

УДК 669

СОПОСТАВЛЕНИЕ СПОСОБОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБ В КОРРОЗИОННОСТОЙКОМ ИСПОЛНЕНИИ

© 2017 А.А. Богатов, Д.Р. Салихьянов, В.А. Сидоров

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

Статья поступила в редакцию 30.05.2017

Статья посвящена сопоставлению способов изготовления биметаллических труб в коррозионно-стойком исполнении. Показано, что в настоящее время нефтяная промышленность России остро нуждается в коррозионно-стойких трубах, при этом наиболее эффективной является разработка технологии производства биметаллических труб. Рациональным способом их изготовления является сборка и раздача на оправке или гидравлическая раздача внутренней трубы из коррозионно-стойкой стали до образования прочного соединения с внешней трубой. Показано, что технологические факторы, особенно способ раздачи, оказывают влияние на параметры формоизменения и остаточные напряжения биметаллической трубы. На основе сравнительного анализа сделаны выводы о наиболее рациональном способе раздачи.

Ключевые слова: биметаллические трубы, насосно-компрессорные трубы, гидравлическая раздача, раздача на оправке, конечно-элементное моделирование.

АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Одним из основных элементов внутрискважинного оборудования (ВСО) нефтедобывающих и нагнетательных скважин являются насосно-компрессорные трубы (НКТ). В системе нефтяной промышленности РФ насчитывается более 150 тыс. нефтедобывающих скважин со средней глубиной около 2700 м. Общий эксплуатационный фонд НКТ нефтяной промышленности РФ составляет 3300 – 3400 тыс. тонн.

В процессе эксплуатации насосно-компрессорные трубы подвергаются механическим нагрузкам: от действия веса труб и добываемого продукта, давления флюида в насосно-компрессорной колонне и др., а также коррозионному воздействию агрессивных элементов (H_2S , CO_2), содержащихся во флюиде. Под воздействием механических нагрузок, действие которых усиливается коррозионными процессами, насосно-компрессорные трубы изнашиваются, теряют эксплуатационные свойства и выводятся из эксплуатационного фонда [1 - 7]. По данным Министерства промышленности РФ производство насосно-компрессорных труб составило около 500 тыс. т. в год, из которых 400 тыс. т. ежегодно направляются нефтяным компаниям.

Богатов Александр Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Обработка металлов давлением». E-mail: omd@urfu.ru
Салихьянов Денис Ринатович, кандидат технических наук, младший научный сотрудник научной лаборатории «Обработка металлов давлением».

E-mail: salenhall@gmail.com

Сидоров Владислав Андреевич, аспирант кафедры «Обработка металлов давлением».

E-mail: vladislav-sidorov-1993@mail.ru

На укомплектование новых нефтедобывающих скважин (5,5 – 6,0 тыс. скважин в год), при объемах эксплуатационного бурения до 20 млн. м/год, используется около 150 тыс. т. насосно-компрессорных труб. Остальные 250 тыс. т. НКТ направляются на замену изношенных. Затраты на восстановление работоспособности одной нефтедобывающей скважины после аварии составляют около 380 тыс. руб.

Как за рубежом, так и в России активно ведется освоение новых коррозионно-стойких марок сталей и их оптимальной структуры в зависимости от условий эксплуатации НКТ [8 - 9]. Несмотря на то, что при использовании коррозионно-стойких марок сталей скорость коррозии НКТ снижается в десятки раз, их применение не всегда оказывается экономически оправданным ввиду их высокой стоимости. Кроме того, к недостаткам следует отнести их восприимчивость к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением.

СПОСОБЫ ПРОИЗВОДСТВА ТРУБ В КОРРОЗИОННОСТОЙКОМ ИСПОЛНЕНИИ

Поиск эффективных путей снижения затрат при добыче нефти и повышения долговечности НКТ является важной проблемой. Наиболее перспективным решением является производство и применение биметаллических труб. Применение биметаллических насосно-компрессорных труб взамен монометаллических позволяет использовать в качестве основы углеродистую сталь, отвечающую требованиям конструкционной прочности, а в качестве плакирующего слоя – коррозионно-стойкую сталь. В настоящее время получение биметаллических труб воз-

можно несколькими путями: формовка и продольная сварка биметаллического листа, как это выполняют на предприятии Berg-Lay GmbH [10] для производства сварных нефтегазопроводных труб; производство бесшовных биметаллических труб способом раздачи – раздачей на оправке, опробованный кафедрой «ОМД» УрФУ совместно с ООО НПО «ТЭМП» и ПАО «Татнефть» [11, 12] и гидравлической раздачей, реализуемой на предприятиях Kuroki T&P Co, AWS Schäfer Technologie GmbH и ряде других [13 - 15]. При производстве биметаллических труб раздачей внутренней трубы соединение образуется за счет упругой посадки наружной и внутренней труб. Основной проблемой при этом является обеспечение герметичности межслойного зазора, создание прочного соединения и получение заданных размеров труб [14].

