

УДК 621.774

А. Г. Орлов^{1*}, В. В. Котов^{1,2}**

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург

² Представительство компании ESI Group в Российской Федерации, г. Екатеринбург

* *alor110@mail.ru*; ** *kotov@esi-group.com*

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ РАЗНОСТЕННЫХ ТРУБ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА И СТАЛИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНУТРЕННЕГО ДАВЛЕНИЯ

Методом конечных элементов проведено исследование процесса раздачи стальных и титановых разностенных труб под действием внутреннего давления. Описаны закономерности исследованного процесса. В частности, выявлено, что исходная разностенность труб ускоряет процесс разрушения в области тонкой стенки, поэтому в трубопроводах, проводящих жидкости высокого давления, рекомендуется применять трубы с минимальной исходной разностенностью.

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

A. G. Orlov, V. V. Kotov

FRACTURE SIMULATION OF TITAN AND STEEL PIPES WITH WALL THICKNESS VARIATION UNDER INTERNAL PRESSURE

The finite element method was used to study the process of expanding steel and titanium pipes under the internal pressure. The regularities of the investigated process are described. It was found that the initial difference in the pipes wall thickness accelerates the process of destruction in the thin wall region, therefore pipes with a minimum initial difference are recommended in pipelines conducting high-pressure liquids.

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

В различных отраслях промышленности для транспортировки жидкостей и газов применяются трубопроводы. Давление жидкостей и газов в трубах, например, при добыче нефти, может достигать значительных величин, что приводит к упругопластическим деформациям трубных узлов, их поломке и разрушению, поэтому актуальна задача исследования поведения труб под действием внутреннего давления. При изучении этого вопроса обычно пренебрегают разностенностью труб, которая может достигать $\pm (10...15) \%$ [1, 2]. Для титановых труб величины

разнотолщинности могут достигать еще больших значений за счет анизотропных свойств самого материала [3]. Поэтому актуальны исследования поведения разностенных труб из различных материалов под действием внутреннего давления. Ранее авторами были проведены исследования этого вопроса для алюминиевых труб [4]. В настоящей статье представлены результаты компьютерного моделирования процесса раздачи разностенных труб из стали и титанового сплава внутренним давлением с помощью пакета прикладных программ ESI Virtual-Performance 2016.0, реализующего метод конечных элементов. В отличие от технологических расчетов, которые обычно направлены на моделирование производства труб [5], расчет в решении ESI Virtual-Performance направлен на исследование свойств готового изделия.

Исследовали поведение разностенных труб из стали марки 40ХГН (0,4С–Cr–Mn–Ni) и титанового сплава ОТ4-1 с различной относительной тонкостенностью: $D/S = 11 \dots 22$, где D – наружный диаметр, S – толщина стенки трубы. Модель среды приняли упруго-пластической с кривыми упрочнения по данным [6]. Расчеты выполнили в плоской 2D-постановке с применением мембранных элементов, нагружение задавали распределенной по внутреннему контуру нагрузкой, нарастающей прямо пропорционально времени нагружения – 10 кН за 1 мс, что соответствует приращению давления на 3,53 МПа за 1 мс на внутреннюю поверхность трубы диаметром 90 мм. В результате решения определяли изменение разностенности и наружного диаметра трубы в процессе нагружения, место разрыва и эквивалентное напряжение в момент разрыва, а также величину внутреннего давления, необходимого для разрыва трубы.

Для оценки сходимости решения применили разбиение с различным числом конечных элементов: 126 (шаг сетки 5 мм), 410 (шаг сетки 3 мм), 811 (шаг сетки 2 мм), 3647 (шаг сетки 1 мм). Анализ результатов решения показал, что разбиение с шагом сетки менее 3 мм нецелесообразно, так как результаты решения с более мелкой сеткой изменяются не более, чем на 2 %. Кроме того, при выбранном разбиении по толщине стенки размещается не менее трех элементов, что соответствует рекомендациям разработчиков пакета программ.

Адекватность полученных результатов оценена путем сравнения рассчитанных параметров с результатами аналитического решения задачи Ламе [7] деформации трубы под давлением. Результаты расчета методом конечных элементов и по формулам Ламе отличаются не более чем на 8 %, что говорит о вполне достаточной точности решения.

Далее моделировали процесс раздачи разностенных труб. Разностенность труб варьировали в диапазоне $\pm (2,5–15) \%$, причем рассматривали только эксцентричную составляющую, как наиболее существенную при производстве труб.

При моделировании получены следующие основные результаты. Разрыв разностенной трубы всегда происходит в области тонкой стенки (см., например, рис. 1), а внутреннее давление, приводящее к разрушению, растет с увеличением толщины стенки. В процессе раздачи значительную часть времени реализуется упругая деформация, когда параметры процесса изменяются линейно (рис. 2), а пластическая деформация начинается в момент, когда эквивалентное напряжение в месте разрыва достигает предела текучести сплава. Разрыв образца происходит при достижении эквивалентным напряжением величины временного сопротивления сплава.

