

УДК 621.774.7:621.983

Сосенушкин Е. Н.
Яновская Е. А.**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА РАЗДАЧИ
НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ**

Во многих отраслях промышленности, таких как энергетическое машиностроение, автомобилестроение, строительная индустрия, химическая и нефтегазовая промышленность применяются полые переходники с коническими поверхностями и трубные изделия с фланцами. Первая группа деталей используется при монтаже трубопроводов, для возможности перехода с одного диаметра на другой, с целью изменения скорости потока перекачиваемой жидкости или газа. Вторая группа обеспечивает возможность соединения различных веток трубопроводов при изменении их направления. В связи с этим работа, посвященная совершенствованию технологии штамповки указанных изделий, является актуальной.

Традиционными технологическими процессами изготовления этих изделий из труб являются раздача, обжим и их комбинации [1–3]. При раздаче пластические деформации сосредотачиваются лишь в части заготовки – очаге деформации, в то время как остальные части заготовки находятся в упругом или, в крайнем случае, в упруго-пластическом состоянии. При выполнении раздачи необходимо стремиться к увеличению размеров очага деформации, чтобы обеспечить увеличение формоизменения заготовки без проявления нежелательных дефектов: разрушения заготовки в процессе деформирования; потери устойчивости заготовки, приводящей к искажению заданной формы; недопустимого по условиям изготовления изделия изменения толщины заготовки [4].

Целью данной работы является совершенствование технологического процесса раздачи на основе математического моделирования напряженно-деформированного состояния трубной заготовки.

Заготовка, подвергаемая раздаче, представляет собой в общем случае пространственную оболочку, элементы которой совершают пространственные перемещения под действием только одного инструмента – пуансона, контактирующего с ее внутренней поверхностью. Это позволяет рассматривать в качестве граничных условий отсутствие напряжений на свободной поверхности. Поскольку процесс деформирования не стационарен, то решение задачи по определению полей напряжений и деформаций для оценки допустимого формоизменения должно осуществляться в соответствии с теорией течения [5]. Дифференциальные уравнения равновесия и условие пластичности используют в виде преобразованных аналитических функций зависимости механических характеристик от величин деформаций или скоростей деформаций с приближенным учетом не стационарности процесса и граничных условий. Для схематизации процесса силового воздействия примем цилиндрическую систему координат. Основными допущениями являются следующие: материал заготовки жесткопластический, несжимаемый, трансверсально-изотропный, подчиняющийся условию пластического течения Мизеса-Хилла.

Поскольку формообразованию плоского фланца на трубной заготовке предшествует переход (один или несколько) раздачи коническим пуансоном с различными углами конусности φ и в связи с большой номенклатурой трубных переходов, которые имеют конические участки, то, рассматривая осесимметричное напряженное состояние в цилиндрической системе координат, выделим бесконечно малый объем деформируемой оболочки, расположенный на коническом участке пуансона. В общем случае ось конического участка или ось фланца могут располагаться по отношению к оси трубной заготовки под некоторым углом γ . Более распространенным является перпендикулярное по отношению к оси заготовки расположение фланца при $\gamma = \frac{\pi}{2}$ или соосное расположение конического участка на исходной

заготовке при $\gamma = 0$. На рис. 1, а показан бесконечно малый элемент объема конической оболочки с углом наклона оси $\gamma < \frac{\pi}{2}$, одна из граней которого изображена на рис. 1, б. Формоизменение конического участка осуществляется неравномерной раздачей на первом переходе штамповки.

