

УДК 621.772 +531.787:621.42.02
DOI: 10.22213/2413-1172-2024-3-101-112

Причины разгерметизации баллона высокого давления

В. С. Репах, кандидат технических наук, доцент, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия
Ю. А. Чирков, доктор технических наук, доцент, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

С. Ю. Решетов, кандидат технических наук, доцент, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

Г. А. Клещарева, кандидат технических наук, доцент, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

Е. В. Кушнаренко, кандидат технических наук, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

Баллоны высокого давления – это сосуды для хранения и транспортировки сжатых газов под высоким давлением, которые необходимы для использования в различных технологических процессах. Данные сосуды преимущественно изготавливаются из стали или алюминия и обладают значительной прочностью, чтобы выдерживать высокое (более 400 кгс/см²) давление. Такие баллоны имеют стенку достаточно большой толщины и применяются в различных отраслях промышленности. Объектом исследований является баллон цельнокованый, выполненный из стали 38ХНЗМФА. Целью данного исследования является определение причин разгерметизации баллона, которая произошла во время наполнения баллона гелием при скорости 7,5 м³/ч, рабочем давлении 365 кгс/см². Как известно, при эксплуатации технологического оборудования, работающего под избыточным давлением, могут возникать повреждения, связанные со структурой материала и особенностями его механических свойств. Эти повреждения могут привести не только к выходу из строя самого сосуда, но и к повреждениям других узлов и деталей, находящихся рядом. И если поблизости будут работать люди, то цена такой аварии будет еще выше. Поэтому исследование в данной статье причин разрушения баллона высокого давления является весьма актуальным. Произведен комплекс исследований (визуально-измерительный контроль, фактографический, металлографический и спектральный анализ), которые помогли установить причину разрушения корпуса сосуда у горловины баллона. Главным выводом по причинам разгерметизации рассматриваемого сосуда является наличие концентратора напряжений, а именно впадины складок баллона, которая образовалась при формировании горловины баллона в области перехода от цилиндрической части к горловине. В процессе длительной эксплуатации под действием остаточных технологических напряжений зародилась трещина, которая распространилась от внутренней поверхности баллона к внешней вплоть до сквозного его повреждения, что и привело к разгерметизации.

Ключевые слова: баллон высокого давления, разгерметизация баллона, остаточные напряжения, концентрация напряжений, трещины в металле.

Введение

В процессе эксплуатации технологического оборудования, в частности сосудов, работающих под избыточным давлением, могут возникать проблемы, связанные с разгерметизацией или катастрофическим разрушением, которые могут приводить к значительным проблемам экологического и материального характера для эксплуатирующих организаций. Выход из строя подобных конструкций может происходить при высоких напряжениях от нагрузки [1, 2], под воздействием циклических напряжений в процессе длительной эксплуатации [3–5], технологических проблем, связанных с появлением дефектов и качеством металла [6–8], возникновения остаточных напряжений [9, 10], концентраторов напряжений [11–15], развития эксплуатационных дефектов [16–18].

Объект и методы исследования

Объектом исследований является корпус сосуда, работающего под избыточным давлением, который во время эксплуатации подвергся разгерметизации. Стенка сосуда изготовлена из стали 38ХНЗМФА (ГОСТ 4543–2016 «Металлопродукция из конструкционной легированной стали»). Технические условия, состав рабочей среды в баллоне представлен в таблице 1.

Исследования причин разгерметизации баллона проводились следующими методами:

- фактографические исследования разрушенных элементов баллона проводились визуальным и визуально-оптическим методом на микроскопе МБС-1 в соответствии с методиками и рекомендациями [19, 20];
- металлографические исследования металла баллона проводились на микроскопе Nikon Epiphot 200;

- спектральный анализ химического состава металла баллона выполнялся на спектрометре PMI-MASTER 13L0059 в соответствии с ГОСТ 18895–97 «Сталь. Метод фотоэлектрического спектрального анализа»;

- твердость металла баллона измерялась на приборе ИТР-60/150-А по Роквеллу согласно требованиям ГОСТ 9013–59 «Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу»;

- толщина металла баллона определялась толщиномером А1210 с учетом требований ГОСТ Р 55614–2013 «Контроль неразрушающий. Толщиномеры ультразвуковые. Общие технические требования»;

- испытания на растяжение металла образцов из баллона проводились на машине разрыв-

ной МТС 65/G согласно ГОСТ 1497–84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение»;

- испытания образцов металла баллона на ударный изгиб проводились на копре маятниковом Resil 300 СН-Е/30А согласно ГОСТ 9454–78 «Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах».

Общий вид исследуемого баллона представлен на рисунке 1.

Целью данного исследования является выяснение причин разгерметизации баллона, работающего под избыточным давлением, и разработка рекомендаций, выполнение которых снизит вероятность появления и развития трещин на подобных баллонах.

Таблица 1. Состав рабочей среды в баллоне, % об.

Table 1. Composition of the working medium in the cylinder, % vol.

Компоненты	O ₂ , %	N ₂ , %	H ₂ , %	CO ₂ , %	He, %	ВП, %	Мех. прим.
Содержание	0,002	0,07	11,0	0,05	88,87	0,0007...0,01	Отс.



a



b

Рис. 1. Исследуемый баллон: а – общий вид; б – места вырезки для исследования причин образования трещин

Fig. 1. The cylinder under study: a - general view; b - cutting areas to investigate the causes of cracks

Результаты исследований и их обсуждение

При визуально-измерительном контроле баллона с трещиной выявлено следующее.

Диаметр цилиндрической части баллона находится в интервале 465...472 мм. Толщина стенки баллона в цилиндрической части находится в интервале 19,0...19,6 мм. Толщина стенки цилиндрической части горловины баллона находится в интервале 24...40 мм. Толщина стенки в конической части горловины баллона находится в интервале 38...59 мм.

На баллоне в области перехода от цилиндрической части корпуса к горловине баллона имеется сквозная трещина, лежащая в осевой плоскости баллона и распространяющаяся от области перехода необработанной кованной части баллона к токарно обработанной со стороны внутренней поверхности горловины баллона на длину примерно 164 мм, общая длина трещины около 290 мм, максимальное раскрытие трещины достигает 0,6 мм (рис. 2, 3).

