

УДК 658.590 + 531.787:621.43.032

DOI: 10.22213/2413-1172-2024-3-70-78

## Повреждения кольцевых волнистых пружин специального назначения под воздействием сероводородсодержащих сред

**Ю. А. Чирков**, доктор технических наук, доцент, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

**А. С. Кириленко**, кандидат технических наук, 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

*Кольцевые волнистые пружины достаточно широко применяются в нефтегазовой отрасли и чаще всего служат либо компенсаторами температурных деформаций, либо для торцевых уплотнений различных стыков в оборудовании, транспортирующем нефтегазовые среды. Эти пружины обеспечивают высокую грузоподъемность при относительно малой осадке, что придает конструкции компактность. Чаще всего такие пружины изготавливаются методом штамповки из тонколистовой стали. При эксплуатации технологического оборудования, которое транспортирует сероводородсодержащие нефтегазовые среды, довольно часто возникает сероводородное коррозионное растрескивание под напряжением, которое может привести к выходу из строя промышленного оборудования. В частности, повреждения кольцевых волнистых пружин могут вызвать разгерметизацию элементов промышленного оборудования и нанести существенный вред не только окружающей среде, но и обслуживающему персоналу.*

*Объектом исследований являются кольцевые волнистые пружины из стали типа X15H7M2Ю. Цель исследования – определение стойкости материала пружин к коррозионному растрескиванию под напряжением. В данной статье рассматриваются результаты испытаний кольцевых волнистых пружин специального назначения в агрессивной сероводородсодержащей среде, искусственно приготовленной по рекомендациям ANSI/NACE TM 0177. Приведены результаты исследований твердости, расчетов на прочность и металлографических исследований поврежденных волнистой пружины. Химический состав металла пружины полностью соответствует заявленному предприятием составу стали типа X15H7M2Ю. Согласно проведенным исследованиям в средах, содержащих сероводород, волнистая пружина не рекомендована к использованию в нефтегазовом оборудовании, так как она является не стойкой к сероводородному растрескиванию под напряжением.*

**Ключевые слова:** сероводородное коррозионное растрескивание под напряжением (СКРН), кольцевые волнистые пружины, металлографические исследования, раствор NACE.

### Введение

**Т**ехнологическое оборудование нефтегазовой отрасли, трубопроводы, аппараты, крановые узлы, элементы вспомогательного оборудования при воздействии агрессивной коррозионной среды могут выходить из строя [1–3]. Сероводородсодержащие нефтегазовые среды вызывают опасное сероводородное растрескивание металлов [4–6]. Если сталь по своему химическому составу и механическим характеристикам соответствует требованиям нормативной документации, предъявляемым к сталям, стойким к сероводороду, то из нее можно изготавливать нефтегазовое оборудование с использованием различных технологий [7–9]. Однако элементы оборудования, выполненные из коррозионностойких металлов к воздействию сероводорода, разрушались при

сочетании негативных факторов [10–12]. В процессе эксплуатации технологические напряжения суммируются с рабочими напряжениями, и при воздействии сероводородсодержащих сред возникает растрескивание под напряжением [13, 14]. Поломки пружин происходили и в процессе производства [15]. Существуют различные методики тестирования стойкости материалов в насыщенной сероводородом среде для успешного создания изделий для безаварийной эксплуатации в осложненных условиях [16–18].

Один из элементов, входящих в конструкцию подобного оборудования, который подвергается негативному воздействию агрессивных сред, – кольцевые волнистые пружины, которые чаще всего являются компенсаторами температурных деформаций либо уплотняющими устройствами в трубопроводной арматуре.

### Объект и методы исследования

Объектом исследований являются кольцевые волнистые пружины из стали типа X15H7M2Ю. Пружины предполагалось использовать для эксплуатации в нефтегазовом оборудовании, транспортирующем агрессивную сероводородсодержащую среду.

Исследования кольцевых волнистых пружин на коррозионное растрескивание проводились следующими методами:

- испытания волнистых пружин на коррозионное растрескивание под напряжением по стандартам NACE;
- визуально-измерительный контроль пружин до и после испытаний на СКРН согласно РД 03-606-03 «Инструкция по визуальному и измерительному контролю»;
- металлографические исследования материала кольцевых волнистых пружин на микроскопе Nikon Eriphot 200;
- твердость металла пружин на приборе ИТР-60/150-А по Роквеллу согласно требованиям ГОСТ 9013–59 «Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу».

**Цель** исследования – определение стойкости материала пружин к коррозионному растрескиванию под напряжением.

### Результаты исследований и их обсуждение

Испытания стойкости пружин сероводородному коррозионному растрескиванию под напряжением (СКРН) проводились с учетом рекомендаций NACETM0177. В качестве коррозионной среды применялся водный раствор NACE: 5%-й раствор соли NaCl смешивали с 0,5%-м раствором  $\text{CH}_3\text{COOH}$ , который насыщали сероводородом  $\text{H}_2\text{S}$  с кислотностью  $\text{pH} \leq 3,5$ . Температура раствора поддерживалась в пределах  $T = 24 \pm 3$  °С. Сероводород получали на специальной установке из серни-

стого натрия и соляной кислоты в соотношении 1:1.

