

УДК 621.774.3

## АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ РАЗНОСТЕННОСТИ ТРУБ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНУТРЕННЕГО ДАВЛЕНИЯ

**Орлов Г.А.<sup>1</sup>**, д.т.н., профессор кафедры «Обработка металлов давлением» (gorol@mail.ru)

**Котов В.В.<sup>1,2</sup>**, к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением»

**Орлов А.Г.<sup>1</sup>**, магистрант кафедры «Обработка металлов давлением»

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

<sup>2</sup> Представительство компании ESI Group в РФ

(620014, Россия, Екатеринбург, ул. Вайнера, 51Б)

**Аннотация.** Проведено компьютерное моделирование раздачи внутренним давлением разностенных труб из стали, алюминиевого и титанового сплавов. Для моделирования использовался пакет прикладных программ ESI Virtual-Performance 2016.0, реализующий метод конечных элементов. Оценена сходимость и точность полученного решения путем сравнения с известными решениями. Проведен полный факторный вычислительный эксперимент с варьированием факторов: исходной разностенности, тонкостенности и упрочняемости труб. Получены уравнения регрессии внутреннего давления в момент разрушения и конечной разностенности от перечисленных факторов. Установлено, что при раздаче разностенных труб разрыв происходит в области тонкой стенки. Минимальная стенка продолжает утоняться при почти неизменной максимальной толщине стенки, что приводит к росту поперечной разностенности. Сделан вывод о том, что увеличение исходной разностенности труб ускоряет процесс разрушения в области тонкой стенки. Рекомендовано в трубопроводах, проводящих жидкости высокого давления, применять трубы с минимальной исходной разностенностью.

**Ключевые слова:** раздача труб внутренним давлением, разностенность, метод конечных элементов, разрыв труб при раздаче, напряжения разрыва.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-494-495

Изучение условий эксплуатации трубопроводов, работающих под внутренним давлением [1], является актуальным. В настоящей работе представлены результаты компьютерного моделирования процесса раздачи разностенных труб внутренним давлением с помощью пакета прикладных программ ESI Virtual-Performance 2016.0, реализующего метод конечных элементов.

Моделирование провели в соответствии с планом полного факторного вычислительного эксперимента 2<sup>3</sup> (см. таблицу). Упрочняемость рассмотренных сплавов

(алюминиевого АМг2, стали 40ХГН, титанового ОТ4-1) оценили по величине истинного напряжения при степени деформации  $\varepsilon = 0,5$ , которое для рассмотренных сплавов изменяется в соотношении 1:2:1,6 [2]. В качестве функций отклика выбрали конечную относительную разностенность [3] и внутреннее давление в момент разрушения.

В результате обработки данных таблицы получили следующие уравнения регрессии [4] с учетом оценки значимости коэффициентов:

### План и результаты вычислительного эксперимента

#### Plan and results of the computing experiment

Номер опыта	Исходная разностенность ( $X_1$ ), %	Упрочняемость материала ( $X_2$ )	$D/S$ ( $X_3$ )	Конечная разностенность, %	Внутреннее давление, МПа
1	15	2	22	17,05	17,8
2	15	2	11	16,95	34,07
3	15	1	22	16,49	11,62
4	15	1	11	16,97	22,42
5	5	2	22	6,16	19,60
6	5	2	11	6,07	37,24
7	5	1	22	7,30	13,13
8	5	1	11	7,02	25,06

Примечание.  $D$  – диаметр трубы;  $S$  – толщина стенки трубы.

$$Y_1 = 22,62 - 1,14x_1 + 4,56x_2 - 7,08x_3 - 0,10x_1x_2 - 1,40x_2x_3 + 0,31x_1x_3; \quad (1)$$

$$Y_2 = 11,75 + 5,12x_1 - 0,19x_2 + 0,33x_1x_2 - 0,093x_1x_3 + 0,095x_1x_2x_3, \quad (2)$$

где  $Y_1$  – внутреннее давление в момент разрушения, МПа;  $Y_2$  – конечная разностенность, %;  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  – кодированные значения, соответственно, исходной разностенности, упрочняемости материала и относи-

тельной тонкостенности  $D/S$ ;  $x_i = \frac{2(X_i - X_i^{cp})}{X_i^{max} - X_i^{min}}$ .