Следует отметить, что разрушения баллона в данных местах не соответствуют требованиям нормативных документов (ISO 9809-1:2019 «Баллоны газовые. Проектирование, конструирование и испытания бесшовных стальных газовых баллонов и труб многоразового использования». Часть 1. «Баллоны и трубы из закаленной и отпущенной стали с максимальным пределом прочности на разрыв менее 1100 МПа»). Разрушение баллона, как при эксплуатации, так

и его последующих гидроиспытаниях может происходить в цилиндрической части баллона и не должно быть хрупким, то есть края разрыва должны иметь плавный наклон по отношению к стенке при характерном уменьшении площади поперечного сечения относительно первоначальной. В месте разрушения не должно быть значительных дефектов металла, а само разрушение не должно доходить до горловины.



Рис. 2. Сквозная трещина в горловине баллона: *a* – общий вид; *b* – трещина в резьбе; *c* – очаг развития трещины; *d* – толщина стенки; *e* – выход трещины на наружную поверхность; *f* – трещина на торцевой поверхности горловины баллона

Fig. 2. Through crack in the neck of the cylinder: *a* - general view; *b* - crack in the thread; *c* - source of crack development; *d* - wall thickness; *e* - crack exit to the outer surface; *f* - crack on the end surface of the cylinder neck

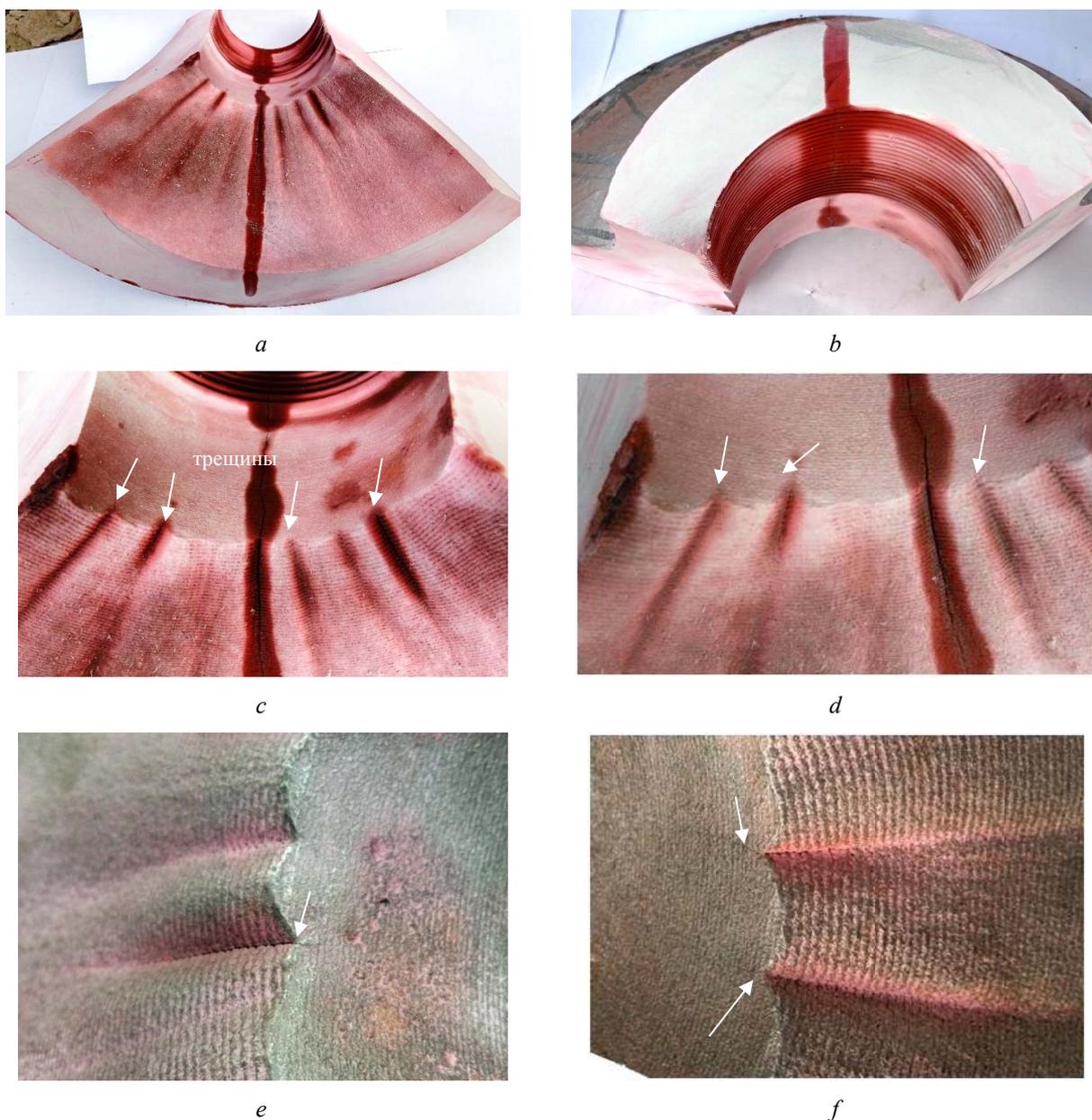


Рис. 3. Результат проведения капиллярного контроля металла горловины баллона: *a* – общий вид; *b* – трещина на торцевой поверхности горловины баллона; *c* – очаги зарождения сопутствующих трещин; *d* – распространение трещин; *e* – трещина от впадины складки металла горловины; *f* – трещины на обработанной поверхности

Fig. 3. Result of capillary inspection of the metal of the cylinder neck: *a* - general view; *b* - crack on the end surface of the cylinder neck; *c* - sources of nucleation of accompanying cracks; *d* - crack propagation; *e* - crack from the depression of the neck metal fold; *f* - cracks on the treated surface

В области перехода от цилиндрической части корпуса баллона к горловине (рис. 2–4) наряду с эксплуатационными напряжениями растяжения и изгиба от рабочего давления в металле баллона присутствуют технологические остаточные напряжения, возникающие в процессе пластического деформирования при изготовлении баллона. В этой области баллона возникает плосконапряженное состояние металла при эксплуатации баллона под рабочим давлением и периодических испытаниях повышенным дав-

лением. Если не учитывать технологические остаточные напряжения и концентрацию напряжений в области впадин складок, то расчетные напряжения на диаметре горловины будут более чем в 8 раз меньше по величине, чем в срединной цилиндрической части баллона, в которой и происходит, как правило, разрушение баллонов при эксплуатации или гидравлических испытаниях.

