

УДК 669-621.785

А. П. Ништа, кандидат технических наук, доцент;

А. Н. Скворцов, кандидат технических наук, доцент

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРЯЧЕГНУТОГО ОТВОДА ПРОИЗВОДСТВА ООО «НЕФТЕГАЗДЕТАЛЬ»

Рассматривается вопрос конечно-элементного моделирования напряженного состояния горячегнутого отвода при нагружении рабочим, испытательным и предельным внутренним давлением.

Ключевые слова: конечно-элементное моделирование, горячегнутый отвод

В связи с тем, что в настоящее время планируется строительство сверхдальних газонефтепроводов в восточном и западном направлениях от новых месторождений Ямала, Якутии, Восточной Сибири, Дальнего Востока, возникает острая необходимость проектирования магистральных газо- и нефтепроводов с повышенной пропускной способностью. Для повышения пропускной способности на традиционных трубах необходимо увеличение рабочих давлений в трубопроводе (для газопроводов с 7,5 до 20 МПа, для нефтепроводов с 5,5 до 10 МПа) [1].

Одним из элементов газо- и нефтепроводов различного назначения и для различных условий эксплуатации являются отводы. Отводы больших условных диаметров выполняются по технологии горячей гибки, одним из методов локального нагрева в процессе гибки служит индукционный нагрев. На ООО «Нефтегаздеталь» (г. Чайковский, Пермский край) на стане компании *Shaffer* впервые был произведен гиб горячегнутого отвода с использованием индукционного нагрева 1,5 DN ОГ 90°-1420-7,2-0,6. Заготовкой под операцию горячей гибки служила прямошовная труба 1420/32 из стали категории прочности K60 производства ЗАО «Ижорский трубный завод» (ИТЗ) (Санкт-Петербург, Колпино) [2].

Для проведения численных исследований с использованием конечно-элементного комплекса ANSYS требуется определить основные геометрические характеристики (характерные диаметры, длины, толщина стенки отвода в характерных сечениях).

В качестве характеристик материала отвода с учетом проводимого исследования – статическое нагружение отвода внутренним давлением – принимаем с учетом нормативной документации:

- Модуль Юнга – $2,1 \times 10^{11}$ Па;
- коэффициент Пуассона – 0,28;
- предел текучести – $4,9 \times 10^8$ Па;
- предел временного сопротивления R_t^u – $5,9 \times 10^8$ Па;
- материал изотропен;
- билинейная модель упрочнения.

Принимая предел временного сопротивления материала в наиболее тонкой части гнутого отвода равным 570 МПа (в результате гнута с нагревом ТВЧ происходит частичное разупрочнение материала ис-

ходной трубы), по зависимостям из СТО Газпром 2-4.1-273-2008 и СНиП 2.05.06-85 для расчета минимально допустимой толщины стенки можно определить.

Расчетное сопротивление растяжению:

$$R1 = \frac{R_t^u m}{k_1 k_n},$$

где m – коэффициент условий работы, 0,6, трубопроводы категории В; k_1 – коэффициент надежности по материалу, 1,34 (табл. 9 СНиП 2.05.06-85); k_n – коэффициент надежности по назначению, 1,15 (табл. 11 СНиП 2.05.06-85).

$R1 = 229$ МПа.

Минимальная толщина стенки, без учета продольных осевых напряжений:

$$\delta = \frac{npD_n}{2(R1 - np)},$$

где D_n – номинальный диаметр 142 см; n – коэффициент надежности по нагрузке, 1,1 (табл. 13 СНиП 2.05.06-85); p – рабочее давление, 7,2 МПа.

$\delta = 2,53$ см, принимаем 26 мм.

Толщина внутренней стенки отвода при 0 % овальности изогнутой части из условия неизменности диаметральных размеров в процессе горячей гибки может быть вычислена по следующей зависимости:

$$\delta_{\max} = D_n - D_v - \delta,$$

где D_n – наружный диаметр, мм; D_v – внутренний диаметр, мм.

$\delta_{\max} = 38$ мм.

Для определения толщины стенки горячегнутого отвода с учетом замеров геометрии изготовленного отвода при различной овальности предполагаем, что:

– минимальная толщина стенки отвода расположена на наружной изогнутой части отвода, неизменна и равна 26 мм;

– максимальная толщина стенки отвода расположена на внутренней изогнутой части отвода, линейно зависит от овальности, неизменна на изогнутой части при принятой овальности;

– толщина боковой стенки отвода линейно зависит от овальности и по изогнутой части изменяется по нелинейной зависимости при принятой овальности;

– диаметральные размеры овала (минимальные по вертикали, максимальные по горизонтали) определяются по следующим зависимостям:

$$L1 = D_n(1 - \% \text{ овальности}),$$

$$L2 = D_n(1 + \% \text{ овальности});$$

– по длине изогнутой части изменяются от D_n (прямолинейный участок) до $L1$, $L2$, симметричны относительно центрального сечения (сечения расположенного под углом 45° относительно горизонтальной плоскости);

– длина переходной зоны от основного сечения трубы до изогнутой части составляет 200 мм. На рис. 1 представлены чертеж и твердотельная модель для случая с осесимметрией относительно внешней поверхности отвода.

