЛЛОНОВ

В. М. ДОЛИНСКИЙ, В. Н. СТОГНИЙ, В. Г. НОВИК, Д. Г. РЯУЗОВ, В. И. ЧЕРЕМСКАЯ, Г. Я. БЕЗЛЮДЬКО, Е. И. ЕЛКИНА, А. И. ИЛЬИНСКИЙ

В последнее время участились случаи аварийного разрушения кислородных баллонов. В 1998–2001 гг. в УкрНИИХиммаше было рассмотрено четыре случая аварийных разрушений кислородных баллонов на территории Украины. В исследованиях по выяснению причин разрушения принимали также участие сотрудники кафедры «Материаловедение» Харьковского национального политехнического университета и фирмы «Специальные научные разработки».

Во всех случаях разрушались баллоны, изготовленные из стали Дс, емкостью 40 литров с рабочим давлением 15 МПа. Их характеристики представлены в табл. 1. Только в одном случае (№ 1, табл. 1) баллон разрушился при рабочем давлении 15 МПа при заправке на Харьковском автогенном заводе. В остальных трех разрушение наступило в рабочих условиях при газопламенной резке металла в результате внезапного повышения давления до уровня, в несколько раз превышающего рабочее давление.

Проведенные металлографические экспертизы показали, что во всех случаях химический состав стали удовлетворял нормативным требованиям. Ее структура представляла перлитно-ферритную смесь, содержащую включения MnS или FeS, что характерно для данного типа стали [1]. Механические характеристики также удовлетворяют нормативным требованиям [2]. Металл был достаточно пластичным, а запасы прочности для трех баллонов превышали допустимое значение, равное 2,6 [3].

В единственном случае (№ 1) запас прочности оказался меньше единицы. Такое явление возникло в результате коррозионно-усталостного роста тре-

щин. Трещины «проросли» на большей части толщины стенки сосуда, так что остаточная толщина составляла 0,56... 2,00 мм. Берега трещины имели коррозионные отложения, что свидетельствует о значительном сроке ее развития (этот вывод подтвержден также фрактографическими исследованиями). В рассматриваемом случае баллон разорвался только на пять частей, тогда как в остальных случаях число осколков составляло несколько десятков, некоторые разлетелись на значительное расстояние, и найти их не удалось. Шевронный профиль поверхностей разрыва свидетельствовал о большой скорости процесса. На ряде фрагментов баллонов имелись неглубокие (1... 2 мм) трещины. Это обстоятельство дает основание для предположения, что причиной их инициирования в баллоне (случай № 1) могло быть повышение давления выше рабочих параметров.

На представленных фрагментах всех разрушенных баллонов измерялась коэрцитивная сила (КС) структуроскопом КРМ-ЦК-2. Как известно [4], ее приращение коррелирует с приращением пластических деформаций. При этом для каждой марки углеродистой стали существует свое предельное значение КС, соответствующее предельным механическим характеристикам: пределу прочности, остаточным удлинениям при разрыве, поперечному сужению образца [5].

Для оценки процесса накопления пластических деформаций стали Дс на Ждановском металлургическом комбинате был выполнен комплекс исследований, включающий измерения КС в процессе изготовления баллонов, а также их гидравлического нагружения в области упругих и пластических

Таблица 1. Характеристики аварийно-разрушившихся баллонов

№ п/п	№ баллона	Год изготовл.	Год аварийного разруш.	S , мм	S_n , мм	R_m , МПа	R_m^u , МПа	R_c , МПа	R_c^u , МПа
1	243882	1969	1998	6,4	6,8	688	638	376	373
2	И26108	1963	1999	6,6	6,8	669	638	—	373
3	—	—	2000	6,5	6,8	695	638	368	373
4	100462	—	2000	7,1	6,8	764	638	557	373