Согласно результатам капиллярного контроля на баллоне в области перехода от цилиндриче-

ской части корпуса к горловине баллона наряду со сквозной трещиной имеются несквозные трещины, также лежащие во впадинах складок, образовавшихся при формировании горловины баллона, распространяющиеся от области перехода необработанной ковальной части баллона к

токарно обработанной со стороны внутренней поверхности горловине баллона (рис. 4).

Результаты спектрального анализа химического состава стали 38ХНЗМФА горловины баллона, который соответствует ГОСТ 4543–2016, приведены в таблице 2.

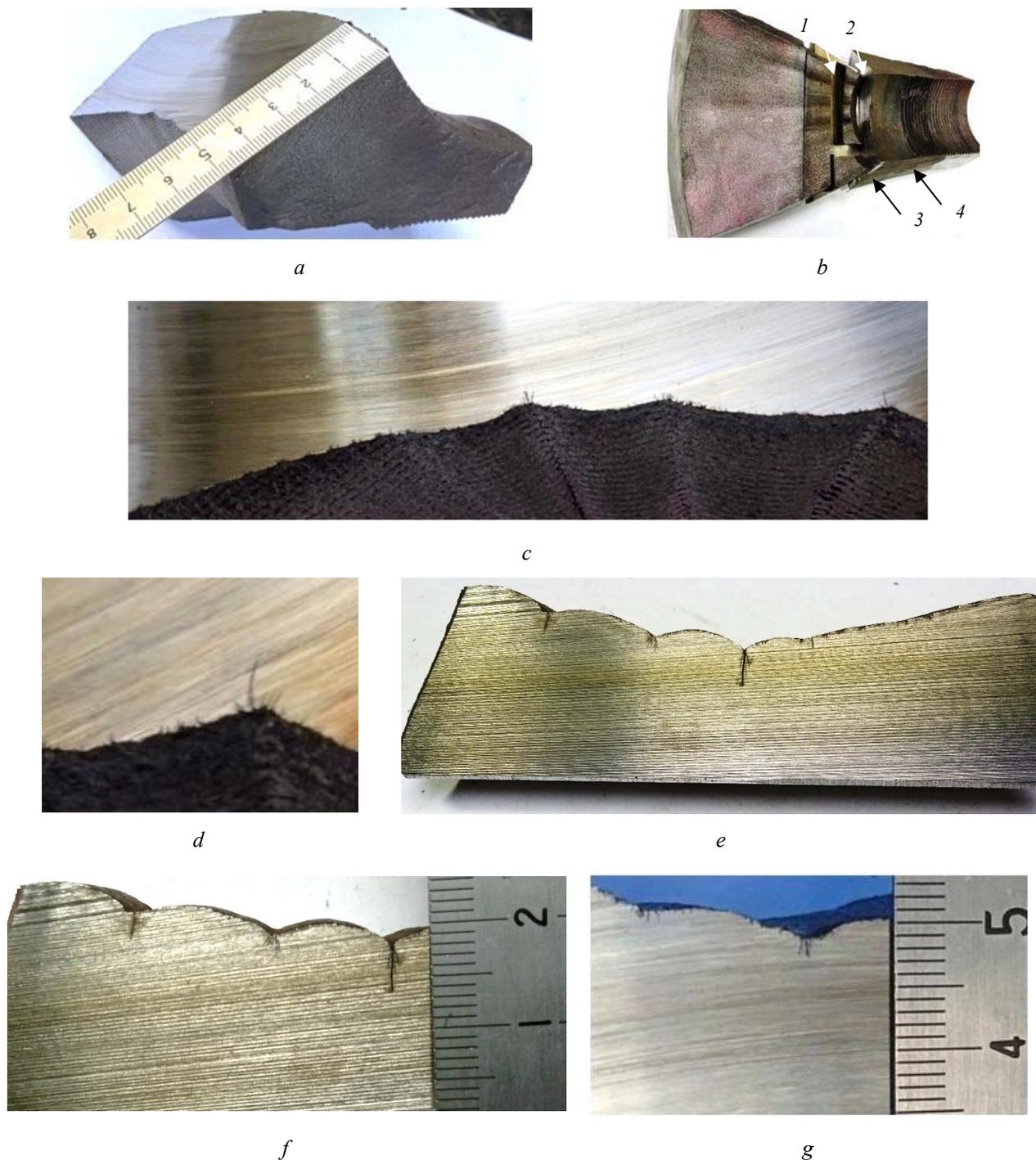


Рис. 4. Трещины, зарождающиеся с внутренней поверхности во впадинах складок горловины баллона: *a* – общий вид до разрезки на части 1, 2, 3, 4; *b* – разрезка на части горловины баллона; *c*, *d* – трещины в части 1; *e* – трещины в части 2; *f* – размер трещины в части 2; *g* – размер трещины в части 3

Fig. 4. Cracks originating from the inner surface in the depressions of the folds of the neck of the cylinder: *a* – general view before cutting into parts 1, 2, 3, 4; *b* – cutting into parts the neck of the cylinder; *c*, *d* – cracks in part 1; *e* – cracks in part 2; *f* – crack size in part 2; *g* – crack size in part 3

Таблица 2. Химический состав металла баллона, %

Table 2. Chemical composition of the cylinder metal, %

Фактическое содержание элементов (среднее из трех замеров)									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Cu
0,37	0,34	0,48	0,015	0,013	1,31	0,36	3,1	0,11	0,13
Предельные концентрации элементов в стали 38ХНЗМФА по ГОСТ 4543–2016									
0,33...0,40	0,17...0,37	0,25...0,50	≤0,025	≤0,025	1,20...1,50	3,00...3,50	0,35...0,45	0,10...0,18	≤0,30

Твердость металла, измеренная со стороны внешней поверхности цилиндрической части баллона, находится в пределах 320...337 НВ; твердость металла в сечении цилиндрической части баллона – 302...310 НВ; твердость металла горловины (в поперечном сечении области трещин) баллона – 298...319 НВ, что соответствует ГОСТ 12247–80 «Баллоны стальные бесшовные большого объема для газов на 31,4 и 39,2 МПа (320 и 400 кгс/см²). Технические условия», в котором требуемые значения твердости находятся в пределах 269...341 НВ.