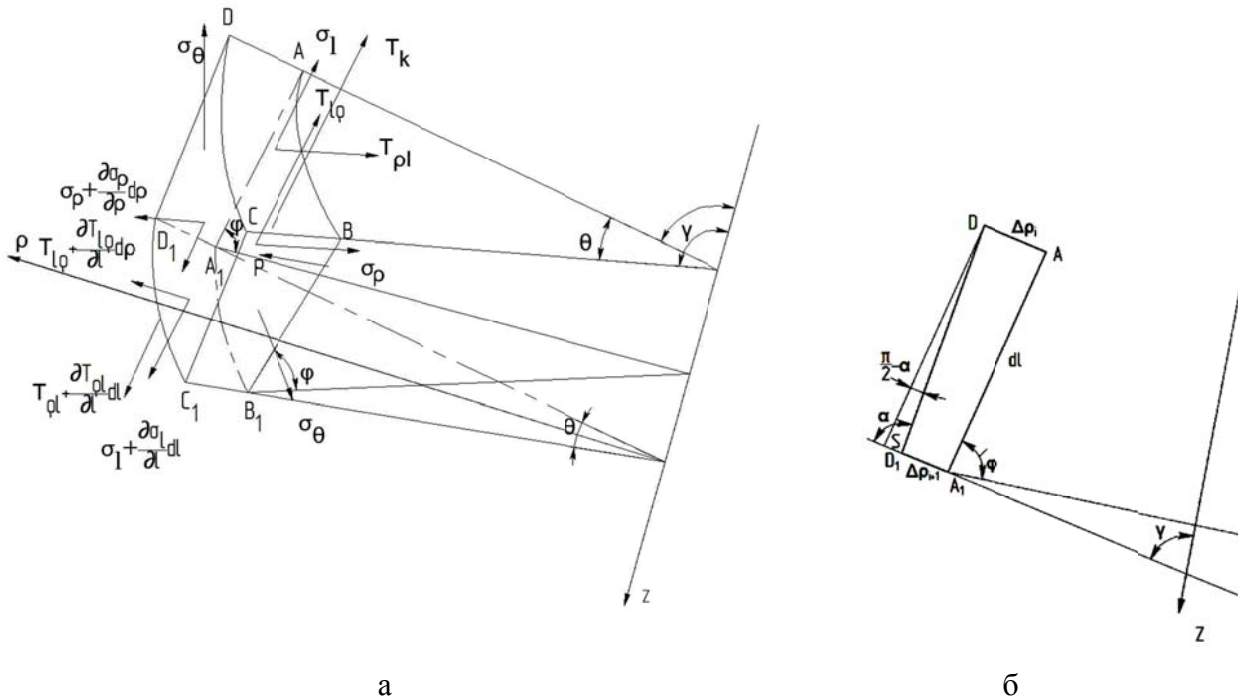


Рис. 1. Напряжения в элементарном объеме конической оболочки с учетом поворота ее оси относительно оси трубной заготовки на заданный угол γ (а), геометрические параметры грани AA_1D_1D выделенного элемента (б)

Проецируя силы, действующие на грани выделенного элемента, на касательную к образующей конической поверхности, получим дифференциальное уравнение равновесия:

$$\begin{aligned}
 & - \rho d\rho \cdot d\theta \cdot \sigma_l + (\rho d\rho - \rho dl \cdot \text{ctg} \alpha + d\rho \cdot dl (\text{ctg} \varphi - \text{ctg} \alpha)) d\theta (\sigma_l + \frac{\partial \sigma_l}{\partial l} dl) - \\
 & - \rho \cdot dld\theta \cdot \beta \cdot \sigma_s \cdot \mu = 0.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

После преобразования и удаления членов высших порядков, ввиду их малости, получим линейное дифференциальное уравнение:

$$\frac{\partial \sigma_l}{\partial l} - (\text{ctg} \alpha - \frac{\Delta \rho}{\rho} (\text{ctg} \varphi - \text{ctg} \alpha)) \sigma_l - \beta \cdot \sigma_s \cdot \mu = 0;
 \tag{2}$$

после преобразований:

$$\frac{d\sigma_l}{dl} - \Phi \sigma_l - F_{TP} = 0,
 \tag{3}$$

где
$$\frac{\cos \alpha \sin \varphi - \Delta \rho (\cos(\varphi - \alpha))}{\rho \sin \alpha \cdot \sin \varphi} = \Phi(\rho, \alpha, \varphi).$$