Продолжение таблицы 1

№ п/п	δ_s , %	δ_s^u , %	Ψ , %	a , Дж/см ²	a_n , Дж/см ²	p_m , МПа	n_b	n_b^u	H_m , А/см
1	21,5	15,0	33,0	37	30	12,0	0,80	2,6	10,0
2	18,0	15,0	52,0	45	30	41,7	2,78	2,6	—
3	21,0	15,0	36,0	41	30	42,6	2,84	2,6	10,5
4	17,8	15,0	41,0	30	30	51,2	3,41	2,6	10,2

Примечания: 1. S , S_n — минимальная толщина стенки; R_m , R_m^u — предел прочности материала; R_c , R_c^u — предел текучести материала; δ_s , δ_s^u — относительное удлинение; Ψ — относительное сужение; a — ударная вязкость; p_m — разрушающее давление; n_b , n_b^u — коэффициент запаса по пределу прочности; H_m — КС.

2. Обозначениям с индексом «и» соответствуют значениям по [1].

Таблица 2. Программа испытаний на циклическую прочность

Давление, МПа	17,0	22,5	27,0	31,5	37,5	41,5	44,0	46,0	47,0
Количество циклов нагружения	10001	101	2	100	201	100	100	100	45

деформаций при статически и циклически изменяющейся нагрузке вплоть до разрушения.

Установлено, что на заготовках-трубах наибольшие значения КС (5,5... 6,5 А/см) возникают в продольном направлении — в поперечном значения КС на 1,0... 1,5 А/см меньше. В процессе закатки значения КС на цилиндрической части корпуса возрастают, достигая 7 А/см. При этом поперечная КС практически не меняется. На днищах значения КС находятся в пределах 3... 4 А/см. При термообработке (нормализация при 830... 870 °С и охлаждение на воздухе) значения КС не изменяются, как и в процессе гидравлических испытаний при давлении 22,5 А/см.

Для проверки предположения о зависимости накопления пластических деформаций от срока эксплуатации объекта были выполнены замеры КС баллонов на Харьковском автогенном заводе и на ОАО «Житомирвртормет» (всего было обследовано около 150 штук). На рис. 1 представлены результаты замеров КС и срок службы для произвольной выборки из 20 объектов. Как видно, корреляционная связь между КС и временем эксплуатации отсутствует.

Для исследования изменения КС в процессе накопления деформаций были отобраны 8 баллонов (5 Харьковского автогенного завода и 3 Южной железной дороги). На каждом из них измеряли значения толщины стенки (ультразвуковым толщиномером УТ-93П), диаметра (микрометрической скобой) и КС (структуроскопом КРМ-ЦК-2). Указанные измерения проводились в десяти осевых сечениях по шести образующим цилиндрической части корпуса. Кроме того, выборочно выполнялся контроль на наличие трещин с помощью ультразвукового дефектоскопа УД2-12, а также измерялась твердость металла на пределах текучести и прочности [6, 7]. После этого определялись сами пределы текучести и прочности.

Все баллоны подвергали гидравлическому давлению до разрушения. Один баллон исследовали при циклическом нагружении по режиму, приведенному в табл. 2, остальные — при ступенчатом статистическом. На каждой ступени нагружения выполнялись указанные выше замеры в нагруженном и разгруженном состоянии за исключением

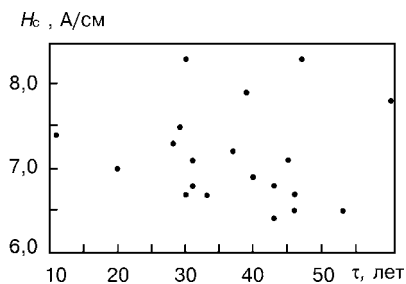


Рис. 1. Максимальные значения продольной КС H_c материалов обследованных баллонов в зависимости от отработанного ресурса τ .

трех-пяти последних ступеней, где измерения выполнялись только в разгруженном состоянии.

Расчетным путем определяли радиальные пластические деформации ϵ при степенной зависимости интенсивности напряжений — интенсивности деформаций [8]:

$$\epsilon = \frac{\sqrt{3}}{2} \left[\frac{\sqrt{3}p(D-S)}{4AS} \right]^{1/n}$$

где p — давление; D, S — соответственно наружный диаметр и толщина стенки корпуса; A, n — коэффициенты степенной зависимости интенсивности напряжений — интенсивности деформаций. Полученные теоретические данные удовлетворительно согласуются с экспериментальными (рис. 2).

