УДК 539.3

МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ СОСТАВНЫХ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА ДЛЯ ФЛАНЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

© 2014 А.В. Зайцев, В.С. Кокшаров, И.В. Предков

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Поступила в редакцию 12.12.2014

На основе разработанной модели механического поведения составных уплотнительных элементов из терморасширенного графита для крупногобаритных фланцевых соединений определены значения контактных давлений, обоснован выбор давлений герметизации, обеспечивающих безопасную работу трубопроводной арматуры.

Ключевые слова: терморасширенный графит, уплотнительный элемент, фланцевое соединение, трубопровод, герметизация, контактное давление

Использование уплотнительных элементов (УЭ), изготовленных из терморасширенного графита (ТРГ), для герметизации фланцевых соединений трубопроводов в нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности, предприятиях электроэнергетики и ЖКХ связано с высокой термо- и химической стойкостью этого уникального материала [1, 2]. Для фланцевых соединений большего диаметра гарантированное обеспечение геометрической стабильности (выполнение заданных допусков на внутренние и внешние диаметры) может быть обеспечено только в случае, если УЭ будет составным (т.е. будет состоять из нескольких сегментов, соединенных между собой). Часто возникающие при эксплуатации значительные перепады рабочих давлений могут привести к увеличению числа аварийных прекращений работы оборудования по причине разгерметизации или протечки рабочей среды в местах сопряжения составных частей УЭ фланцевых соединений. По мнению инженеров-конструкторов, занимающихся разработкой и проектированием УЭ из «традиционных» слабосжимаемых изотропных материалов (паронит, фторопласт, резина и т.п.), в качестве возможных причин отказа оборудования может рассматриваться недостаточные контактное дав-

ление p_{cont} на поверхностях сопряжения частей составных УЭ и торцевое равномерное

Кокшаров Виталий Сергеевич, аспирант

давление герметизации p_{germ} , задаваемое усилиями затяжки шпилек или болтов фланца. Аргументами в пользу этих предположений выступают регламентируемое стандартами [2, 3] для «традиционных» уплотнительных материалов (имеющих коэффициенты Пуассона, близкие к 0,5) эмпирическое соотношение для p_{cont} и рабочего p_{work} давления:

$$p_{\rm cont} \ge (2...4) p_{\rm work} \,. \tag{1}$$

ТРГ обладает ярко выраженной анизотропией физико-механических свойств, предопределяемой технологическими операциями многократной прокатки в фольгу и прессования [1]. Поэтому настоящая работа будет посвящена описанию деформирования составных УЭ из ТРГ и определению контактного давления для различных конструктивных исполнений соединения сегментов УЭ, различных значений давлений p_{work} и p_{germ} .



Рис. 1. Граничные условия для 1/4 симметричной части разъемного УЭ

УЭ фланцевого соединения является составным толстостенным, ограниченным по

Зайцев Алексей Вячеславович, кандидат физикоматематических наук, доцент кафедры «Механика композиционных материалов и конструкций». E-mail: zav@pstu.ru

Предков Иван Владимирович, аспирант

высоте *h* однородным цилиндром, поперечное сечение которого ограничено двумя концентрическими окружностями радиусами *a* и *b*, *a* < *b*. Следуя [4, 5], при построении модели деформирования составного УЭ из ТРГ, будем предполагать, что справедливы уравнения равновесия

$$\partial_{r}\sigma_{rr} + \partial_{z}\sigma_{zr} + \frac{1}{r}(\partial_{\theta}\sigma_{r\theta} + \sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}) = 0, \quad (2)$$

$$\partial_{r}\sigma_{r\theta} + \partial_{z}\sigma_{z\theta} + \frac{1}{r}(\partial_{\theta}\sigma_{\theta\theta} + 2\sigma_{r\theta}) = 0,$$

$$\partial_{r}\sigma_{zr} + \partial_{z}\sigma_{zz} + \frac{1}{r}(\partial_{\theta}\sigma_{\thetaz} + \sigma_{zr}) = 0$$

и геометрические соотношение Коши

$$\varepsilon_{rr} = \partial_r u_r, \quad \varepsilon_{zz} = \partial_z u_z,$$

$$2\varepsilon_{zr} = \partial_r u_z + \partial_z u_r, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{\theta\theta} = \frac{1}{r} (\partial_{\theta} u_r + u_r),$$

$$2\varepsilon_{r\theta} = \partial_r u_{\theta} + \frac{1}{r} (\partial_{\theta} u_r - u_{\theta}),$$

$$2\varepsilon_{\theta z} = \partial_z u_{\theta} + \frac{1}{r} \partial_{\theta} u_z,$$

записанные в цилиндрической ортогональной системе координат *r*, θ и *z*.