Для приготовления коррозионной среды использовалась дистиллированная вода с кислотностью  $\text{pH} = 5,4 \dots 6,6$ ; хлористый натрий и ледяную уксусную кислоту марки ХЧ; газообразный азот не ниже 1-го сорта и сероводород, содержащий примесей не более 0,5 %. При испытаниях в сероводородсодержащей среде коррозионные камеры, систему подачи раствора и сероводорода продували азотом в течение 5–10 минут для удаления кислорода. После этого камеры заполняли коррозионным раствором и продували азотом в течение не менее 1 часа при расходе азота не менее  $100 \text{ см}^3/\text{мин}$  на литр раствора. Затем через раствор пропускали сероводород  $\text{H}_2\text{S}$  с расходом в течение первого часа испытаний не менее  $200 \text{ см}^3/\text{мин}$  на литр раствора, а в течение остального времени испытаний не менее  $10 \text{ см}^3/\text{мин}$  на литр раствора.

Склонность материала кольцевых волнистых пружин к СКРН определялась путем нагружения их в специальном кондукторе из коррозионно-стойкой стали (рис. 1). Рабочая часть пружин промывалась раствором трихлорэтана и обезжиривалась ацетоном, после чего брали их только за нерабочую часть. Затем кондуктор с кольцевыми волнистыми пружинами помещался в ячейку (объем коррозионной ячейки обеспечивает удельный объем коррозионной среды не менее  $30 \text{ см}^3$  на  $1 \text{ см}^2$  неизолированной рабочей поверхности испытуемых пружин) и подводилась коррозионная среда NACE. Испытуемые пружины помещали таким образом, чтобы с нагруженной частью соприкасался только испытательный раствор. Испытания пружин к СКРН проводились при комнатной температуре и атмосферном давлении. Длительность испытаний составила 720 часов.

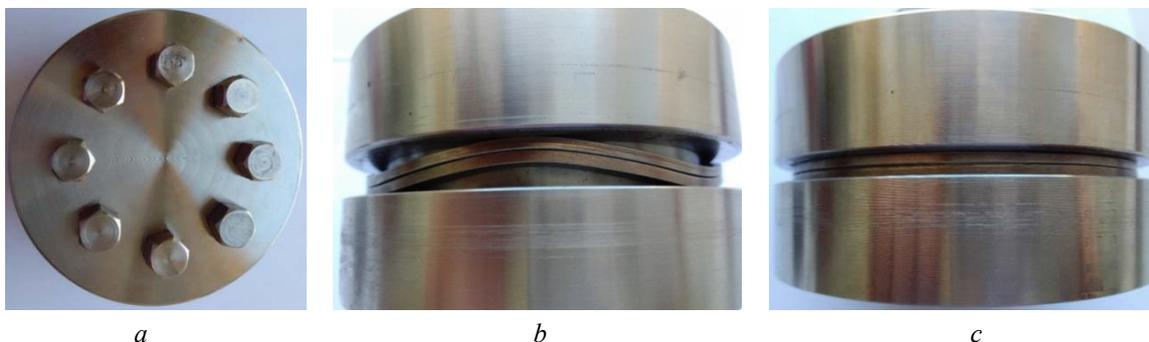


Рис. 1. Кондуктор с кольцевыми волнистыми пружинами до испытаний пружин на сероводородное растрескивание: *a* – вид сверху кондуктора с зажимными винтами; *b* – форма пружин до сжатия; *c* – сжатые пружины

Fig. 1. Conductor with ring wavy springs before testing the springs for hydrogen sulfide cracking: *a* - top view of the conductor with clamping screws; *b* - shape of springs before compression; *c* - compressed springs

Согласно данным измерения твердости пружин из стали типа X15H7M2Ю: фрагмент пружины № 1, сторона Б – твердость металла находится в пределах 46...49 HRC (439...473 HB); фрагмент пружины № 2, сторона Б – твердость металла находится в пределах 45...50 HRC (428...484 HB), что выше твердости 42...43 HRC, указанной в представленном заказчиком сертификате, и выше максимально допустимой твердости 22 HRC согласно требованиям стандарта NACE MR0175 для изделий из подобных легированных сталей, контактирующих с сероводородсодержащими средами.