Были построены геометрические модели горячего отводов для двух схем в программном комплексе конечно-элементного моделирования ANSYS v. 12,1 (лицензия ANSYS Academic Research number 607281):

а) с жесткой заделкой торцов отвода (расстояние от торца отвода до торца привариваемой трубы-проставки 4DN);

б) без закрепления концов отвода (соответствует условиям гидроиспытаний), руководствуясь чертежом ТИ16-12.001.000СБ с применением днщ по СТО Газпром 2-4.1-273–2008.

Для проведения моделирования были приняты следующие нагрузки:

– рабочее давление – 7,2 МПа,

– испытательное давление – $1,5 P_{\text{раб}} = 10,8$ МПа.

Предельное давление по формуле 2 СТО Газпром 2-4.1-273–2008.

$$P_{\text{пр}} = \frac{2S_{\text{мир}}R}{D - 2S_{\text{мин}}},$$

где S – толщина стенки; R – допускаемое напряжение (предел временного сопротивления); D – номинальный диаметр.

$$P_{\text{пр}} = 21,75 \text{ МПа.}$$

На рис. 2 представлено изменение максимального эквивалентного напряжения по Мизесу на наружной поверхности в зависимости от овальности для схемы крепления с жесткой заделкой торцов отвода (расстояние от торца отвода до торца привариваемой трубы-проставки 4DN) при рабочем давлении.

На рис. 3 представлено изменение максимального эквивалентного напряжения на наружной поверхности в зависимости от схемы крепления и внутреннего давления при овальности отвода = 9%.

Из представленных результатов видно, что с увеличением овальности значение максимальных эквивалентных напряжений по Мизесу практически линейно возрастает, но их значение ниже расчетного напряжения растяжения (по нормативной документации) и значительно ниже механических характеристик материала: предел текучести, временный предел прочности. При увеличении давления до испытательного (1,5 рабочего давления), максимальные эквивалентные напряжения превышают расчетное напряжение растяжения, но ниже, чем механические характеристики материала при статическом нагружении.

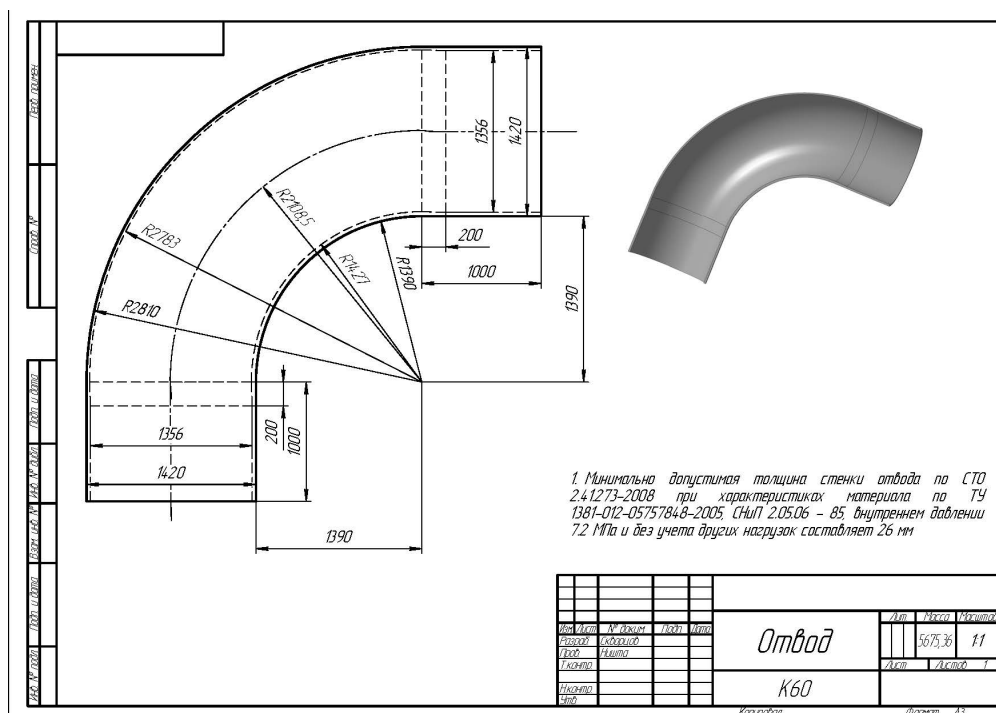


Рис. 1. Размеры горячего отвода с осесимметрией относительно наружной поверхности и 0% овальности