Анализ технологических процессов изготовления УЭ позволяет сделать вывод о том, что ТРГ – линейно упругий трансверсально-изотропный материал с осью симметрии бесконечного порядка *z*, совпадающей с образующей УЭ. Тогда определяющие соотношения представим следующим образом:

$$\sigma_{rr} = K_{11}\varepsilon_{rr} + K_{12}\varepsilon_{\theta\theta} + K_{13}\varepsilon_{zz},$$

$$\sigma_{\theta\theta} = K_{12}\varepsilon_{rr} + K_{11}\varepsilon_{\theta\theta} + K_{13}\varepsilon_{zz}, \quad (4)$$

$$\sigma_{zz} = K_{13}(\varepsilon_{rr} + \varepsilon_{\theta\theta}) + K_{33}\varepsilon_{zz}, \quad \sigma_{r\theta} = G\varepsilon_{r\theta},$$

$$\sigma_{zr} = \hat{G}\varepsilon_{zr}, \quad \sigma_{\theta z} = \hat{G}\varepsilon_{\theta z}$$

$$K_{11} = \frac{E}{D}(1 - \hat{v}^{2}), \quad K_{12} = \frac{E}{D}(v - \hat{v}^{2}),$$

$$K_{33} = \frac{\hat{E}}{D}(1 - v^{2}), \quad K_{13} = \hat{v}\frac{E}{D}(1 + v).$$

Здесь $D = (1+\nu)(1-\nu-2\hat{\nu}^2)$, *Е* и \hat{E} — модули Юнга в плоскости изотропии и продольном направлении, *G* и \hat{G} — поперечный и продольный модули сдвига, ν и $\hat{\nu}$ — коэффициенты Пуассона.

Будем предполагать, что герметизация фланцевого соединения обеспечивается равно-

мерным осевым давлением p_{germ} на торцевой поверхности УЭ Γ_5 :

$$\sigma_{zz}\big|_{\Gamma_5} = p_{\text{germ}},\tag{5}$$

которое не исключает скольжение на внешней боковой Γ_4 и нижней торцевой Γ_6 поверхностях, по которым составной УЭ контактирует с корпусом фланца:

$$\begin{aligned} u_r \big|_{\Gamma_4} &= 0, \quad \sigma_{rz} \big|_{\Gamma_6} &= 0, \quad u_z \big|_{\Gamma_6} &= 0, \\ \sigma_{r\theta} \big|_{\Gamma_6} &= 0. \end{aligned}$$
(6)

На участке Γ_3 внутренней боковой поверхности, контактирующей с рабочими средами (жидкостями или газами), задано рабочее давление $p_{\rm work}$. Поэтому

$$\sigma_{rr}\big|_{\Gamma_2} = p_{\text{work}} \,. \tag{7}$$

Геометрия и положение поверхности сопряжения $_{\Gamma_7}$ отдельных частей УЭ определяются в ходе решения краевой задачи. На этих поверхностях при $[\sigma_{n\tau}(\mathbf{r})]|_{\Gamma_7^+} < [\mu |\sigma_{nn}(\mathbf{r})|]|_{\Gamma_7^-}$ имеет место идеальное прилипание частей

$$\begin{bmatrix} \sigma_{n\tau}(\mathbf{r})n_n(\mathbf{r}) \end{bmatrix}_{\Gamma_7^+} = \begin{bmatrix} \sigma_{n\tau}(\mathbf{r})n_n(\mathbf{r}) \end{bmatrix}_{\Gamma_7^-}, \begin{bmatrix} u_n(\mathbf{r}) \end{bmatrix}_{\Gamma_7^+} = \begin{bmatrix} u_n(\mathbf{r}) \end{bmatrix}_{\Gamma_7^-},$$
(8)