Расчет наибольших напряжений изгиба в поперечном сечении кольцевой волнистой пружины проводился согласно [5, 6]. При этом для данных пружин приняты следующие исходные данные: средний радиус пружины  $R = 42,6$  мм; высота пружины  $H = 6,4$  мм в свободном состоянии; ширина прямоугольного поперечного сечения кольца  $b = 4,3$  мм, высота прямоугольного поперечного сечения кольца  $h = 2,0$  мм; число волн пружины  $n = 4$ ; модуль упругости первого рода материала пружины  $E = 2,12 \cdot 10^5$  МПа.

Размеры поперечного сечения кольцевой волнистой пружины малы в сравнении с радиусом кривизны, и при определении напряжений изгиба использовались общепринятые методы расчета стержней малой кривизны (без учета нормальных и перерезывающих сил). При этом средним радиусом кольца, представляющего собой развернутую на плоскость волнистую пружину, несколько больше ее среднего радиуса  $R$ , при расчете можно пренебречь.

Тогда осадка данной пружины при полном сжатии

$$\delta = H - h = 6,4 - 2 = 4,4 \text{ мм.}$$

Полная нагрузка  $P$ , воспринимаемая пружиной и соответствующая величине осадки, определяется по формуле

$$P = \frac{2nB\delta}{kR^3}, \quad (1)$$

где  $k$  – безразмерный коэффициент;  $B$  – жесткость поперечного сечения кольца при изгибе относительно оси, параллельной плоскости кольца,

$$B = \frac{bh^3}{12} E = \frac{4,3 \cdot 2^3}{12} 2,12 \cdot 10^5 = 0,608 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{мм}^2. \quad (2)$$

Коэффициент  $k$  в формуле (1) определяется зависимостью

$$k = (\alpha - \operatorname{tg} \alpha)(1 + 3\nu) + (1 + \nu)\alpha \operatorname{tg}^2 \alpha, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – половина угла между опорными линиями,

$$\alpha = \pi/2n = 3,14/(2 \cdot 4) = 0,39 \text{ рад};$$

$\nu$  – коэффициент, равный отношению жесткостей поперечного сечения кольца на изгиб и на кручение.

Принимая по таблице при  $h/b = 2/4,3 = 0,47$   $\nu = 0,93$  и коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ , находим

$$k = (0,39 - \operatorname{tg} 0,39)(1 + 3 \cdot 0,93) + (1 + 0,93) \cdot 0,39 \cdot \operatorname{tg}^2 0,39 = 0,047.$$

Тогда в соответствии с формулами (1)–(3) нагрузка при сжатии пружины составит

$$P = \frac{2 \cdot 4 \cdot 0,608 \cdot 10^6 \cdot 4,4B\delta}{0,047 \cdot 42,6^3} = 5890 \text{ Н.}$$

Наибольшие напряжения изгиба в поперечном сечении кольца рассчитываются по формуле

$$\sigma_{\max} = \xi \frac{PR}{bh^2}, \quad (4)$$

где

$$\xi = \frac{3}{4} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{4} = \frac{3}{4} \operatorname{tg} \frac{0,39}{4} = 0,073.$$

Подставив в выражение (4) вычисленные значения  $P$  и  $\xi$ , получим  $\sigma_{\max} = 1065$  МПа. Данные напряжения близки к пределу прочности материала.

Кондуктор с кольцевыми волнистыми пружинами после испытаний в течение 720 часов пружин на СКРН представлены на рисунке 2. Один винт, изготовленный из некоррозионно стойкой стали, имел значительный слой продуктов коррозии. Поверхность пружин имела незначительный налет из продуктов коррозии.

После выдержки в среде NACE с учетом рекомендаций стандарта ANSI/NACE TM 0177 испытываемые пружины промывали специальным раствором для нейтрализации агрессивных компонентов и проводили металлографические исследования с целью определения склонности материала пружин к растрескиванию под влиянием агрессивной сероводородной среды и действия напряжений.

При визуальном-измерительном контроле пружин после испытаний на СКРН в областях волн, где происходит взаимодействие с плоскостью опоры и действуют максимальные растягивающие напряжения при сжатии волнистых пружин, возникли трещины (рис. 3, 4).

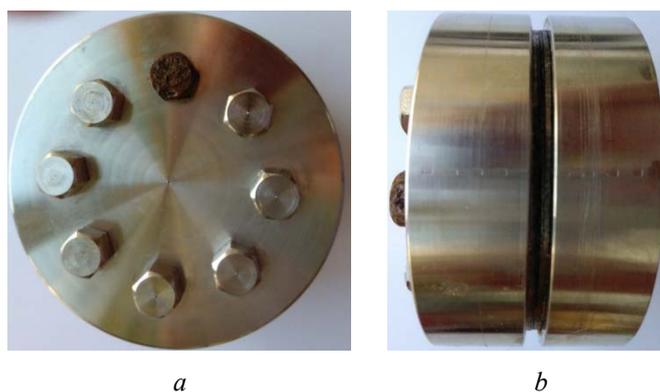


Рис. 2. Кондуктор с кольцевыми волнистыми пружинами после испытаний пружин на сероводородное растрескивание: *a* – вид сверху кондуктора с зажимными винтами; *b* – вид пружин с продуктами коррозии