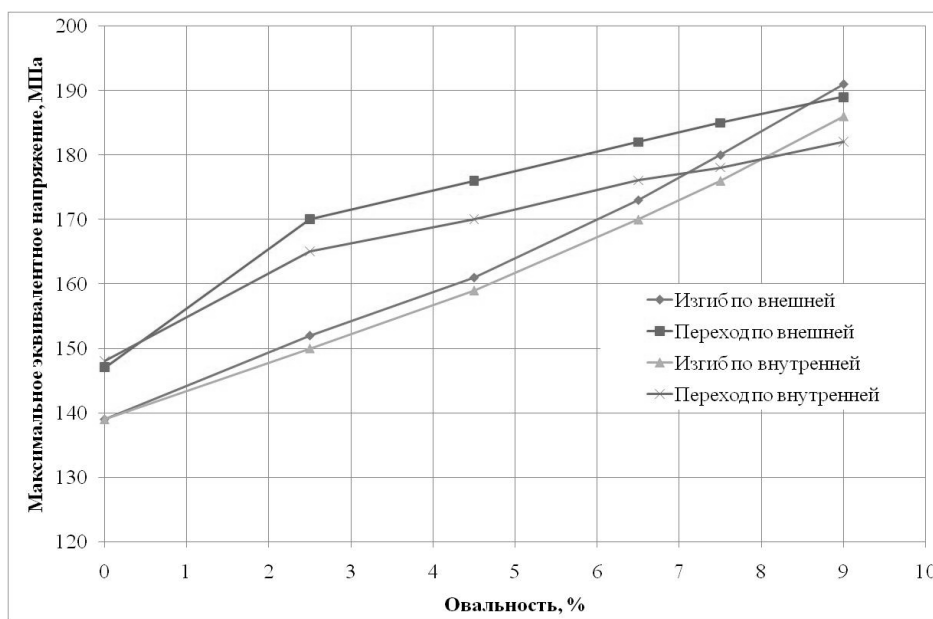


Рис. 2. Изменение максимального эквивалентного напряжения в зависимости от овальности

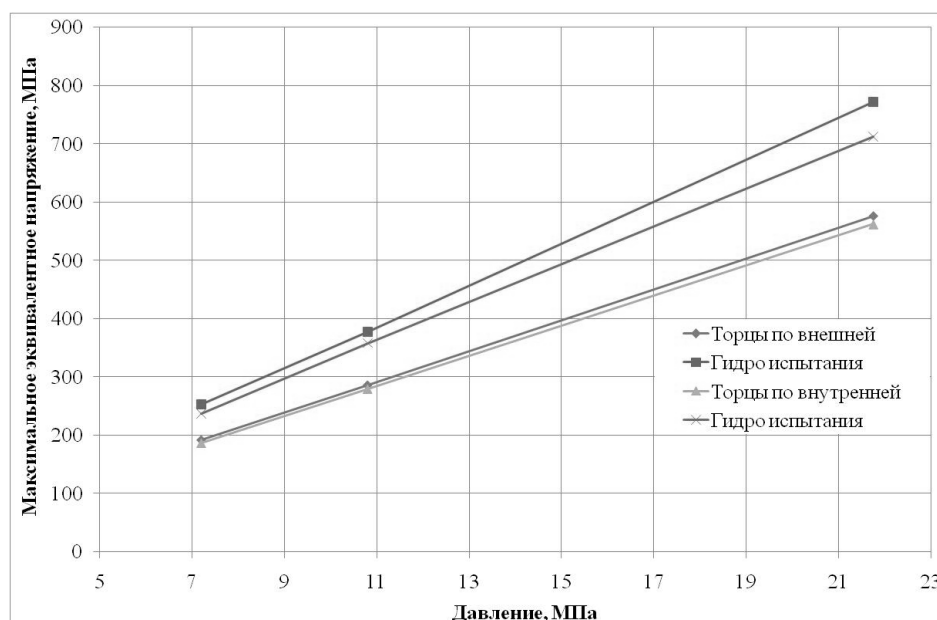


Рис. 3. Изменение максимального эквивалентного напряжения в зависимости от схемы закрепления и внутреннего давления

Нелинейный характер изменения максимальных эквивалентных напряжений при малых значениях овальности связан с различным расположением зоны максимума напряжений. При 0 % овальности наибольшие напряжения по наружной поверхности находятся на боковой поверхности отвода (местоположение сварного шва), при увеличении овальности зона наибольших напряжений находится на наружной изогнутой части отвода.