а при $[\sigma_{n\tau}(\mathbf{r})]_{\Gamma_7^+} = [\mu |\sigma_{nn}(\mathbf{r})|]_{\Gamma_7^-}$ реализуются условия контакта с кулоновским трением

$$\begin{bmatrix} \sigma_{n\tau}(\mathbf{r}) \end{bmatrix}_{\Gamma_7^+} = \begin{bmatrix} \mu | \sigma_{nn}(\mathbf{r}) | \end{bmatrix}_{\Gamma_7^-},$$
$$\begin{bmatrix} u_n(\mathbf{r}) \end{bmatrix}_{\Gamma_7^+} = \begin{bmatrix} u_n(\mathbf{r}) \end{bmatrix}_{\Gamma_7^-}.$$
 (9)

Здесь μ — статический коэффициент трения, а *n* и τ – единичные векторы нормали и касательной к Γ_7 .

Рассмотрим составной УЭ из ТРГ с внутренним a = 380,0 мм и внешним b = 395,0 мм радиусами и толщиной h = 3,0 мм. УЭ будет состоять из 4 сегментов, конструктивными решениями для соединения которых являются «ласточкин хвост» и «клипса». Рабочие давления $p_{\rm work}$ предполагались равными 10,0 МПа и 20,0 МПа, а давление герметизации $p_{\rm germ}$ изменялись дискретно от 10,0 МПа до 90,0 МПа. Упругие модули ТРГ были выбраны следующими: E = 9,04 ГПа, $\hat{E} = 0,75$ ГПа, G = 0,35 ГПа,

 $\hat{G} = 0,47$ ГПа, $\nu = 0,03$ и $\hat{\nu} = 0,05$ [6], коэффициент трения между частями составного УЭ из ТРГ был равен $\mu = 0,02$ [7].

Решение краевой задачи (2)-(4) с граничными условиями (5)-(9), описывающей механическое поведение составных УЭ из ТРГ при герметизации фланцевых соединений трубопроводов большого диаметра, проводилось численно методом конечных элементов в пакете ANSYS 11.0. Для выбора оптимальной конечноэлементной сетки были решены задачи с различной степенью дискретизации на 8-узловые призматические элементы с тремя степенями свободы в каждом узле. Дополнительное сгущение сетки предусматривалось вблизи границы контакта сегментов УЭ. Сравнение максимальных значений контактного давления $p_{\rm cont}$ на границе сопряжения сегментов составных УЭ для сеток с 24185 и 28420 конечными элементами (30526 и 35428 узловых точек соответственно) показало, что различие не превышает 5%. Любая из этих сеток может быть использована для проведения вычислительных экспериментов.

Таблица 1. Значения давления $p_{\rm cont}$ (МПа) в характерных контрольных точках на границе контакта сегментов составного УЭ из ТРГ для соединения «ласточкин хвост»

$p_{\rm germ}/p_{ m work}$	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5	Точка б	Точка 7
10 МПа / 10 МПа	9,567	9,502	8,406	8,813	8,439	9,465	9,339
10 МПа / 20 МПа	18,383	18,238	15,617	14,775	15,493	18,103	17,521
20 МПа / 10 МПа	10,286	10,320	10,796	10,080	10,725	10,332	10,386
20 МПа / 20 МПа	19,144	18,987	16,889	17,611	16,853	18,955	18,677
50 МПа / 10 МПа	12,544	13,018	15,539	17,720	15,874	13,118	14,063
50 МПа / 20 МПа	21,350	21,501	24,880	23,537	24,982	21,618	21,976
70 МПа / 10 МПа	13,878	15,103	18,142	24,541	20,196	15,212	16,605
70 МПа / 20 МПа	22,795	23,360	27,278	27,727	28,235	23,522	24,480
90 МПа / 10 МПа	16,948	17,193	22,277	32,316	35,204	17,840	19,402
90 МПа / 20 МПа	24,182	25,263	29,970	37,072	32,289	25,737	26,978



Рис. 2. Распределение давления на поверхности контактна сегментов составного УЭ для способов соединения «клипса» (а) и «ласточкин хвост» (б)