Согласно результатам механических испытаний значения временного сопротивления и предела текучести металла составили ниже требуемых по ГОСТ 4543–2016, но соответствовали требованиям ГОСТ 12247–80. Относительное удлинение при разрыве металла составило 8,7 %, которое на 3,3 % ниже требуемых 12 % по ГОСТ 4543–2016 и ГОСТ 12247–80, что может свидетельствовать об уменьшении пластических свойств металла баллона в процессе длительной (42-летней) эксплуатации и циклического нагружения давлением.

По результатам испытаний на ударный изгиб при температуре минус 50 °С продольных образцов из цилиндрической части баллона ударная вязкость металла составила КСЧ⁻⁵⁰ 88 Дж/см², что соответствует требованиям ГОСТ 12247–80, согласно которым значение ударной вязкости продольных образцов металла баллона должно быть не менее КСЧ⁻⁵⁰ 29,4 Дж/см².

При металлографических исследованиях для выявления микроструктуры исследуемого металла баллонов использовали 4%-й раствор азотной кислоты в этиловом спирте. Согласно результатам металлографических исследований в металле баллона в области перехода от цилиндрической части корпуса к горловине баллона под действием остаточных технологических напряжений и периодических эксплуатационных напряжений, возникающих при наполнении баллона рабочей средой, во впадинах складок баллона зарождаются трещины, распространяющиеся от внутренней к внешней поверхности баллона вплоть до потери герметичности баллона (рис. 4, 5). При длительной наработке баллона – циклического нагружения – происхо-

дит накопление повреждений и образование множества усталостных микротрещин. На рисунке 4, с, d, отчетливо видно, что зарождение трещин произошло не только во впадинах, но и между ними в местах большей шероховатости пересечения конической (грубой поверхности со складками) с точеной цилиндрической поверхностью под углом 125 град.

Очаг излома сквозной трещины расположен во впадине глубокой складки области перехода необработанной кованой части баллона к токарно обработанной со стороны внутренней поверхности баллона (рис. 6). Излом хрупкий, прямой, поверхность разрушения ориентирована нормально к оси поверхности баллона. Макроскопически в изломе явно наблюдаются три зоны: зона зарождения усталостной трещины – очаг излома, имеющий темную гладкую поверхность; зона длительного развития трещины – плоская поверхность с зернистым строением рельефа, ориентированным к очагу излома; зона быстрого развития трещины с волокнисто-полосчатым строением рельефа поверхности излома (рис. 6, 7) [21].

Микроструктура металла баллона не зернистая, характерная микроструктуре низколегированной стали. Неметаллические включения, определенные согласно ГОСТ 1778–2022 «Металлопродукция из сталей и сплавов. Металлографические методы определения неметаллических включений», оксиды строчечные соответствуют баллу 2 (рис. 8).

Кроме вышеописанных повреждений баллона в области цилиндрической части корпуса на внутренней поверхности баллона обнаружены локальные дефекты, имеющие близкую к округлой форму с глубиной 1,1...3,1 мм и являющиеся коррозионными язвинами, возникшими в процессе длительной эксплуатации баллона (рис. 9).

Исследуемый баллон стальной бесшовный большого объема по характеристикам металла и форме соответствует требованиям ГОСТ 12247–80. Разрушение баллона в области горловины не соответствует требованиям ISO 9809-1:2019. Можно предположить, что остаточные напряжения возникли в процессе технологической операции формирования горловины баллона.

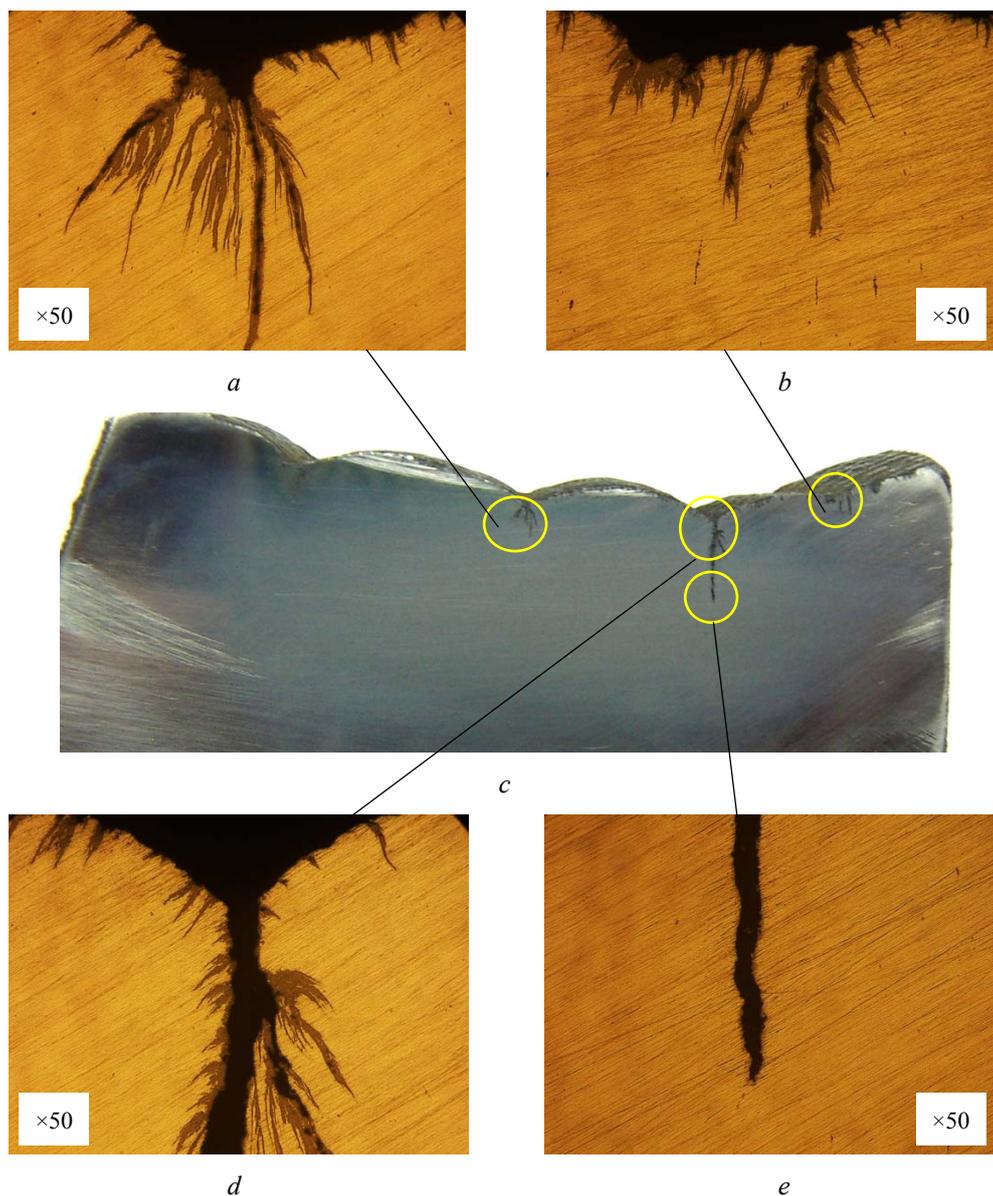


Рис. 5. Трещины, развивающиеся с внутренней поверхности от впадин складок горловины баллона:
c – трещины в части 2; *a, b* – вид трещин; *d* – начало трещины; *e* – вершина трещины