При сопоставлении результатов моделирования нагружения с осесимметрией по наружной и внутренней поверхности можно заметить, что наиболее высокие напряжения получены в модели с осесимметрией по наружной поверхности.

При сопоставлении результатов моделирования для рассмотренных схем закрепления можно заме-

тить, что более жесткой (более высокие значения эквивалентных напряжений) является схема гидроиспытаний.

Для случая нагружения конструкции с предельным давлением в материале отвода возникают не только упругие (при рабочем и испытательном давлении), но и упругопластические деформации. Более корректным для этого случая будет использование моделирования при пошаговом нагружении внутренним давлением, реализуемом в программном комплексе конечно-элементного анализа ANSYS проведением Transient Structural (ANSYS) анализа.

Можно отметить снижение уровня напряжений за счет перераспределения по сечению, причем для варианта с осесимметрией по внутренней поверхности значение максимальных напряжений не превышает вре-

менного предела прочности материала, т. е. возможны приложения большего внутреннего давления. Поскольку геометрия реального отвода будет находиться между геометриями рассматриваемых моделей, можно ожидать, что реальный отвод выдержит нагружение внутренним давлением более предельного давления, рассчитанного по формуле 2 СТО Газпром 2-4.1-273–2008.

Экспериментально установленное повышение прочности (упрочнение) материала в процессе пластического деформирования для большого количества конструкционных материалов нашло подтверждение при проведении натурных испытаний до разрушения отвода горячего гнутья ОГ 90°-1420-6,5-0,6-1,5-УХЛ из трубы номинальными размерами 1 420 × 32,0 мм по ТУ 1381-003-47966425–2006 производства ЗАО «Ижорский трубный завод» из листового проката ОАО «Северсталь». Отвод выдержал давление 24,1 МПа. Фото разрушенного горячего отвода с нанесенной разметкой разрушения представлено на рис. 4.

Все вышеизложенное позволяет сделать вывод о работоспособности горячего отвода ООО «Нефтегаздеталь» в условиях статического нагружения внутренним давлением (рабочим давлением до 7,2 МПа) и практического соответствия нормативной документации (СТО Газпром 2-4.1-273–2008) по требованию обеспечения необходимой прочности. Полученная овальность (9 %) повышает уровень максимальных эквивалентных напряжений, но их уровень не превышает максимально допустимый по значениям предела текучести и временного предела

прочности. Адекватность результатов моделирования нашла подтверждение при натурных испытаниях горячего отвода внутренним давлением.



Рис. 4. Вид разрушенного горячего отвода под внутренним давлением 24,1 МПа при гидроиспытаниях ООО «Нефтегаздеталь»

Библиографические ссылки

1. Высокопрочные стали нового поколения с феррито-бейнитной структурой / Ю. Д. Морозов, М. Ю. Матросов, С. Ю. Настиг и др. // Металлург. – 2008. – № 8. – С. 39–42.
2. Моделирование механического поведения горячего отводов : итоговый отчет по договору № ТМИМ-1-12/Н от 12.03.2012 г. – Ижевск, 2012. – 101 с.

A. P. Nishta, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk state technical university

A. N. Skvortsov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk state technical university

Finite element modeling of the stressed state of the hot bent branch manufactured at LLC "Neftegazdetal"

The paper considers the question of finite element modeling of the stressed state of the hot bent branch when loaded by operating, testing and ultimate internal pressure.

Keywords: hot bent branch, finite element modeling

Получено: 10.10.13

УДК 621.9.04

С. А. Платов, начальник отдела АСУТП;

ООО «НПЦ «Пружина» (Ижевск)

Ю. В. Турыгин, доктор технических наук, профессор

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

ОБРАБОТКА ТОРЦОВ ПРУЖИН ВАГОННЫХ ТЕЛЕЖЕК МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ

Исследован процесс обработки торцов пружин методом плазменной резки. Определены дефекты, образующиеся в данном процессе, и методы их исключения. Разработана математическая модель управления процессом плазменной резки.

Ключевые слова: робототехнический комплекс, пружина, плазменная резка

Введение

Основным элементом ходовой части вагона является вагонная тележка, представляющая собой поворотное устройство, на которое опирается кузов вагона.

Одним из элементов ее конструкции является пружина (в действительности несколько пружин, составляющих вагонокомплект), которая служит для снижения частоты и ускорений колебаний рамы, возникаю-