Уравнение (1) показывает, что внутреннее давление, требуемое для разрушения трубы, растет с увеличением упрочняемости материала и падает с ростом исходной разностенности и относительной тонкостенности  $D/S$ . Второе уравнение демонстрирует, что в процессе нагружения относительная разностенность всегда увеличивается за счет утонения более тонкой стенки, но менее интенсивно для более упрочняющегося материала. Например, получили, что разрушение труб с исходной разностенностью 15 % из рассмотренных сплавов АМг2, 40ХГН и 0Т4-1 происходит при внутренних дав-

лениях 22,4, 34,2 и 24,0 МПа соответственно. В процессе раздачи разностенность увеличилась с 15 до 17 %, рост наружного диаметра не превысил 5 %. Разрыв трубы происходит всегда в области тонкой стенки [5].

**Выводы.** Увеличение исходной разностенности труб ускоряет процесс их разрушения в области тонкой стенки, поэтому в трубопроводах, проводящих жидкости высокого давления, рекомендуется применять трубы с минимальной исходной разностенностью.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гумеров А.Г., Ямалеев К.М. Трещиностойкость металла труб нефтепроводов. – М.: Недра, 2001. – 231 с.
2. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопrotивление пластической деформации металлов и сплавов. – М.: Metallurgy, 1976. – 488 с.
3. Столетний М.Ф., Клемперт Е.Д. Точность труб. – М.: Metallurgy, 1975. – 240 с.
4. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 276 с.
5. Orlov G.A., Kotov V.V., Orlov A.G. Simulation of the Behavior of Pipes with Variable Wall Thickness Under Internal Pressure // Metallurgist. 2017. Vol. 61. No. 1-2. P. 106 – 110.

Поступила 10 ноября 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. Vol. 61. No. 6, pp. 494–495.

## ANALYSIS OF THE WALL THICKNESS VARIATION OF PIPES UNDER INTERNAL PRESSURE

G.A. Orlov<sup>1</sup>, V.V. Kotov<sup>1,2</sup>, A.G. Orlov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ural Federal University named after the first President of Russia  
B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

<sup>2</sup> ESI Group Representative Office in the Russian Federation, Ekaterinburg, Russia

**Abstract.** A computer simulation of the internal pressure expanding was performed for pipes with uneven wall thickness made of steel, aluminum and titanium alloys. For this simulation software tool ESI Virtual-Performance 2016.0 was used that implements the finite element method. The convergence and accuracy of the solution was estimated by comparison with known solutions. A full factorial computational experiment was performed by varying factors: the initial wall thickness variation of pipes,  $D/S$  and parameter of alloys hardening. The regression equations were obtained by the internal pressure at the time of destruction and final wall thickness variation from these factors. It was found that the variation in wall thickness in the distribution pipe rupture occurs in the thin wall. A wall with minimum thickness continues thinning with an almost constant maximum wall thickness, which leads to an increase in the transverse variation in wall thickness. It was concluded that the increase of the initial variation in wall thickness pipe speeds up the process of rupture in the area of thin wall. It is recommended in conduits conducting high-pressure fluid to apply pipes with minimal variation in wall thickness.

**Keywords:** pipe expanding with internal pressure, wall thickness variation, finite element method, expanding pipe fracture, fracture stresses.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-494-495

#### REFERENCES

1. Gumerov A.G., Yamaleev K.M. *Treshchinostoykost' metalla trub nefteprovodov* [Fracture resistance of metal pipes of oil pipelines]. Moscow: Nedra, 2001, 231 p. (In Russ.).
2. Polukhin P.I., Gun G.Ya., Galkin A.M. *Soprotivlenie plasticheskoi deformatsii metallov i splavov* [Resistance to plastic deformation]. Moscow: Metallurgiya, 1976, 488 p. (In Russ.).
3. Stoletnii M.F., Klempert E.D. *Tochnost' trub* [Precision of pipes]. Moscow: Metallurgiya, 1975, 240 p. (In Russ.).
4. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskii Yu.V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh uslovii* [Planning of experiment when searching optimal conditions]. Moscow: Nauka, 1976, 276 p. (In Russ.).
5. Orlov G.A., Kotov V.V., Orlov A.G. Simulation of the behavior of pipes with variable wall thickness under internal pressure. *Metallurgist*. 2017, vol. 61, no. 1-2, pp. 106–110.

#### Information about the authors:

G.A. Orlov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Metal Forming” (grorl@mail.ru)

V.V. Kotov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metal Forming”

A.G. Orlov, MA Student of the Chair “Metal Forming”

Received November 10, 2017