Fig. 2. Conductor with ring wavy springs after testing the springs for hydrogen sulfide cracking: *a* - top view of the conductor with clamping screws; *b* - type of springs with corrosion products

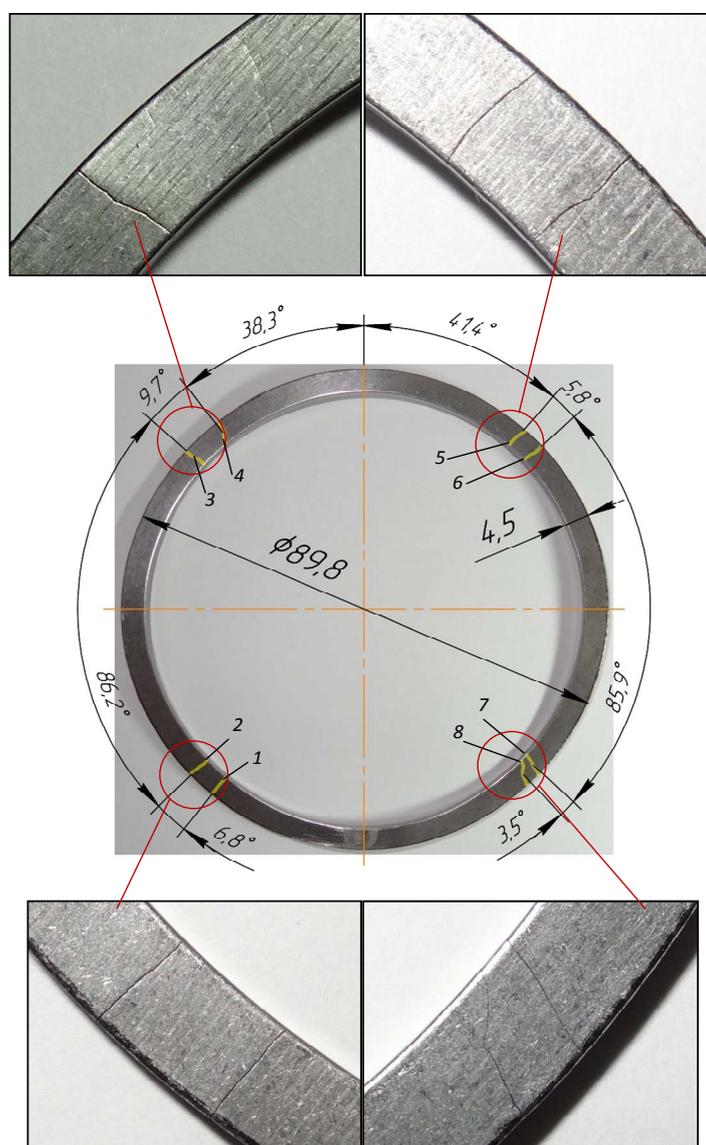


Рис. 3. Трещины в кольцевой волнистой пружине № 1 (сторона А) после испытания на сероводородное растрескивание под напряжением (720 ч)

Fig. 3. Cracks in ring wavy spring No. 1 (side A) after hydrogen sulfide stress cracking test (720 h)