Определялись также предельные давления соответственно на пределах прочности (p_m), текучести p_y и устойчивого пластического деформирования p_e :

$$p_m = R_m [2S/(D-S)], \quad p_y = 2(2/\sqrt{3})^{(1+n)} A [S/(D-S)] \epsilon_y^n, \\ \epsilon_y = \exp(n/2) - 1, \quad p_e = R_e [2S/(D-S)].$$

Здесь R_e, R_m — соответственно пределы текучести и прочности; ϵ_y — относительные деформации по условию устойчивости пластического деформирования.

Обобщенные данные расчетов представлены в табл. 3.

Анализ полученных результатов позволяет установить определенные закономерности:

1. Толщины днищ на 2... 4 мм больше максимальных значений толщин на цилиндрической части корпуса. Толщины цилиндрической части корпуса не одинаковы — на каждом баллоне разность между их максимальным и минимальным значением лежит в пределах 1... 2 мм.

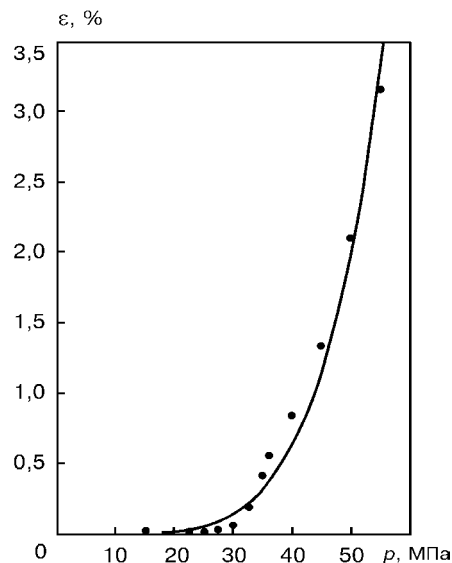


Рис. 2. Зависимость радиальных деформаций от давления: точки — экспериментальная; кривая — теоретическая.

Таблица 3. Результаты расчетов и гидротестирования партии баллонов

Параметр	Порядковый номер баллона								Нормат. данные
	1	2	3	4	5	6	7	8	
№ заводск.	132752	121846	83678	120069	5302	911	42959	14810	—
Год изгот.	1951	1954	1958	1965	1969	1973	1985	1989	—
D_{max} , мм	—	222,92	222,26	—	221,60	220,85	221,76	221,13	222,2
D_{min} , мм	—	222,11	219,31	—	220,74	219,47	221,10	220,31	215,7
S_{min} , мм	6,1	6,3	7,3	7,7	7,0	7,9	7,4	6,6	6,8
R_m , МПа	676	672	634	651	619	634	593	698	638
R_e , МПа	384	—	320	—	—	354	310	—	373
P_m , МПа	38,8	39,2	43,4	47,5	40,6	47,2	41,0	43,0	—
p_y , МПа	—	51,7	49,8	—	55,0	62,5	48,8	58,5	—
p_m , МПа	37,1	46,4	48,3	47,3	51,5	56,1	49,2	55,3	—
n_m	2,47	3,09	3,22	3,15	3,48	3,74	3,28	3,69	2,6
p_e , МПа	21,3	—	21,0	—	—	25,4	20,7	—	—
p_e^* , МПа	32,1	29,6	31,2	31,4	27,5	32,0	29,3	32,5	—
ϵ_y , %	—	8,1	7,4	—	7,2	8,9	4,7	7,5	—
ϵ_m , %	2,42	2,51	2,57	2,63	2,95	3,17	5,65	2,53	—
K_c , А/см	7,7	7,1	7,2	7,7	6,8	7,5	6,2	7,8	—
K_m , А/см	10,1	10,8	9,3	10,2	9,8	10,0	9,5	10,4	—
ΔK , А/см	2,4	3,7	2,1	2,5	3,0	2,5	3,3	2,6	—