Интегрируя, получим:

$$\sigma_l = C_l e^{\frac{\cos \alpha \sin \varphi - \Delta \rho (\cos(\varphi - \alpha))}{\rho \sin \alpha \sin \varphi} l} - \frac{\rho \sin \alpha \sin \varphi \cdot \beta \cdot \sigma_s \cdot \mu}{\cos \alpha \sin \varphi - \Delta \rho (\cos(\varphi - \alpha))}. \quad (4)$$

Для определения постоянной интегрирования воспользуемся граничными условиями:
 $\rho = R$; $\sigma_l = 0$; $\Delta \rho = 0$. В этом случае $C_l = R \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \beta \cdot \sigma_s \cdot \mu \cdot e^{-\frac{l}{R \operatorname{tg} \alpha}}$, меридиональные напряжения:

$$\sigma_l = R \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \beta \cdot \sigma_s \cdot \mu \cdot e^{\left(\frac{\cos \alpha \sin \varphi - \Delta \rho (\cos(\varphi - \alpha))}{\rho \sin \alpha \sin \varphi} - \frac{1}{R \operatorname{tg} \alpha}\right) l} - \frac{\rho \sin \alpha \sin \varphi \cdot \beta \cdot \sigma_s \cdot \mu}{\cos \alpha \sin \varphi - \Delta \rho \cos(\varphi - \alpha)}. \quad (5)$$

Второе уравнение равновесия запишем как проекцию сил на нормаль к конической поверхности:

$$(\rho + d\rho) dl \sin \alpha \cdot d\theta \left(\sigma_\rho + \frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} d\rho \right) - \rho dl d\theta \sigma_\rho + \rho dl d\theta \frac{d\rho \sigma_\theta}{\rho} - 2\sigma_\theta \frac{d\theta}{2} d\rho dl = 0. \quad (6)$$

После преобразования и удаления членов высших порядков, ввиду их малости, получим:

$$\frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} = \left(-\frac{1}{\Delta \rho} - \frac{1}{\rho} + \frac{1}{\sin \alpha \cdot \Delta \rho} \right) \sigma_\rho. \quad (7)$$

Разделим переменные и проинтегрируем уравнение:

$$\sigma_\rho = C_\rho \cdot \frac{1}{\rho} \cdot e^{\frac{\rho(\sin \alpha - 1)}{\Delta \rho \sin \alpha}}. \quad (8)$$

При начальных условиях: $\rho = R_0$, $\sigma_\rho = 0$, с учетом $\Delta \rho = \Delta R$, постоянная интегрирования должна иметь значение $C_\rho = 0$; здесь R_0 – радиус заготовки.

Для определения неизвестного окружного напряжения σ_θ привлечем условие пластичности:

$$\sigma_\theta^2 - \sigma_l \sigma_\theta + \sigma_l^2 - \sigma_s^2 = 0. \quad (9)$$

Решим уравнение пластичности (9) относительно σ_θ :

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_l \pm \sqrt{4\sigma_s^2 - 3\sigma_l^2}}{2}. \quad (10)$$

Подставим значения найденных ранее напряжений σ_l :

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2} \sigma_s (\beta \cdot \mu (R \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot e^{f \cdot l} - g) \pm \sqrt{4 - 3\beta^2 \mu^2 (R \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot e^{f \cdot l} - g)^2}). \quad (11)$$