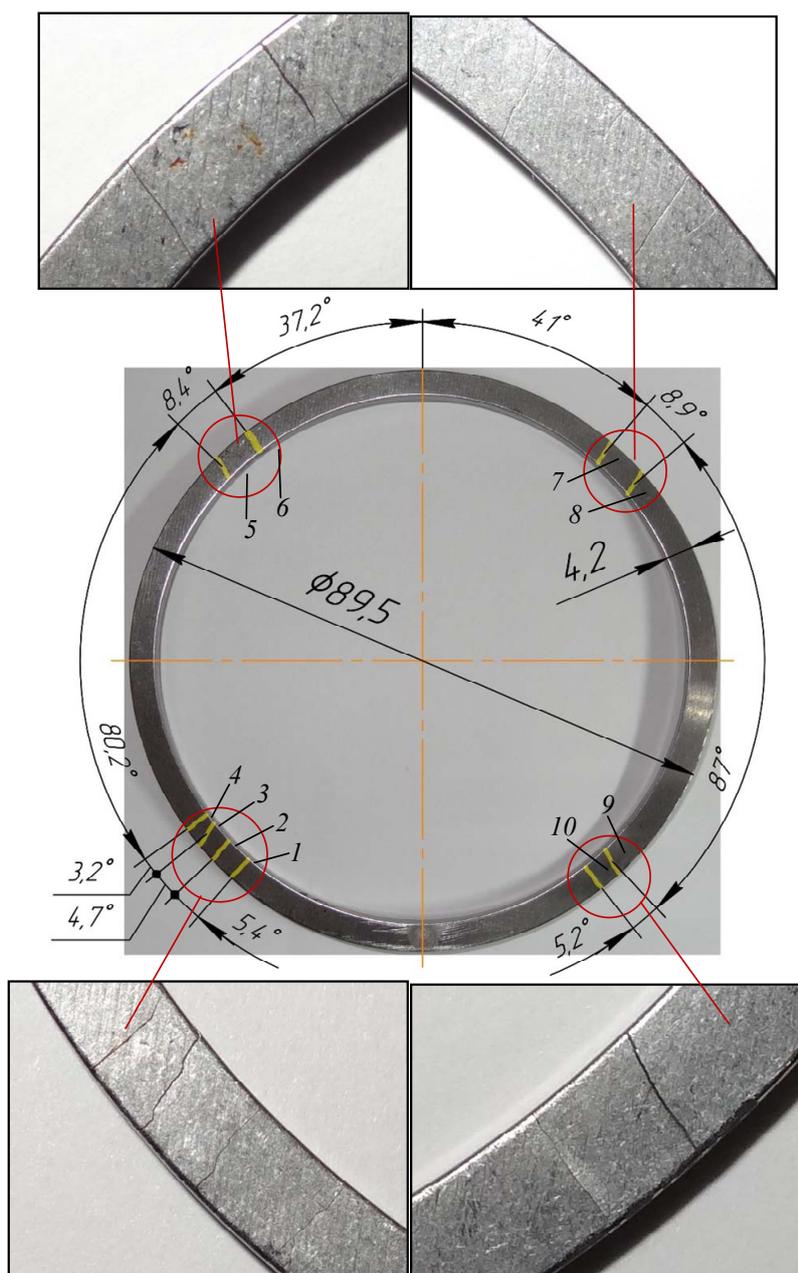
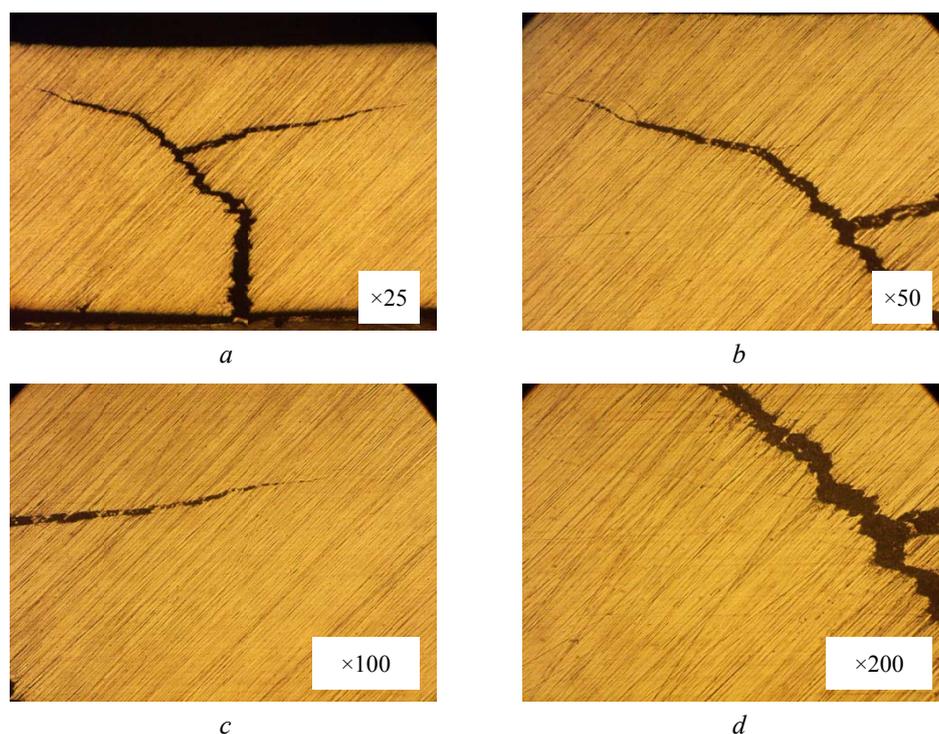


Рис. 4. Трещины в кольцевой волнистой пружине № 2 (сторона А) после испытания на сероводородное растрескивание под напряжением (720 ч)

Fig. 4. Cracks in ring wavy spring No. 2 (side A) after hydrogen sulfide stress cracking test (720 h)