Fig. 5. Cracks developing from the inner surface from the depressions of the folds of the neck of the cylinder:
c - cracks in part 2; *a, b* - type of cracks; *d* - beginning of the crack; *e* - crack tip

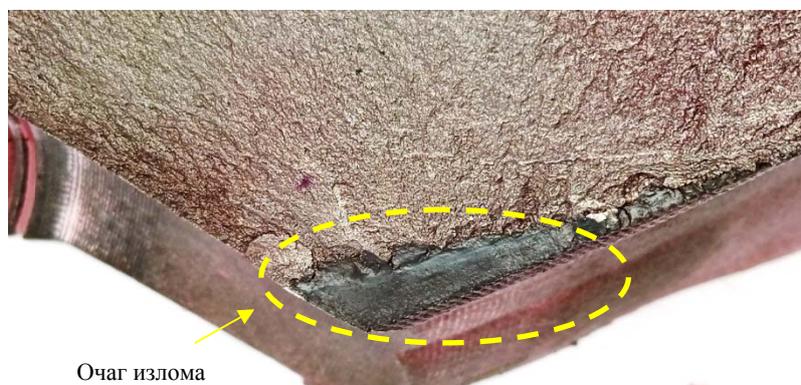


Рис. 6. Излом в месте сквозной трещины горловины баллона

Fig. 6. Fracture at the site of a through crack in the neck of the cylinder

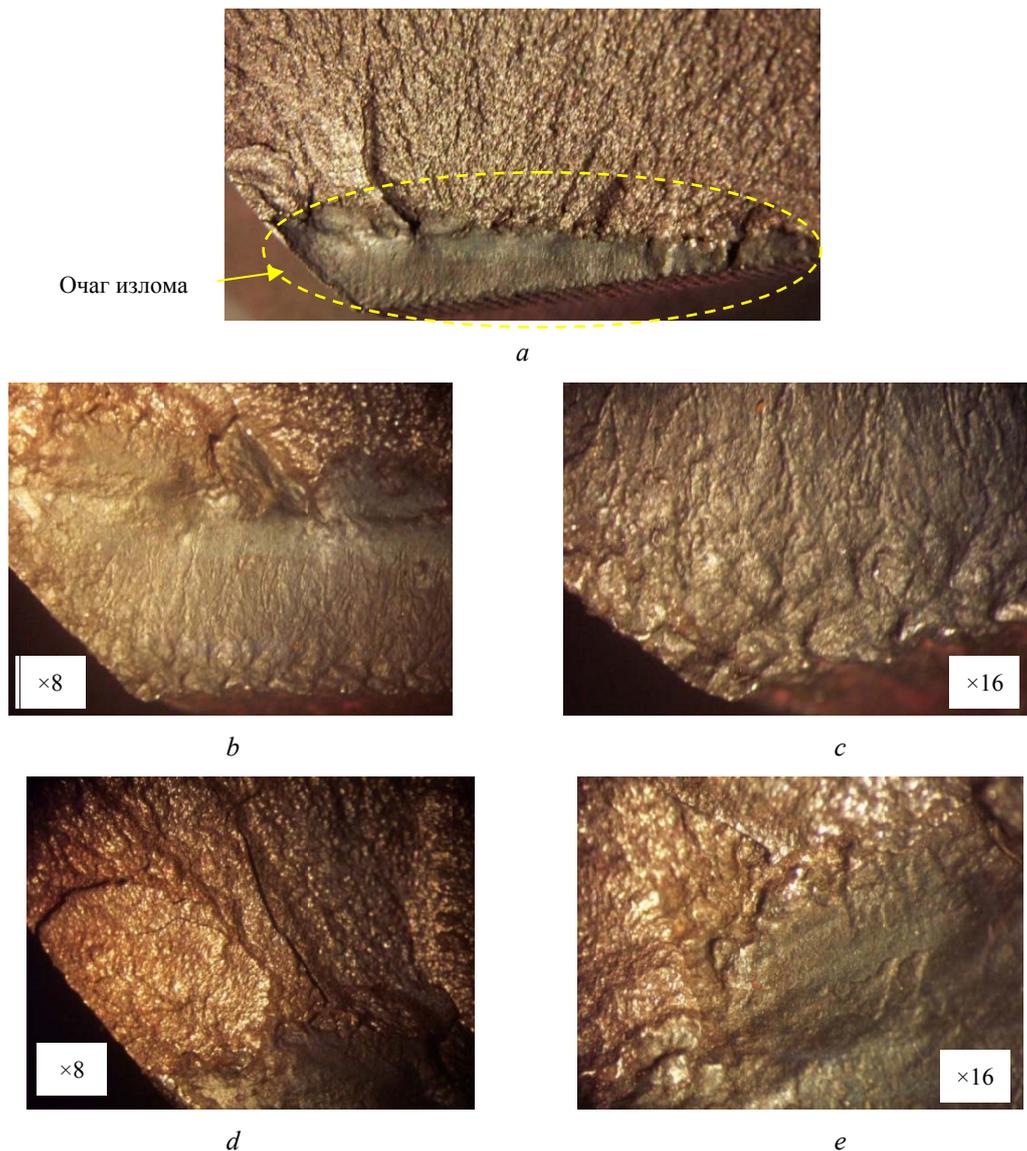


Рис. 7. Макроструктура излома горловины баллона в области очага разрушения:
a – общий вид очага излома; *b, c* – начало очага излома; *d, e* – плоская поверхность с зернистым строением рельефа

Fig. 7. Macrostructure of the cylinder neck fracture in the area of the fracture:
a - general view of the fracture site; *b, c* - beginning of the fracture site; *d, e* - flat surface with a granular relief structure