Используя уравнения связи деформаций и напряжений, получим аналитические выражения для определения линейных относительных деформаций:

$$\varepsilon_\rho = -\frac{\sigma_s}{12G'} (3 \cdot \beta \cdot \mu (R \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot e^{f l} - g) \pm \sqrt{4 - 3\beta^2 \cdot \mu^2 (R \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot e^{f l} - g)^2}). \quad (12)$$

$$\varepsilon_\theta = \pm \frac{1}{6G'} \sigma_s \sqrt{4 - 3\beta^2 \cdot \mu^2 (R \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot e^{f l} - g)^2}. \quad (13)$$

$$\varepsilon_l = \frac{\sigma_s}{12G'} (3\beta \cdot \mu (R \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot e^{fl} - g) \mp \sqrt{4 - 3\beta^2 \mu^2 (R \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot e^{fl} - g)^2}). \quad (14)$$

Расчет по полученной математической модели позволил проанализировать величины и характер изменения действующих напряжений при деформировании трубных заготовок из меди М1. На рис. 2 представлено изменение меридионального напряжения σ_l и окружного напряжения σ_θ в зависимости от технологических факторов. Наибольший уровень напряжений отмечается в окружном направлении, причем они являются растягивающими.

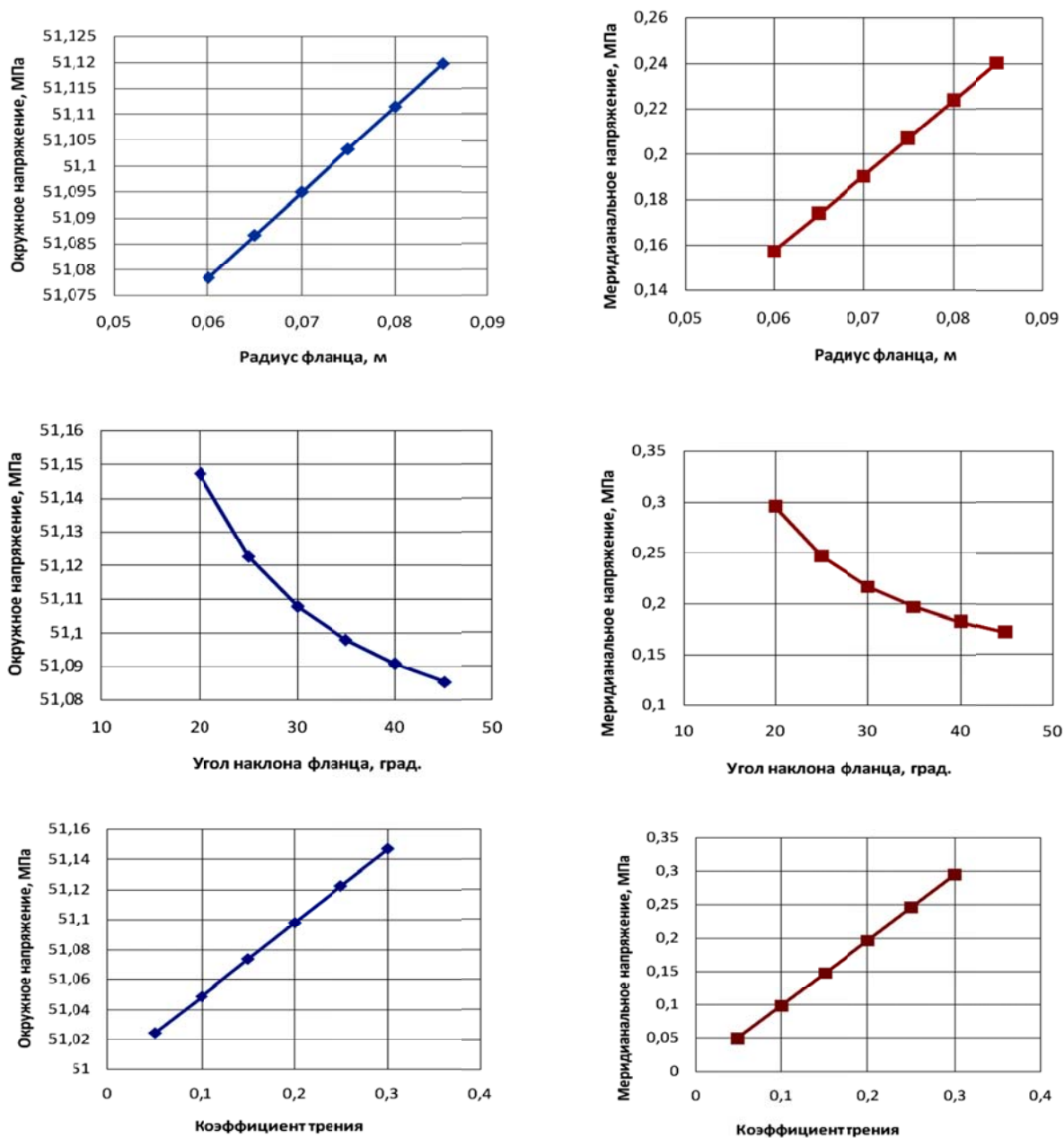


Рис. 2. Изменение меридиональных σ_l и окружных σ_θ напряжений в зависимости от технологических факторов