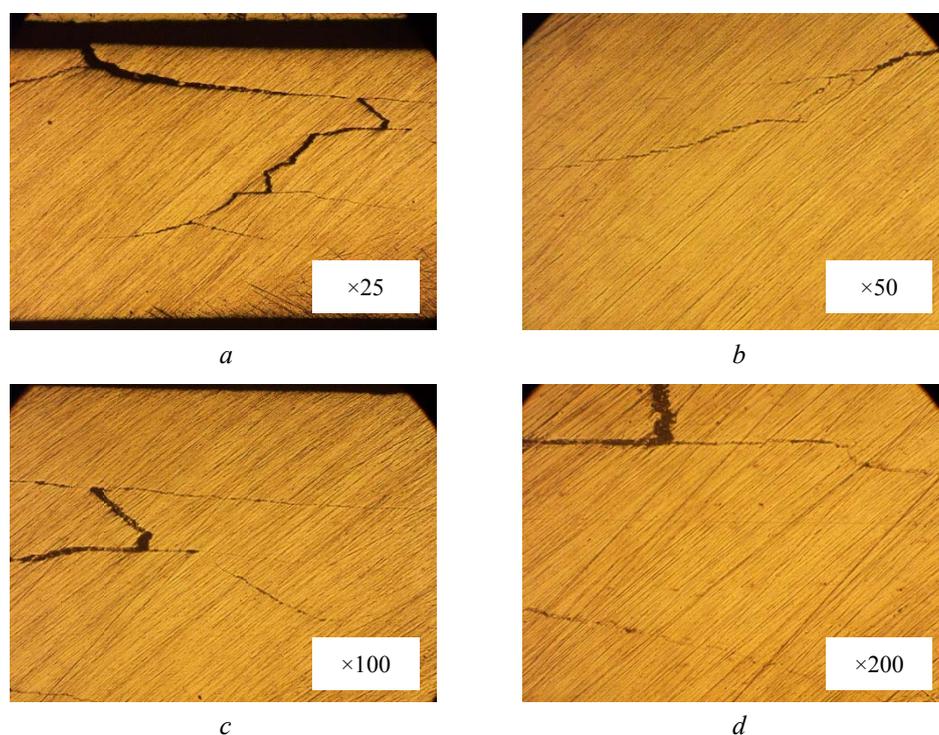
При рассмотрении плоскости сечения образца из кольцевой волнистой пружины (рис. 5, 6) наблюдается развитие трещины с поверхности, где действуют максимальные растягивающие напряжения, вглубь металла. Начальное развитие трещины перпендикулярно нормальным напряжениям имеет наибольшее раскрытие. Затем с уменьшением от поверхности пружины напряжений в поперечном сечении от изгиба

трещина движется по плоскостям действия наибольших касательных напряжений и имеет разветвленный характер. Данное образование трещин характерно общепринятому механизму сероводородного растрескивания металла под напряжением [19, 20]. Проведенные исследования позволили сформулировать основные выводы о возможности применения волнистой пружины в нефтегазовом оборудовании.



*Рис. 5.* Плоскость сечения образца из кольцевой волнистой пружины № 1, параллельная оси кольца, в зоне трещины 1 на стороне А: *a* – увеличение в 25 раз; *b* – увеличение в 25 раз; *c* – увеличение в 100 раз; *d* – увеличение в 200 раз

*Fig. 5.* Sectional plane of a sample from a ring wavy spring No. 1, parallel to the axis of the ring, in the zone of crack 1 on side A: *a* - 25 times magnification; *b* - 25 times magnification; *c* - 100 times magnification; *d* - 200 times magnification



*Рис. 6.* Плоскость сечения образца из кольцевой волнистой пружины № 2, параллельная оси кольца, в зоне трещины 6 на стороне А: *a* – увеличение в 25 раз; *b* – увеличение в 25 раз; *c* – увеличение в 100 раз; *d* – увеличение в 200 раз

*Fig. 6.* Sectional plane of a sample from a ring wavy spring No. 2, parallel to the axis of the ring, in the zone of crack 6 on side A: *a* - 25 times magnification; *b* - 25 times magnification; *c* - 100 times magnification; *d* - 200 times magnification

## Выводы

1. Согласно полученным результатам испытаний в сероводородсодержащей среде коррозионно-стойкая сталь X15H7M2Ю пружин при максимальном сжатии и возникающих напряжениях в металле не является стойкой к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением.

2. При использовании кольцевых волнистых пружины из стали X15H7M2Ю необходимо учитывать требования рекомендаций нормативных документов к материалам при взаимодействии с сероводородсодержащими средами и обеспечивать стойкое защитное покрытие пружин

3. Кроме того, кольцевые волнистые пружины должны быть изменены конструктивно для снижения напряжений в металле, которые определяют возникновение СКРН.