Примечание: D_{max} , D_{min} — максимальный и минимальный наружные диаметры; S_{min} — минимальная толщина стенки; R_m , R_e — соответственно пределы прочности и текучести материала; p_m , p_e , p_y — давления на пределах прочности, текучести и устойчивости пластического деформирования; (значения соответствуют экспериментальным данным); ϵ_m , ϵ_y — относительные деформации на пределе прочности и по условию устойчивого пластического деформирования; K_c , K_m — исходные значения КС и после разрушения; $\Delta K = K_m - K_c$.

2. Разрушение баллона (продольная трещина) начинается в области минимальных толщин. Его источником является неглубокая (0,5... 0,7 мм) язва коррозионного происхождения. Этот вид коррозионные повреждения обнаруживается на всех баллонах.

3. В ряде случаев (3 из 8) минимальные толщины баллонов меньше допустимых [1, 2]. Однако это обстоятельство не оказывает заметного влияния на прочность объекта, поскольку запас прочности больше допускаемого [3, 9].

4. В двух случаях максимальные значения диаметра превышают допускаемые по нормативам [1, 2]. Само по себе это обстоятельство не является опасным, поскольку запас прочности для этих случаев также превышает допускаемый уровень.

5. Уровень экспериментальных пластических деформаций при разрушении находится в пределах 2,5... 3 % и лишь в одном случае достигает 5,65 %. Но и это значение значительно меньше теоретических значений пластической деформации, соответствующих потери устойчивости пластического деформирования. Создавшееся положение можно объяснить уменьшением запаса пластичности вследствие перегрузки баллона при нарушении регламента эксплуатации [10], а также значительной разнотолщинностью стенки корпуса, что приводит к локализации пластических деформаций.

6. Кроме основной трещины, по которой происходило разрушение баллона при разрушающих испытаниях под действием гидравлического давления, других трещин на внутренней поверхности корпуса не было, тогда как в случаях аварийного разрушения такие трещины обнаруживали. Указан-

ное обстоятельство можно объяснить сравнительно малой скоростью деформирования при гидротестированиях по сравнению со скоростью деформирования при взрыве [11].

7. Исходные значения КС максимальны в продольном направлении. Значения максимумов в различных точках одного баллона отличаются на 2... 2,5 А/см. При гидравлическом нагружении КС нарастает как в продольном, так и в поперечном направлении. При этом максимальными остаются ее значения в продольном направлении.

В нагруженном состоянии КС на 1... 1,5 А/см больше таковой в состоянии разгрузки, в отличие от одноосного растяжения, когда КС в разгруженном состоянии больше, чем в состоянии нагрузки. По мере увеличения нагрузки положение максимума КС меняется — он сдвигается в область минимальных толщин. После разрушения значения максимальной КС лежат в пределах 9,3... 10,8 А/см.

В случае удаления краски (зачистки поверхности) значения КС возрастают на 0,5... 1,0 А/см.

8. Расчетные значения давлений на пределе текучести систематически меньше (на 30–50 %) экспериментальных. Это может быть объяснено значительным разбросом значений толщины стенки корпуса, а также недостаточной чувствительностью методики измерения деформаций.

9. Предельные давления разрушения находятся в узком диапазоне между расчетными давлениями на пределе прочности и пределе устойчивости пластического деформирования. Давление на пределе устойчивости дает верхнюю, а на пределе прочности — нижнюю оценку давления разрушения (при этом погрешность не превышает 15 %).

ВЫВОДЫ

1. Аварийные разрушения баллонов наступают в результате нарушения требований технологии их эксплуатации.

2. Существующие методы контроля не позволяют своевременно оценить возможность дальнейшей эксплуатации баллонов [3].

3. Целесообразно выполнять более полное техническое диагностирование объектов с замером толщин стенок, диаметров и КС на цилиндрической части баллонов.