Рис. 8. Неметаллические включения (*a-b*)

Fig. 8. Non-metallic inclusions (*a-b*)

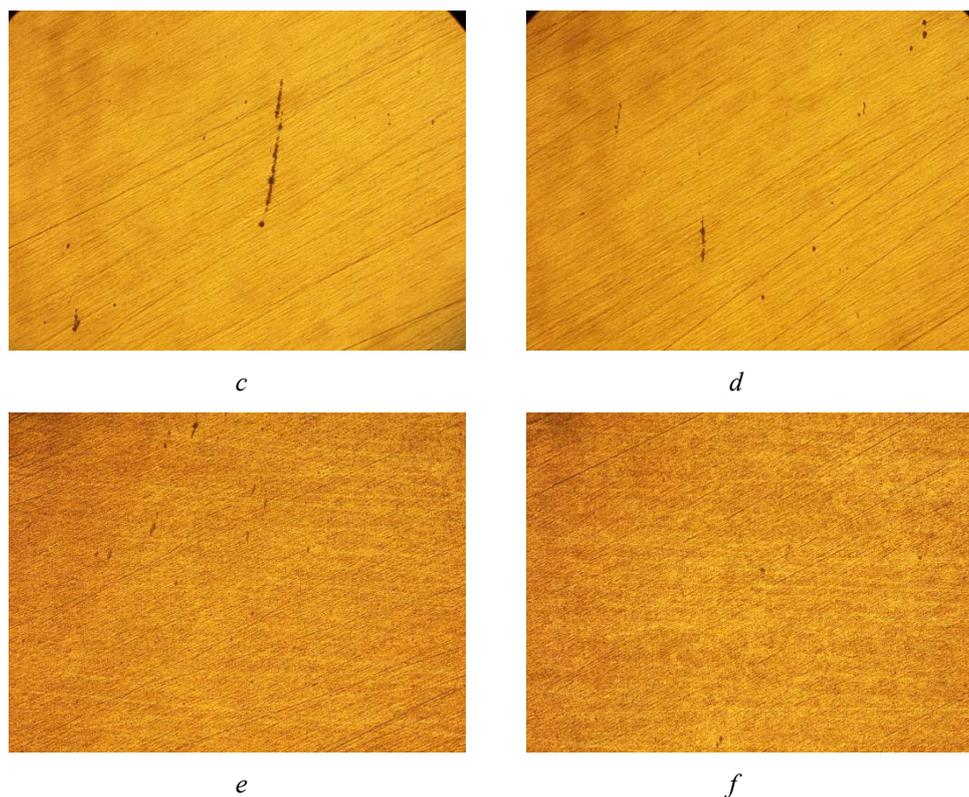


Рис. 8 (окончание, начало на с. 108). Неметаллические включения (с–d) и микроструктура металла баллона (e–f)

Fig. 8 (continued from p. 108). Non-metallic inclusions (c-d) and metal microstructure of the cylinder (e-f)



Рис. 9. Фрагмент стенки баллона с дефектами на внутренней поверхности

Fig. 9. Fragment of a cylinder wall with defects on the inner surface

Выводы

1. Причиной разгерметизации баллона является концентратор напряжений – впадина складок баллона, образовавшаяся при формировании горловины баллона в области перехода от цилиндрической части корпуса к горловине баллона.

2. В процессе длительной эксплуатации под действием остаточных технологических напряжений и периодических эксплуатационных напряжений зародилась трещина, которая в дальнейшем распространилась от внутренней поверхности баллона к внешней вплоть до сквозного его повреждения.

3. Предполагается, что остаточные напряжения в области горловины баллона возникли в процессе горячего пластического деформирования трубной заготовки и разности температур на наружной и внутренней поверхности, неравномерности охлаждения металла по толщине.

4. Образованию и развитию трещины также способствовала концентрация напряжений при нерациональной токарной обработке.

5. Выполнение радиуса перехода от цилиндрической к конической поверхности в области горловины значительно снизит концентрацию напряжений и увеличит срок службы баллона.

6. При термической обработке – нормализации – будут сняты остаточные технологические напряжения и исключено разрушение в области горловины.