## Библиографические ссылки

1. Ваганов П. К. 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
2. Совершенствование способа пожарной безопасности трубопроводного транспорта сероводородсодержащих нефтегазовых сред / Р. Ф. Мамбетов, Ф. Ш. Хафизов, В. М. Кушнаренко, И. Ф. Хафизов, Л. В. Сорокина // *Нефтегазовое дело*. 2023. № 1. С. 84–106. DOI: 10.17122/ogbus-2023-1-84-106
3. 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
4. Причины повреждения муфт насосно-компрессорных труб / В. М. Кушнаренко, 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
5. 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).
6. Ravibharath R., Muthupandi V., Bala Srinivasan P., Devakumaran K. (2020) Characterization of Solidification Cracking in 304HCu. *Trans Indian Inst Met* 73, pp. 2345-2353. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12666-020-02028-1> (accessed: 16.05.2024).
7. Cui P., Xing G., Nong Z., Chen L., Lai Z., Liu Y., Zhu J. (2022) Recent Advances on Composition-Microstructure-Properties Relationships of Precipitation Hardening Stainless Steel Materials, vol. 15, p. 8443. Available at: <https://doi.org/10.3390/ma15238443> (accessed: 16.05.2024).
8. Филистеев В. Г., Стеклова Е. О. Дуплексные стали для транспорта агрессивных сред, содержащих сероводород и двуокись углерода // *Экспозиция Нефть Газ*. 2023. № 1. С. 82–87. DOI: 10.24412/2076-6785-2023-1-82-87
9. 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: 16.05.2024).
10. Причины повреждения манометра, установленного на технологическом трубопроводе / В. С. Репях, С. Ю. Решетов, Г. А. Клещарева, Е. В. Кушнаренко // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. 2024. Т. 27, № 1. С. 63–72. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-1-63-72
11. Пирогов С. П., Чуба А. Ю. Развитие теории колебаний манометрических трубчатых пружин // *АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал*. 2022 № 3. DOI: <https://doi.org/10.51419/202123304>
12. Moyle M.S., Haghadi N., Luzin V., Salvemini F., Liao X.Z., Ringer S.P., Primig S. (2024) Correlation of microstructure, mechanical properties, and residual stress of 17-4 PH stainless steel fabricated by laser powder bed fusion. *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 198, pp. 83-9. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2024.01.080> (accessed: 16.05.2024).
13. Тулицин 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
14. 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
15. Das S., Talukdar S., Solanki V. (2020) Breakage of Spring Steel During Manufacturing: A Metallurgical Investigation. *J Fail. Anal. and Preven*, vol. 20, pp. 1462-1469. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11668-020-00993-9> (accessed: 16.05.2024).
16. Анализ и выбор методов испытания сталей на стойкость к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением в H<sub>2</sub>S-содержащих средах / А. В. Кравченко, С. Н. Мольцен, Ю. Н. Симонов, Р. М. Полежаев, Е. В. Погорелов // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. 2021. Т. 23, № 2. С. 43–54. DOI: 10.15593/2224-9877/2021.2.06
17. Исследование металла, работающего в средах, вызывающих сероводородное растрескивание / Н. И. Габельченко, Е. Ю. Карпова, А. И. Габельченко, А. П. Рыжко // *Известия Волгоградского государственного университета*

венного технического университета. 2020. № 7 (242). С. 28–33. DOI: 10.35211/1990-5297-2020-7-242-28-33

18. 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

19. Ботвина Л. П. Основы фрактодиагностики : монография. М. : Техносфера, 2022. 394 с. ISBN 978-5-94836-637-1

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

### References

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

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

3. Mitrofanov A.V., Lomantsov V.A., Voronin S.P. (2023) [Analysis of the causes of damage to a long-term operated 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

4. Kushnarenko V.M., Rapiakh V.S., Tavtilov I.Sh., Reshetov S.Yu. (2020) [Causes of damage to couplings of pump and compressor pipes]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Tekhnicheskie nauki*, no. 4, pp. 122-134 (in Russ.). DOI: 10.21685/2072-3059-2020-4-10

5. 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: 16.05.2024).

6. Ravibharath R., Muthupandi V., Bala Srinivasan P., Devakumaran K. (2020) Characterization of Solidification Cracking in 304HCu. *Trans Indian Inst Met* 73, pp. 2345-2353. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12666-020-02028-1> (accessed: 16.05.2024).

7. Cui P., Xing G., Nong Z., Chen L., Lai Z., Liu Y., Zhu J. (2022) Recent Advances on Composition-Microstructure-Properties Relationships of Precipitation Hardening Stainless Steel Materials, vol. 15, p. 8443. Available at: <https://doi.org/10.3390/ma15238443> (accessed: 16.05.2024).

8. Filisteev V.G., Steklova E.O. (2023) [Duplex steels for transporting aggressive media containing hydrogen sulfide and carbon dioxide]. *Ekspozitsiia Neft' Gaz*, no. 1, pp. 82-87 (in Russ.). DOI: 10.24412/2076-6785-2023-1-82-87

9. 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: 16.05.2024).