Универсальность разработанной математической модели для оценки напряженного состояния деталей, обладающих осевой симметрией, в том, что она включает неявную функцию, описывающую поверхность, которую необходимо получить с помощью операции раздачи, в данном случае уравнение усеченного конуса.

На основе анализа полученных соотношений для линейных деформаций вскрыты их взаимосвязи с технологическими параметрами операции неравномерной раздачи.

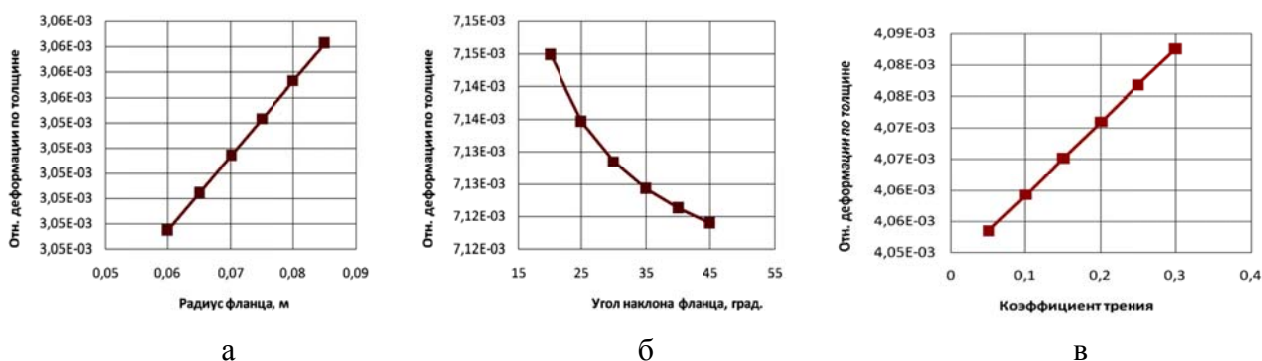


Рис. 3. Зависимость деформаций по толщине от технологических параметров: а – радиуса фланца; б – угла наклона фланца; в – условий трения

Так, например, характер изменения относительных деформаций по толщине конической оболочки показан на рис. 3. Рис. 3, а иллюстрирует линейную зависимость деформаций от радиуса фланца получаемого изделия, причем с увеличением радиуса фланца отмечается рост деформаций по толщине. С увеличением угла наклона фланца по отношению к оси трубной заготовки наблюдается снижение уровня деформаций по толщине, причем характер изменения величин деформаций нелинейный, о чем свидетельствует график на рис. 3, б. Влияние трения на деформации по толщине иллюстрирует график на рис. 3, в. С увеличением коэффициента трения деформации растут по линейному закону. Следует отметить незначительность изменения уровня деформаций по толщине заготовки, который находится в пределах 0,7 %.

Из рис. 4 видно, что с увеличением технологических параметров наблюдается незначительное снижение окружных деформаций, уровень которых довольно высок (60 %).