Библиографические ссылки

1. *Wu S.S., Dong X.L., Yu X.L.* (2021) An investigating on explosive expanding fracture of 45 steel cylinders by SPH method. *Explos Shock Waves*, no. 41, pp. 67-77. DOI: 10.1186/s13099-021-00464-y
2. *Zhanfeng Chen, Xuyao Li, Weiping Zhu* (2020) Dynamic burst pressure analysis of cylindrical shells based on average shear stress yield criterion. *Thin-Walled Structures* March 2020. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106498> (accessed: 13.05.2024).
3. *Xing X.Q.* (2021) Effect of environment-assisted cracking on the premature fatigue failure of high-strength valve springs. *Engineering Failure Analysis*, vol. 126, p. 105466. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105466> (accessed: 13.05.2024).
4. *Пирогов С. П., Чуба А. Ю.* Развитие теории колебаний манометрических трубчатых пружин // *АгроЭкоИнфо*. 2022. № 3. URL: <https://doi.org/10.51419/202123304> (дата обращения: 13.05.2024).
5. *Тупицин М. А., Тришкина И. А., Сторожева Е. И.* К вопросу о причинах преждевременного разрушения пружин предохранительных клапанов на установках первичной переработки нефти // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2023. Т. 89, № 7. С. 51–60. DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-7-51-60
6. *Das S., Talukdar S., Solanki V.* (2020) Breakage of Spring Steel During Manufacturing: A Metallurgical Investigation. *J. Failure Analysis and Prevent*, vol. 20, pp. 1462-1469. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11668-020-00993-9> (accessed: 13.05.2024).
7. Методы исследования процессов коррозионно-механического разрушения и наводороживания металлов (обзор). Ч. 2. Образование пассивных пленок и сероводородное растрескивание сталей / А. Б. Лаптев, Л. И. Закирова, О. А. Загорских, М. Р. Павлов, М. А. Горбовец // *Труды ВИАМ*. 2022. № 5 (111). С. 138–146. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-138-146
8. Исследование металла, работающего в средах, вызывающих сероводородное растрескивание / Н. И. Габельченко, Е. Ю. Карпова, А. И. Габельченко, А. П. Рыжко // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2020. № 7 (242). С. 28–33. DOI: 10.35211/1990-5297-2020-7-242-28-33
9. Влияние внутренних напряжений на интенсивность коррозионных процессов конструкционной стали / Р. А. Соколов, К. Р. Муратов, А. Н. Венедиктов, Р. А. Мамадалиев // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2023. Т. 25, № 4. С. 167–179. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.4-167-179
10. *Анискович Е. В., Москвичев В. В., Черняев А. П.* Оценка остаточного ресурса рабочих колес гидротурбин с эксплуатационной дефектностью // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2023. № 89(6). С. 62–75. URL: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-6-62-75> (дата обращения: 13.05.2024).
11. Причины повреждения муфт насосно-компрессорных труб / В. М. Кушнарченко, В. С. Репях, И. Ш. Тавтилов, С. Ю. Решетов // *Известия высших учебных заведений. Технические науки*. 2020. № 4 (56). С. 122–134. DOI: 10.21685/2072-3059-2020-4-10
12. *Que Z., Ahonen M., Virkkunen I., Nevasmaa P., Rautala P., Reinvall H.* (2022) Study of cracking and microstructure in Co-free valve seat hardfacing. *Nuclear Materials and Energy*, vol. 31, p. 101202. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.nme.2022.101202> (accessed: 13.05.2024).
13. Совершенствование способа пожарной безопасности трубопроводного транспорта сероводородсодержащих нефтегазовых сред / Р. Ф. Мамбетов, Ф. Ш. Хафизов, В. М. Кушнарченко, И. Ф. Хафизов, Л. В. Сорокина // *Нефтегазовое дело*. 2023. № 1. С. 84–106. DOI: 10.17122/ogbus-2023-1-84-106
14. *Митрофанов А. В., Ломанцов В. А., Воронин С. П.* Анализ причин поврежденности длительно эксплуатируемого трубопровода влажного сероводородсодержащего природного газа // *Нефтегазовое дело*. 2023. № 6. С. 109–133. DOI: 10.17122/ogbus-2023-6-109-133
15. Причины повреждения манометра, установленного на технологическом трубопроводе / В. С. Репях, С. Ю. Решетов, Г. А. Клещарева, Е. В. Кушнарченко // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. 2024. Т. 27, № 1. С. 63–72. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-1-63-72
16. *Vaganov P. K.* Коррозионное разрушение стального оборудования и трубопроводов на объектах газовых месторождений в присутствии агрессивных компонентов // *Технология металлов*. 2021. № 3. С. 47–54. DOI: 10.31044/1684-2499-2021-0-3-47-54
17. *Соков В. Н., Шувалова Е. А., Землянка А. С.* Коррозия под изоляцией как один из факторов сокращения срока службы промышленных трубопроводов // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2020. Т. 10, № 2 (33). С. 264–273. DOI: 10.21285/2227-2917-2020-2-264-273
18. Классификация и определение размеров поверхностных дефектов трубопроводов на основе результатов комплексной диагностики ультразвуковым, вихретоковым, визуальным и измерительным методами неразрушающего контроля / Н. В. Крысько, С. В. Скрынников, Н. А. Щипаков, Д. М. Козлов, А. Г. Кусый // *Дефектоскопия*. 2023. № 12. С. 69–78. DOI: 10.31857/S0130308223120084
19. *Умбетов С. В., Пронин С. П.* Классификация и анализ средств контроля коррозионных повреждений внутренних поверхностей подземного металлического трубопровода // *Вестник Югорского государственного университета*. 2020. № 2 (57). С. 27–38. DOI: 10.17816/byusu20200227-38
20. *Ботвина Л. П.* Основы фрактодиагностики : монография. М. : Техносфера, 2022. 394 с. ISBN 978-5-94836-637-1

21. Фрактография и атлас фрактограмм : справочник / под ред. Дж. Феллоуза ; пер. с англ. Е. А. Шура. М. : Metallurgia, 1982. 489 с.

References

1. Wu S.S., Dong X.L., Yu X.L. (2021) An investigating on explosive expanding fracture of 45 steel cylinders by SPH method. *Explos Shock Waves*, no. 4, pp. 67-77. DOI: 10.1186/s13099-021-00464-y

2. Zhanfeng Chen, Xuyao Li, Weiping Zhu (2020) Dynamic burst pressure analysis of cylindrical shells based on average shear stress yield criterion. *Thin-Walled Structures* March 2020. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106498> (accessed 13.05.2024).

3. Xing X.Q. (2021) Effect of environment-assisted cracking on the premature fatigue failure of high-strength valve springs. *Engineering Failure Analysis*, vol. 126, p. 105466. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105466> (accessed: 13.05.2024).

4. Pirogov S.P., Chuba A.Yu. (2022) [Development of the theory of oscillations of manometric tubular springs]. *AgroJekoInfo*, no. 3 (in Russ.). URL: <https://doi.org/10.51419/202123304> (дата обращения: 13.05.2024).

5. Tupitsin M.A., Trishkina I.A., Storozheva E.I. (2023) [On the issue of the causes of premature destruction of safety valve springs at primary oil refining plants]. *Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov*, vol. 89, no. 7, pp. 51-60 (in Russ.). DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-7-51-60

6. Das S., Talukdar S., Solanki V. (2020) Breakage of Spring Steel During Manufacturing: A Metallurgical Investigation. *J. Failure Analysis and Prevent*, vol. 20, pp. 1462-1469. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11668-020-00993-9> (accessed: 13.05.2024).

7. Laptev A.B., Zakirova L.I., Zagorskikh O.A., Pavlov M.R., Gorbovets M.A. (2022) [Methods for studying the processes of corrosion-mechanical destruction and hydrogenation of metals] (review) Part 2. Formation of passive films and hydrogen sulfide cracking of steels. *Trudy VIAM*, no. 5, pp. 138-146 (in Russ.). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-138-146

8. Gabelchenko N.I., Karpova E.Yu., Gabelchenko A.I., Ryzhko A.P. (2020) [Study of metal operating in environments that cause hydrogen sulfide cracking]. *Izvestija Volgogradskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, no. 7, pp. 28-33 (in Russ.). DOI: 10.35211/1990-5297-2020-7-242-28-33

9. Sokolov R.A., Muratov K.R., Venediktov A.N., Mamadaliev R.A. (2023) [The influence of internal stresses on the intensity of corrosion processes in structural steel]. *Obrabotka metallov (tehnologija, oborudovanie, instrumenty)*, vol. 25, no. 4, pp. 167-179 (in Russ.). DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.4-167-179

10. Aniskovich E.V., Moskvichev V.V., Chernyayev A.P. (2023) [Estimation of the residual life of hydraulic turbine impellers with operational defects]. *Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov*, no. 89, pp. 62-75 (in Russ.). URL: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-6-62-75> (дата обращения: 13.05.2024).