1. *ТИ 227.ТР.ИТ-01-87*. Технологическая инструкция. Минво черн. металлургии. Жданов. металлург. комбинат. — Жданов, 1987. — 109 с.
2. *ГОСТ 943-73*. Баллоны стальные малой и средней емкости для газов на $P_p \leq 20$ МПа.
3. *ДНАОП 0.00-1.07-94*. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, которые работают под давлением.

АО «УКРНИИХИММАШ»,
Харьков

4. *Христенко И. Н., Кривова В. В.* Влияние пластических деформаций на коэрцитивную силу малоуглеродистой стали // Дефектоскопия. — 1984. — № 6. — С. 90–92.
5. *Долгийский В. М., Рязузов 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.
6. *ГОСТ 22762-77*. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости на пределе текучести вдавливанием шара.
7. *ГОСТ 22761-77*. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Бринелю переносными твердомерами статического действия.
8. *ДСТУ 4003-2000*. Сосуды и аппараты. Выбор параметров упрочняющей обработки.
9. *ГОСТ 14249-89*. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность.
10. *Нос М.* Бомба для предприятия // Охрана труда. — 2000. — № 1. — С. 21–22.
11. *Скоростное деформирование элементов конструкций* / Ю. С. Воробьев, А. В. Колодяжный, В. И. Севрюков, Е. Г. Янютин // Киев: Наук. думка, 1989. — 191 с.

Поступила в редакцию
12.07.2001

УДК 261.438:534.647.083.8

ДЕМОДУЛЯЦИЯ ПОМПАЖНЫХ КОЛЕБАНИЙ НАГНЕТАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ОГИБАЮЩЕЙ ЛОПАТОЧНОЙ ВИБРАЦИИ

Е. А. ИГУМЕНЦЕВ, В. А. ТАРГОНСКИЙ

В практике эксплуатации центробежных нагнетателей (ЦБН) на компрессорных станциях (КС) отмечены режимы работы с пульсациями потока газа, сопровождающиеся шумовым эффектом и вызывающие следующие явления: циклическое изменение направления потока газа через ЦБН и нагрузки привода, увеличение вибрации подшипников, корпуса нагнетателя и трубопроводов обвязки; изменение направления осевого усилия на ротор. Такой режим работы ЦБН назван помпажом. Его последствия, как правило, приводят к таким поломкам оборудования: разрушению упорного подшипника; увеличению зазоров в уплотнениях (лабиринтных, «масло-газ») и подшипниках скольжения; появлению трещин на рабочих лопатках и дисках ротора ЦБН, а также трещин элементов соединительной муфты и их износу. Помпаж иногда приводит к выходу из строя привода (газовой турбины или электродвигателя). Перечисленные последствия работы ЦБН в помпажном режиме наглядно демонстрируют необходимость оснащения агрегата современной и надежной противопомпажной защитой.

Неустойчивый режим работы ЦБН обусловлен в первую очередь изменением газодинамики потока газа на рабочих лопатках ротора. С уменьшением

расхода газа углы атаки потока газа на лопатки увеличиваются, и при достижении предельного значения происходит срыв потока, который обычно возникает у группы лопаток. При этом образуется вращающаяся срывная зона (предпомпажная), в которой происходит частичное или полное перекрытие каналов между лопатками (мягкий помпаж). При дальнейшем уменьшении расхода газа количество срывных зон увеличивается, происходит их слияние между собой. Когда они полностью перекрывают каналы между лопатками, наступает жесткий помпаж — при этом расход газа мгновенно снижается до нуля. Под воздействием давления на выходе ЦБН газ устремляется на вход, что приводит к реверсированию потока газа через рабочее колесо, и появляется первый помпажный толчок.

При создании противопомпажной защиты возникает проблема выбора методов анализа состояния потока газа, критериев оценки и информативных параметров для определения границ области неустойчивой работы ЦБН [1]. Наиболее распространенные противопомпажные системы построены на использовании универсальной напорно-расходной характеристики ЦБН. При этом измеряется расход и напор (степень повышения давления) газа, и по этим параметрам на напорно-расходной характе-

© Е. А. Игуменцев, В. А. Таргонский, 2001