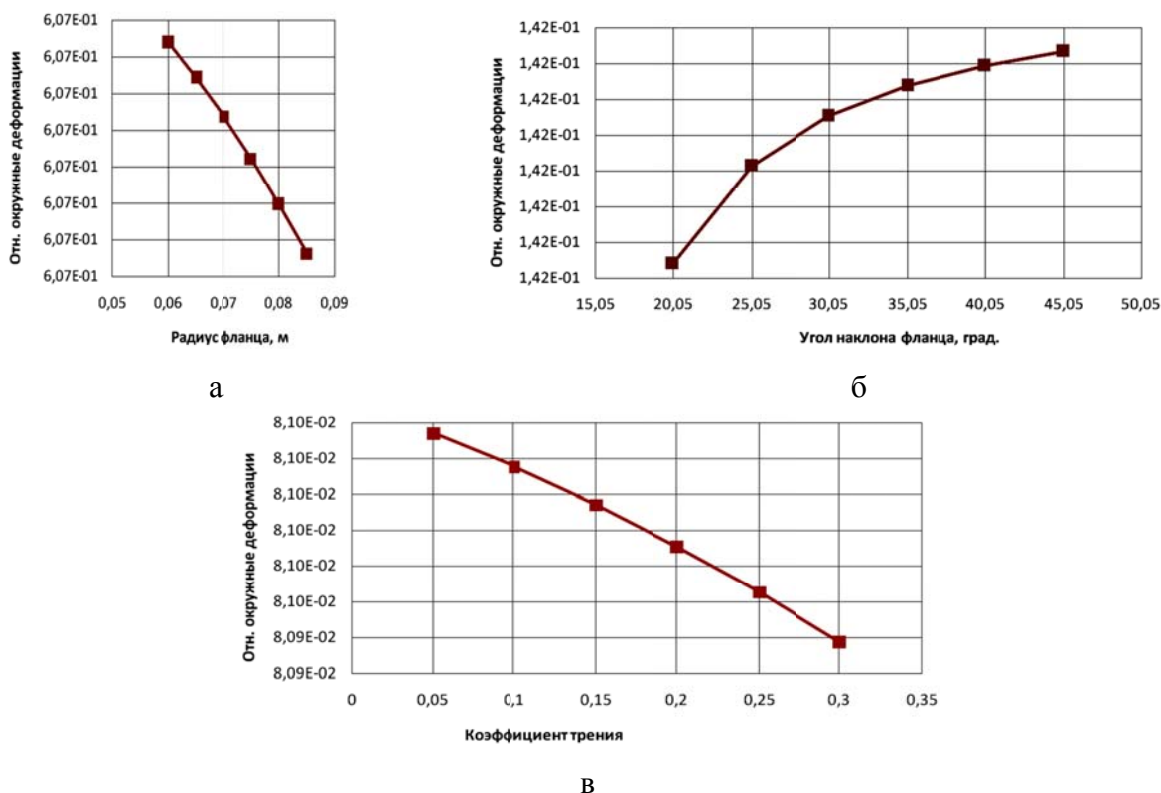


Рис. 4. Характер изменения окружных деформаций в зависимости от: а – радиуса фланца; б – угла наклона фланца; в – условий трения

Влияние технологических параметров на величину меридиональных деформаций показано на рис. 5. Следует отметить, что знак «минус» указывает на уменьшение высоты трубной заготовки при реализации операции неравномерной раздачи, что не противоречит опытным данным.