1028-6861-2023-89-6-62-75 (дата обращения: 13.05.2024).

11. Kushnarenko V.M., Repyakh V.S., Tavtilov I.Sh., Reshetov S.Yu. (2020) [Causes of damage to tubing couplings]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Tehničeskie nauki*, no. 4, pp. 122-134 (in Russ.). DOI: 10.21685/2072-3059-2020-4-10

12. Que Z., Ahonen M., Virkkunen I., Nevasmaa P., Rautala P., Reinvald H. (2022) Study of cracking and microstructure in Co-free valve seat hardfacing. *Nuclear Materials and Energy*, vol. 31, p. 101202. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.nme.2022.101202> (accessed: 13.05.2024).

13. Mambetov R.F., Khafizov F.Sh., Kushnarenko V.M., Khafizov I.F., Sorokina L.V. (2023) [Improving the fire safety method for pipeline transport of hydrogen sulfide-containing oil and gas media]. *Oil and Gas Business*, no. 1, pp. 84-106 (in Russ.). DOI: 10.17122/ogbus-2023-1-84-106

14. Mitrofanov A.V., Lomantsov V.A., Voronin S.P. (2023) [Analysis of the causes of damage to a long-term operating pipeline of wet hydrogen sulfide-containing natural gas]. *Neftegazovoe delo*, no. 6, pp. 109-133 (in Russ.). DOI: 10.17122/ogbus-2023-6-109-133

15. Repyakh V.S., Reshetov S.Yu., Kleschareva G.A., Kushnarenko E.V. (2024) [Causes of damage to the pressure gauge installed on the process pipeline]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 27, no. 1, pp. 63-72 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2024-1-63-72

16. Vagapov R.K. (2021) [Corrosion destruction of steel equipment and pipelines at gas field sites in the presence of aggressive components]. *Tehnologija metallov*, no. 3, pp. 47-54 (in Russ.). DOI: 10.31044/1684-2499-2021-0-3-47-54

17. Sokov V.N., Shuvalova E.A., Zemlyanko A.S. (2020) [Corrosion under insulation as one of the factors reducing the service life of industrial pipelines]. *Izvestija vuzov. Investicii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*, vol. 10, no. 2, pp. 264-273 (in Russ.). DOI: 10.21285/2227-2917-2020-2-264-273

18. Krysko N.V., Skrynnikov S.V., Shchipakov N.A., Kozlov D.M., Kusyy A.G. (2023) [Classification and determination of the size of surface defects of pipelines based on the results of complex diagnostics by ultrasonic, eddy current, visual and measuring methods of non-destructive testing]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, no. 12, pp. 69-78 (in Russ.). DOI: 10.31857/S0130308223120084

19. Umbetov S.V., Pronin S.P. (2020) [Classification and analysis of means for monitoring corrosion damage to the internal surfaces of an underground metal pipeline]. *Vestnik Jugorskogo gosudarstvennogo universiteta*, no. 2, pp. 27-38 (in Russ.). DOI: 10.17816/byusu20200227-38

20. Botvina L.R. (2022) *Osnovy fraktodiagnostiki* [Fundamentals of fractodiagnosics]. Moscow: Tekhnosphere Publ., 394 p. (in Russ.).

21. *Fraktografija i atlas fraktogramm* [Fractography and atlas of fractograms]. Moscow: Metallurgy Publ., 489 p. (in Russ.).

Reasons for Depressurization of a High-Pressure Cylinder

V.S. Repyakh, PhD in Engineering, Associate Professor, Orenburg State University, Orenburg, Russia
Yu.A. Chirkov, DSc in Engineering, Associate Professor, Orenburg State University, Orenburg, Russia
S.Yu. Reshetov, PhD in Engineering, Associate Professor, Orenburg State University, Orenburg, Russia
G.A. Kleshchareva, PhD in Engineering, Associate Professor, Orenburg State University, Orenburg, Russia
E.V. Kushnarenko, PhD in Engineering, Orenburg State University, Orenburg, Russia

High-pressure cylinders are vessels for storing and transporting compressed gases under high pressure, which are necessary for use in various technological processes. These vessels are mainly made of steel or aluminum and have significant strength to withstand high (more than 400 kgf/cm²) pressure. Such cylinders have a wall of sufficiently large thickness and are used in various industries. The object of the study is a one-piece forged cylinder made of 38ХНЗМФА steel. The purpose of this study is to determine the causes of cylinder depressurization, which occurred during filling the cylinder with helium at a speed of 7.5 m³/h at an operating pressure of 365 kgf/cm².

As is known, when operating process equipment operating under excess pressure, damage may occur due to the structure of the material and the features of its mechanical properties. This damage can lead not only to the failure of the vessel itself, but also to damage to other units and parts located nearby. And if people are working nearby, the cost of such an accident will be even higher. Therefore, the study in this article of the causes of destruction of a high-pressure cylinder is very relevant. A set of studies (visual and measuring control, factographic, metallographic and spectral analysis) was carried out, which helped to establish the cause of the destruction of the vessel body at the neck of the cylinder. The main conclusion on the causes of depressurization of the vessel in question is the presence of a stress concentrator, namely, a depression of the folds of the cylinder, which was formed during the formation of the neck of the cylinder in the transition area from the cylindrical part to the neck. During long-term operation, under the influence of residual technological stresses, a crack was formed, which spread from the inner surface of the cylinder to the outer one, up to its through damage, which led to depressurization.

Keywords: high pressure cylinder, cylinder depressurization, residual stresses, stress concentration, cracks in metal.

Получено 20.05.2024

Образец цитирования

Причины разгерметизации баллона высокого давления / В. С. Репях, Ю. А. Чирков, С. Ю. Решетов, Г. А. Клещарева, Е. В. Кушнаренко // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2024. Т. 27, № 3. С. 101–112. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-3-101-112

For Citation

Repyakh V.S., Chirkov Yu.A., Reshetov S.U., Kleshchareva G.A., Kushnarenko E.V. (2024) [Reasons for Depressurization of a High-Pressure Cylinder]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2024, vol. 27, no. 3, pp. 101-112 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2024-3-101-112