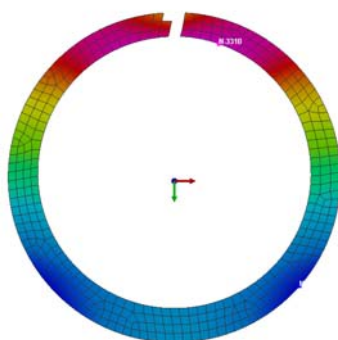


Рис. 1. Картина разрушения разностенной трубы

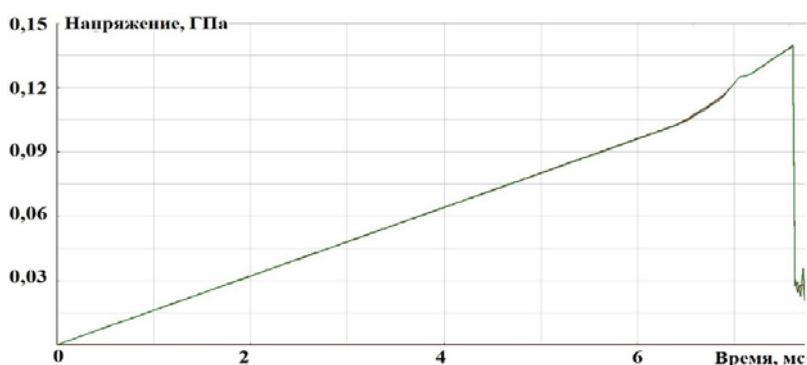


Рис. 2. Изменение эквивалентного напряжения во времени при раздаче титановой трубы с исходной разностенностью 15 %

Моделирование раздачи титановой трубы показало, что пластическая деформация на внутренней поверхности трубы начинается со времени нагружения 6,35 мс (рис. 2), что соответствует внутреннему давлению 22,42 МПа. Утонение стенки составляет не более 5 %, раздача наружного диаметра – не более 3 %.

Моделирование раздачи стальной трубы показало, что пластическая деформация на внутренней поверхности трубы начинается со времени нагружения 7,65 мс, что соответствует внутреннему давлению 22,95 МПа. Утонение стенки также составляет не более 5 %, раздача наружного диаметра – не более 2,5 %.

Установлено также, что при раздаче разностенных труб стенка минимальной толщины продолжает утоняться при почти неизменной ее максимальной толщине, что приводит к росту поперечной разностенности. Утонение стенки приводит к более быстрому разрыву трубы.

Также в процессе раздачи происходит незначительное увеличение наружного диаметра. Процесс увеличения поперечной разностенности можно проиллюстрировать на примере раздачи труб с исходной разностенностью 15 % (табл. 1, 2).

Таблица 1

Результаты раздачи титановой трубы с разностенностью 15 %

Время нагружения, мс	Внутреннее давление, МПа	S_{min} , мм	S_{max} , мм	Разностенность, %	Наружный диаметр, мм
0	0	8,525	11,525	15,000	110,000
6	21,180	8,521	11,522	15,005	110,093
6,2	21,886	8,520	11,521	15,007	110,091
6,4	22,592	8,484	11,520	15,185	110,146
6,6	23,298	8,305	11,517	16,060	110,582
6,7	23,651	8,190	11,515	16,625	110,811
6,8	24,004	8,105	11,508	17,015	110,959

Таблица 2

Результаты моделирования раздачи стальной трубы с разностенностью 15 %

Время нагружения, мс	Внутреннее давление, МПа	S_{min} , мм	S_{max} , мм	Разностенность, %	Наружный диаметр, мм
0	0	8,525	11,525	15,000	110,000
8,9	31,417	8,311	11,516	16,025	111,157
9,1	32,123	8,250	11,506	16,280	111,548
9,3	32,829	8,200	11,499	16,495	111,940
9,5	33,535	8,144	11,493	16,745	112,353
9,6	33,888	8,114	11,489	16,875	112,597
9,7	34,241	8,096	11,486	16,950	112,735

Результаты вычислений размеров поперечного сечения труб с исходной разностенностью 15 % (см. табл. 1,2) показывают, что при развитой пластической деформации разностенность увеличивается с 15 до

17 %. Увеличение наружного диаметра незначительно – не превышает 3 %. Таким образом, увеличение исходной разностенности труб ускоряет процесс разрушения в области тонкой стенки.

Выводы. В статье приведены результаты исследования процесса раздачи стальных и титановых разностенных труб под действием внутреннего давления. Исследование проведено с помощью пакета прикладных программ ESI Virtual-Performance 2016.0, реализующего метод конечных элементов. Установлено, что при раздаче равностенных труб разрыв происходит одновременно в нескольких местах поперечного сечения. 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. Увеличение исходной разностенности труб ускоряет процесс разрушения труб в области тонкой стенки, поэтому в трубопроводах, проводящих жидкости высокого давления, рекомендуется применять трубы с минимальной исходной разностенностью. Сопротивляемость внутреннему давлению выше у стальных труб: разрушение титановых труб произошло при внутреннем давлении 24 МПа, а стальных труб – при давлении 34,2 МПа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование концевой разностенности труб после трубопрокатного агрегата с непрерывным станом / Г. А. Орлов [и др.] // Сталь. 2016. № 8. С. 55–57.
2. Орлов Г. А. Анализ концевой разностенности труб после редуционного стана / Г. А. Орлов, С. Е. Ашканов, А. Г. Орлов // Известия вузов. Черная металлургия. 2017. № 3. С. 250–251.
3. Логинов Ю. Н. Обоснование влияния анизотропии на разнотолщинность холоднокатаных труб из титанового сплава / Ю. Н. Логинов, В. Г. Смирнов, В. В. Котов // Производство проката. 2008. № 2. С. 28–31.
4. Орлов Г. А. Компьютерное моделирование поведения разностенных труб под внутренним давлением / Г. А. Орлов, В. В. Котов, А. Г. Орлов // Металлург. 2017. № 2. С. 18–21.
5. Логинов Ю. Н. Моделирование процесса прессования трубной заготовки из титанового сплава в программе QFORM 2D/3D / Ю. Н. Логинов, В. В. Котов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2010. № 12. С. 36–40.
6. Полухин П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов / П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. Москва : Металлургия, 1976. 488 с.
7. Работнов Ю. Н. Сопротивление материалов / Ю. Н. Работнов. Москва : Физматгиз, 1963. 456 с.