10. Rapiakh V.S., Reshetov S.Yu., Kleshchareva G.A., Kushnarenko E.V. (2024) [Causes of damage to a pressure gauge installed on a 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

11. Pirogov S.P., Chuba A.Yu. (2022) [Development of the theory of oscillations of manometric tubular springs]. *AgroEkoInfo: Elektronnyi nauchno-proizvodstvennyi zhurnal*, no. 3 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.51419/202123304>

12. Moyle M.S., Haghdadi N., Luzin V., Salvemini F., Liao X.Z., Ringer S.P., Primig S. (2024) Correlation of microstructure, mechanical properties, and residual stress of 17-4 PH stainless steel fabricated by laser powder bed fusion. *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 198, pp. 83-97. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2024.01.080> (accessed: 16.05.2024).

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

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

15. Das S., Talukdar S., Solanki V. (2020) Breakage of Spring Steel During Manufacturing: A Metallurgical Investigation. *J Fail. Anal. and Preven*, vol. 20, pp. 1462-1469. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11668-020-00993-9> (accessed: 16.05.2024).

16. Kravchenko A.V., Mol'tsen S.N., Simonov Yu.N., Polezhaev R.M., Pogorelov E.V. (2021) [Analysis and selection of testing methods for steels for resistance to sulfide stress corrosion cracking in H<sub>2</sub>S-containing environments]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, vol. 23, no. 2, pp. 43–54. DOI:10.15593/2224-9877/2021.2.06.

17. Gabel'chenko N.I., Karpova E.Yu., Gabel'chenko A.I., Ryzhko A.P. (2020) [Study of metal operating in environments causing hydrogen sulfide cracking]. *Izvestiia Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, no. 7, pp. 28-33 (in Russ.). DOI: 10.35211/1990-5297-2020-7-242-28-33

18. Laptev A.B., Zakirova L.I., Zagorskikh O.A., Pavlov M.R., Gorbovets M.A. (2022) [Methods of 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

19. Botvina L.R. (2022) *Osnovy fraktodiagnostiki* [Fundamentals of fractodiagnosics]. Moscow: Tekhnosfera Pbl., 394 p. (in Russ.). ISBN 978-5-94836-637-1

20. Fellouza Dzh. (ed.) (1982) *Fraktografiia i atlas fraktogramm* [Fraktografiia i atlas fraktogramm]. Moscow: Metallurgii Publ., 489 p. (in Russ.).

### Damage to Special-Purpose Ring Wavy Springs under the Influence of Hydrogen Sulfide-Containing Media

*Yu.A. Chirkov*, DSc in Engineering, Associate Professor, Orenburg State University, Orenburg, Russia

*A.S. Kirilenko*, PhD in Engineering, 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

*Annular wavy springs are widely used in the oil and gas industry and most often serve either as compensators for temperature deformations or for mechanical seals of various joints in equipment transporting oil and gas media. These springs provide high load capacity with a relatively low draft, which ensures a compact design. Most often, such springs are made by stamping from sheet steel. When operating technological equipment that transport hydrogen sulfide-containing oil and gas media, hydrogen sulfide stress corrosion cracking occurs quite often, which can lead to failure of industrial equipment. In particular, damage to annular wavy springs can cause depressurization of elements of industrial equipment and cause significant harm not only to the environment, but also to maintenance personnel.*

*The object of research was annular wavy springs made of steel type X15N7M2YU. The purpose of the study is to determine the resistance of the spring material to stress corrosion cracking. This article discusses the test results of special purpose annular wavy springs in an aggressive hydrogen sulfide-containing medium artificially prepared according to the recommendations of ANSI/NACE TM 0177. The results of hardness studies, strength calculations and metallographic studies of damage to a wavy spring are presented. The chemical composition of the metal of the spring fully corresponds to the steel type X15N7M2YU declared by the enterprise. According to the studies conducted in environments containing hydrogen sulfide, the wavy spring is not recommended for use in oil and gas equipment, since it is not resistant to hydrogen sulfide cracking under stress.*

**Keywords:** hydrogen sulfide stress corrosion cracking (HSCC), ring wave springs, metallurgical studies, NACE solution.

Получено 20.05.2024

#### Образец цитирования

Повреждения кольцевых волнистых пружин специального назначения под воздействием сероводородсодержащих сред / Ю. А. Чирков, А. С. Кириленко, С. Ю. Решетов, Г. А. Клещарева, Е. В. Кушнарэнко // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2024. Т. 27, № 3. С. 70–78. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-3-70-78

#### For Citation

Chirkov Yu.A., Kirilenko A.S., Reshetov S.Yu., Kleshchareva G.A., Kushnarenko E.V. (2024) [Damage to Special-Purpose Ring Wavy Springs under the Influence of Hydrogen Sulfide-Containing Media]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2024, vol. 27, no. 3, pp. 70-78 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2024-3-70-78