$p_{\rm germ}/p_{ m work}$	Точка 1	Точка 2	Точка З	Точка 4	Точка 5	Точка б	Точка 7
10 МПа / 10 МПа	9,072	9,366	9,507	9,974	9,045	9,775	8,990
10 МПа / 20 МПа	16,659	17,930	18,252	19,657	16,917	18,872	16,384
20 МПа / 10 МПа	10,593	10,445	10,288	10,017	10,605	10,082	10,642
20 МПа / 20 МПа	18,138	18,734	19,006	19,967	18,066	19,575	17,974
50 МПа / 10 МПа	14,973	14,746	12,799	10,592	16,765	9,817	15,364
50 МПа / 20 МПа	22,691	21,723	21,379	20,142	22,727	20,732	22,914
70 МПа / 10 МПа	17,826	19,006	14,214	10,254	21,162	9,980	18,520
70 МПа / 20 МПа	25,683	23,242	23,061	21,213	26,914	19,677	26,123
90 МПа / 10 МПа	20,759	22,556	15,675	9,602	25,622	9,615	21,727
90 МПа / 20 МПа	28,574	26,976	24,728	21,644	31,439	19,904	29,241

Таблица 2. Значения давления p_{cont} (МПа) в характерных контрольных точках на границе контакта сегментов составного УЭ из ТРГ для соединения «клипса»





Рис. 3. Зависимость максимального контактного давления от давления обжатия

(■ - *p*_{work} = 10 МПа, ● - *p*_{work} = 20 МПа) для способов соединения сегментов составного УЭ из ТРГ «клипса» (а) и «ласточкин хвост» (б)

В табл. 1 и 2 представлены значения контактного давления в некоторых характерных точках на границе сопряжения сегментов составных УЭ, а на рис. 2 показаны распределения p_{cont} при $p_{work} = 10$ МПа и $p_{germ} = 20$ МПа. Следуя [2, 3] значение контактного давления может рассматриваться в качестве одного из возможных параметров оценки герметичности соединения. Как видим, регламентируемое стандартами для «традиционных» изотропных слабосжимаемых уплотнительных материалов [2, 3] эмпирическое соотношение (1) не выполняется ни для одного из способов соединения, а для случаев, когда $p_{\rm work} = p_{\rm germ}$, во всех контрольных точках, принадлежащих поверхности сопряжения, имеет место условие $p_{\rm cont} < p_{\rm work}$.

Результаты, представленные на рис. 3, свидетельствуют, что увеличение давления герметизации (регулируемое моментом затяжки шпилек или болтов фланца) не приводит к значительному росту величин максимального контактного давления на поверхностях сопряжения сегментов. Так, например, для выполнения условия (1) при $p_{\text{work}} = 10 \text{ M}\Pi a$ необходимо, чтобы $p_{\rm cont} \ge 20$ МПа. Поэтому для способов соединения сегментов составного УЭ из ТРГ «клипса» и «ласточкин хвост» необходимо увеличить давление герметизации p_{germ} до 70 МПа и 60 МПа соответственно. Такое увеличение нагрузки может привести не только к разрушению или необратимому пластическому деформированию крепежных элементов фланцевого соединения, но и к появлению зазоров на границе сопряжения сегментов УЭ. При $p_{work} = 10 \text{ МПа}$ эти зазоры появляются в окрестности шестой контрольной точки для соединение «клипса» (рис. 2a), если давление герметизации будет превышать 30 МПа, а при $p_{\text{work}} = 20$ МПа, если $p_{\text{germ}} > 60$ МПа (табл. 2). Кроме того, при двукратном превышении p_{germ} над p_{work} наблюдается появление зазоров в окрестности только четвертой контрольной точки (рис. 4), о чем свидетельствуют данные, представленные в табл. 1 и 2. Несмотря на то, что конструктивное исполнение для соединения сегментов составного УЭ «клипса» обеспечивает большую поверхность контакта, наиболее технологичный с точки зрения реализации тип соединения «ласточкин хвост» продемонстрировал стабильные показатели герметичности соединения и гарантированное отсутствие

зазоров уже при $p_{germ} = 2 p_{work}$. Несмотря на это, при стационарном режиме работы трубопроводной арматуры, когда рабочее давление сохраняется на неизменном уровне, разгерметизации соединения сегментов составных УЭ на практике не наблюдается. Однако даже незначительные перепады давления приводят к разгерметизации и последующей аварийной остановке работы оборудования.