Устойчивое протекание процессов деформирования во многом зависит от степени приближения текущих технологических параметров к их предельным для данного материала значениям, поэтому предварительно, перед реализацией технологии, следует проводить предпроектные исследования, включающие аналитический расчет или моделирование вариантов технологии, а затем принимать решение по выбору рациональной схемы деформирования [6]. Проведенные экспериментальные исследования по отработке технологических процессов изготовления осесимметричных изделий подтвердили адекватность и достоверность теоретических положений. Неравномерной раздаче в холодном состоянии подвергались трубные заготовки из сплавов двух марок: меди М1 и алюминиевого сплава Д16 (рис. 6, а, б). Геометрические параметры заготовки: внешний диаметр трубы $\varnothing 24$ мм, толщина стенки 1,5 мм, при этом относительная толщина $\frac{S}{D} = 0,0625$. Другой группой изделий являются конические сопла для водометных установок из стали 12Х18Н10Т (рис. 6, в) [2]. Эксперименты проводились на испытательной машине EU-100 силой 1000 кН. В качестве технологической смазки применялась смесь графита и индустриального масла, коэффициент трения в этих условиях принимался в интервале $\mu = 0,1 \dots 0,15$.

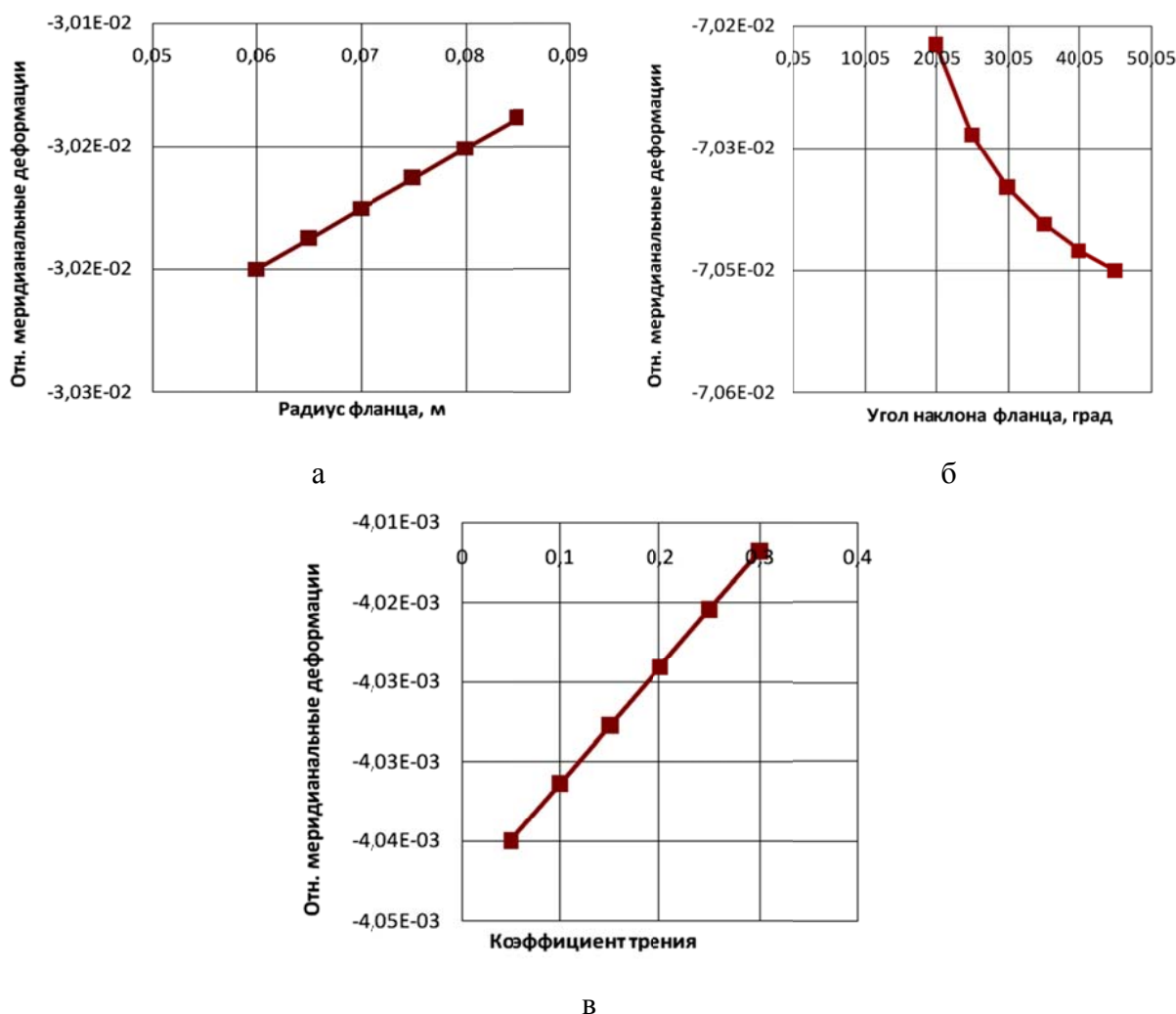


Рис. 5. Зависимость меридиональных деформаций от технологических параметров: а – радиуса фланца; б – угла наклона фланца; в – условий трения



Рис. 6. Трубные переходники с наклонным фланцем (а – медь М1; б – сплав Д16), полученные неравномерной раздачей, и сопла конические (в) без фланца из стали 12Х18Н10Т

ВЫВОДЫ

Установлены взаимосвязи величин и характера изменения радиальных и окружных напряжений с условиями трения на контактных поверхностях, с углами наклона фланца и образующей конического участка, с другими геометрическими характеристиками, в том числе с изменением толщины стенки трубной заготовки, что дает возможность уточнить результаты расчетов напряжений по сравнению с имеющимися методиками.