С целью разработки альтернативных вариантов технологии производства биметаллических труб на кафедре «Обработка металлов давлением» Уральского федерального университета под руководством доктора экономических наук Н.А. Богатова разработаны новые технические решения и предложена новая конструкция биметаллической трубы, включающая промежуточную неметаллическую прослойку (герметик) между внешней и внутренней трубой с высокими адгезионными свойствами (рис. 1). Использование герметика позволило повысить прочность сцепления и обеспечить герметичность межтрубного зазора, что подтверждается технологическими испытаниями биметаллических патрубков [11].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ПЛАН ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Конечные свойства и качество биметаллических насосно-компрессорных труб определяются способом их изготовления – гидравлической раздачей и раздачей на жесткой оправке и режимами раздачи – диаметром оправки или величиной давления. Кроме того, гидравлическая раздача биметаллических труб возможна разными способами – без фиксации или с фиксацией концов внутренней и наружной трубы с

помощью развальцовки и сварки, с применением или без применения наружного инструмента – матрицы. В зависимости от способа и режима раздачи, трубы будут отличаться деформированным состоянием слоев, прочностью их сцепления и распределением остаточных напряжений по толщине стенки.

С целью определения рационального способа раздачи труб, в работе поставлена задача теоретического исследования и анализа параметров напряженно-деформированного состояния биметаллических труб при разных вариантах раздачи. Анализ процесса их изготовления осуществлен при компьютерном моделировании процесса раздачи в программе Deform-2D. В качестве модели среды была выбрана упругопластическая модель, в качестве материалов – углеродистая сталь AISI-1045 из библиотеки материалов Deform-2D для внешней трубы, нержавеющая сталь AISI-304 – для внутренней трубы. Размеры внешней трубы приняты равными 73,6X4,8 мм с внутренним диаметром 64 мм. Начальный внутренний диаметр $d_{вн}^н$ внутренней трубы варьировался в диапазоне в диапазоне 54 – 58 мм с постоянным значением толщины стенки, равным 1,5 мм. В качестве факторов были заданы: 1) способ раздачи – раздача на оправке (рис. 2, а) или гидравлическая раздача (рис. 2, б) с фиксацией (осевая скорость $v_z = 0$ на концах труб) либо без фиксации (осевая скорость v_z не ограничивается) концов труб; 2) исходный межтрубный зазор на сторону δ , который принимался равным 1,5 – 3,5 мм (за счет применения внутренних труб с разным значением внутреннего диаметра); 3) степень совместной деформации ϵ , определяемая конечным внутренним диаметром $d_{вн}^к$ (при раздаче на оправке, степень деформации задается диаметром оправки, при гидравлической раздаче – давлением жидкости p по внутренней поверхности внутренней трубы). План эксперимента для разных способов раздачи на оправке и гидравлической раздачи приведен в таблице. Целевые функции в вычислительном эксперименте определены величинами утонения стенки трубы, удлинения лейнера и напряжениями на межслойной границе.