Опыт эксплуатации составных УЭ из ТРГ для трубопроводов больших диаметров показывает, что гарантированное обеспечение условий герметичности может быть достигнуто и при нарушении ограничения (1). Исключения составляют описанные выше особые случаи, когда из-за определенных соотношений между рабочими давлениями и давлениями герметизации на границе контакта появляются зазоры. Это, с одной стороны, демонстрирует ограничения в применении существующих и предопределяет необходимость разработки новых отраслевых стандартов для расчета современных составных УЭ для фланцевых соединений трубопроводов больших диаметров, изготовленных из композитов на основе ТРГ [8], а с другой – показывает необходимость разработки принципиально новых методов мониторинга УЭ на основе оптоволоконных технологий, контролирующих не только изменение давлений, но и перемещений точек поверхностей сопряжения.

Авторы признательны руководителям ООО «Силур» г. Пермь: генеральному директору О.Ю. Исаеву и заместителю генерального директора Д.В. Смирнову за постоянное внимание к работе и обсуждение полученных результатов.

Исследования проведены в рамках задания № 2014/152 на выполнение государственных работ в сфере

научной деятельности в рамках базовой части госзадания Минобрнауки РФ (код проекта – 1911).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- 1. Исаев, О.Ю. Технология и аппаратурное оформление процесса производства уплотнительных материалов из терморасширенного графита / О.Ю. Исаев, Д.В. Смирнов, В.П. Лепихин и др. // Конструкции из композиционных материалов. 2006. Вып. 4. С. 6-79.
- 2. ГОСТ Р 52857.4–2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений.
- Кондаков, Л.А. Уплотнения и уплотнительная техника: Справочник / Л.А. Кондаков, А.М. Голубев, В.Б. Овандер и др. – М.: Машиностроение, 1986. 464 с.
- Зайцев, А.В. Моделирование начального режима работы кольца из терморасширенного графита в кранах с уплотнением по штоку / А.В. Зайцев, Д.С. Рогов // Известия Самарского НЦ РАН. 2012. Т. 14, №4(5). С. 1235-1238.
- Зайцев, А.В. Моделирование условий эксплуатации и уточненный прочностной анализ уплотнительных элементов из терморасширенного графита / *А.В. Зайцев, Н.Г. Злобин, О.Ю. Исаев, Д.В. Смирнов* // Вестник ПНИПУ. Механика. 2012. № 4. С. 5-19.
- Нагорный, В.Г. Свойства конструкционных материалов на основе углерода: Справочник / В.Г. Нагорный, А.С. Котосонов, В.С. Островский и др. М.: Металлургия, 1975. 336 с.
- Фиалков, А.С. Углерод, межслоевые соединения и композиты на его основе. – М.: Аспект Пресс, 1997. 718 с.
- 8. Андреев, А.П. Первый совместный стандарт на современные уплотнительные элементы из терморасширенного графита для трубопроводной арматуры / А.П. Андреев, Б.В. Бурмистров, А.К. Матушак и др. // Арматуростроение. 2006. № 6. С. 50-55.

MECHANICAL BEHAVIOUR OF THE COMPOUND SEALING ELEMENTS FROM THERMOEXPANDED GRAPHITE FOR FLANGE CONNECTIONS AT PIPELINES OF LARGE DIAMETER

© 2014 A.V. Zaytsev, V.S. Koksharov, I.V. Predkov

Perm National Research Polytechnical University

On the basis of the developed model of mechanical behavior of compound sealing elements from thermoexpanded graphite for large-size flange connections values of contact pressure are defined, the choice of pressure of sealing ensuring safe functioning of pipeline fittings is reasonable.

Key words: thermoexpanded graphite, sealing element, flange connection, pipeline, sealing, contact pressure

Aleksey Zaitsev, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor at the Department "Mechanics of Composite Materials and Constructions". E-mail: zav@pstu.ru Vitaliy Koksharov, Post-graduate Student Ivan Predkov, Post-graduate Student