На основе установленных взаимосвязей разработана математическая модель операции раздачи, которая позволяет анализировать напряженное и деформированное состояние трубной заготовки в процессе пластического формоизменения. Особенностью разработанной математической модели раздачи коническим пуансоном является учет возможности поворота осей конического участка и исходной трубной заготовки на заданный угол γ , что расширяет область применения модели и делает ее достаточно универсальной.

Проведенные эксперименты показали, что при раздаче напряжения не превышают предельных для указанных материалов значений и каких-либо дефектов при формоизменении не образуется.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артес А. Э. Технологические возможности горячей объемной штамповки деталей арматуры из центробежнолитых чугуновых труб / А. Э. Артес, Е. Н. Сосенушкин, В. В. Третьюхин // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением*. – 2008. – № 10. – С. 30–32.
2. Сосенушкин Е. Н. Ресурсосберегающие технологии изготовления деталей трубопроводной арматуры / Е. Н. Сосенушкин // *Технология машиностроения*. – 2010. – № 3. – С. 14–16.
3. Трубные заготовки: технологический аспект раздачи и обжима / Сосенушкин Е. Н., Артес А. Э., Яновская Е. А., Хачатрян Д. В. // *Вестник МГТУ «Станкин»*. – 2010. – № 4 (12). – С. 36–41.
4. Штамповка конических и сферических деталей из трубных заготовок / Сосенушкин Е. Н., Яновская Е. А., Третьякова Е. И., Сосенушкин А. Е. // *Заготовительные производства в машиностроении: научно-технический и производственный журнал*. – 2010. – № 11. – С. 18–21.
5. Неперишин Р. И. Идеальные процессы обжима и раздачи толстостенных трубных заготовок / Р. И. Неперишин // *Кузнечно-штамповочное производство*. – 2010. – № 6. – С. 23–29.
6. Экспериментальные исследования формоизменения стальных труб / Е. Н. Сосенушкин, В. Н. Климов, Е. А. Яновская, Е. А. Кутьишкина // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением: научно-технический и производственный журнал*. – 2010. – № 6. – С. 39–43.

Сосенушкин Е. Н. – д-р техн. наук, зав. кафедрой МГТУ «СТАНКИН»;

Яновская Е. А. – доцент МГТУ «СТАНКИН».

МГТУ «СТАНКИН» – Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва, Россия.

E-mail: sen@stankin.ru; elena_yanovskaya@bk.ru

Статья поступила в редакцию 24.01.2012 г.