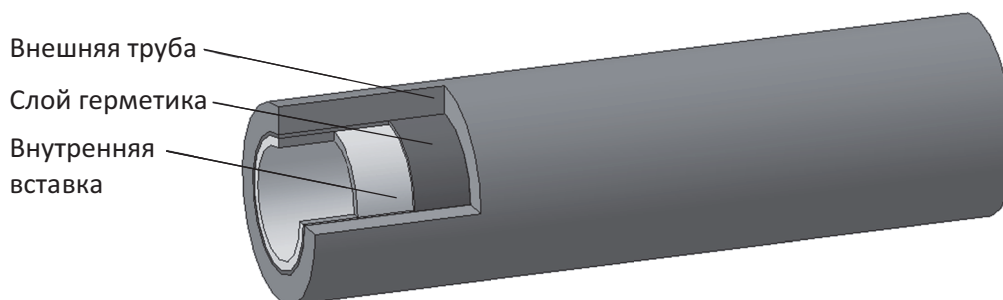


Рис. 1. Конструкция биметаллических труб

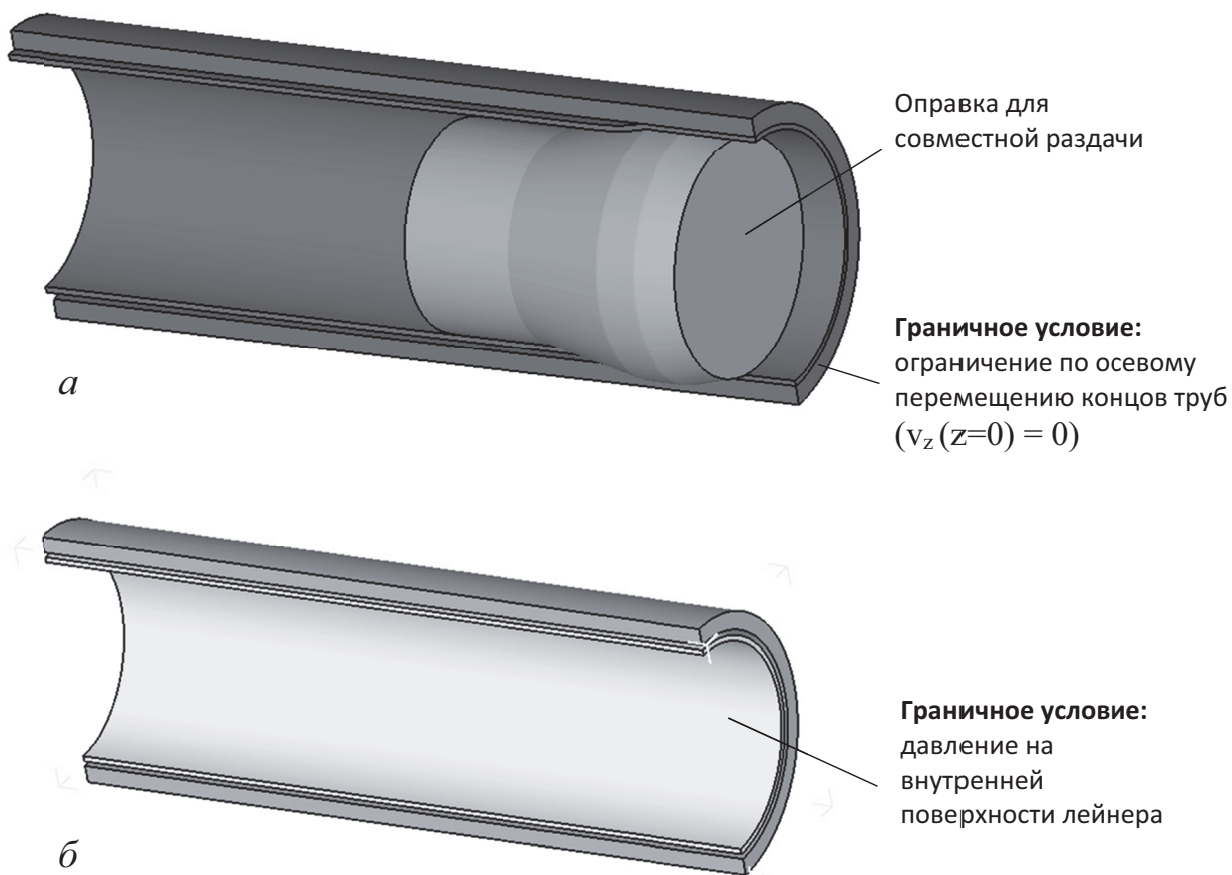


Рис. 2. Варианты раздачи

Таблица. План эксперимента

№ п/п	$d_{вн}^H$, мм	δ , мм	$d_{вн}^K$, мм	ε , %
1	58	1,5	61,5	6,03
2	57	2	61,5	7,89
3	56	2,5	61,5	9,82
4	55	3	61,5	11,82
5	54	3,5	61,5	13,89
6	58	1,5	62	6,90
7	57	2	62	8,77
8	56	2,5	62	10,71
9	55	3	62	12,73
10	54	3,5	62	14,81
11	58	1,5	62,5	7,76
12	57	2	62,5	9,65
13	56	2,5	62,5	11,61
14	55	3	62,5	13,64
15	54	3,5	62,5	15,74

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ И НАПРЯЖЕННОГО
СОСТОЯНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБ
ПРИ РАЗНЫХ СПОСОБАХ
И РЕЖИМАХ РАЗДАЧИ**

Для сопоставления закономерностей формоизменения в зависимости от способа и режимов раздачи сравнивалось относитель-

ное удлинение лейнера ($\Delta L/L_0$ – разница между начальной L_0 и конечной L_1 длиной) и относительное утонение толщины стенки ($\Delta S/S_0$, где ΔS – разница между начальной S_0 и конечной S_1 толщиной стенки). Результаты моделирования представлены на рис. 3, а и б, соответственно. Из анализа графиков видна существенная разница в величине относительного удлинения (рис. 3, а) и утонения толщины стенки (рис. 3, б) трубы

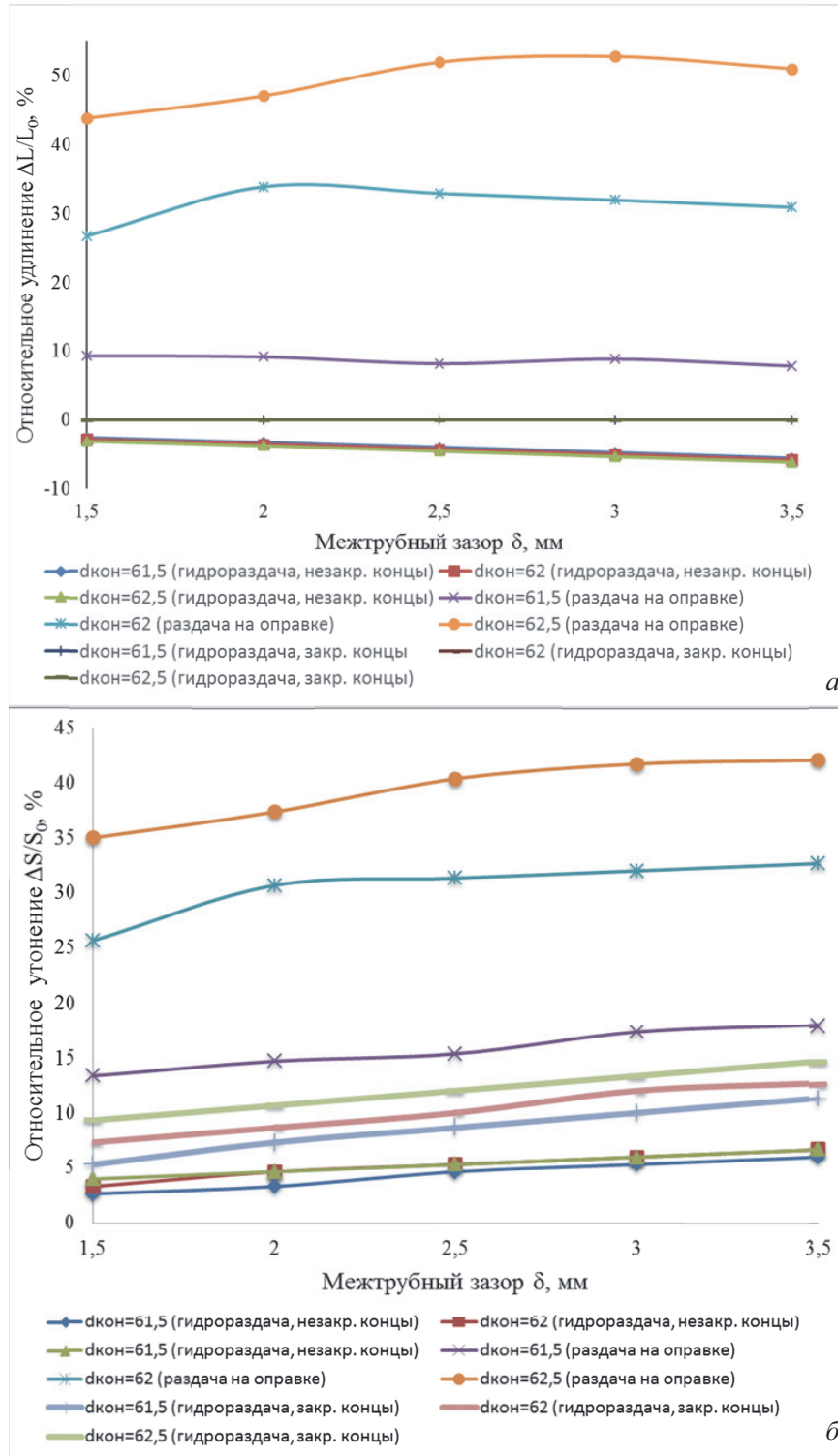


Рис. 3. Зависимость относительного удлинения (а) и относительного утонения толщины стенки (б) лейнера от межтрубного зазора на сторону δ , конечного внутреннего диаметра $d_{\text{вн}}^{\text{к}}$ и способа раздачи

в зависимости от способа раздачи. При раздаче на оправке величины относительного утонения превышают значения относительного утонения при гидравлической раздаче без фиксации концов труб в 3 – 10 раз (рис. 3, б). Вследствие этого, при раздаче на оправке наблюдается удлинение лейнера (от 7 до 52 %), в то время как при гидравлической раздаче без фиксации концов труб наблюдается наоборот – укорочение лейнера (от 2 до 6 %) (рис. 3, а). При гидравлической раздаче с фиксацией концов труб удлинение труб отсутствует, величина относительного утонения превышает в 2 раза значения относительного утонения при гидравлической раздаче без фиксации концов.

Распределения остаточных напряжений по толщине стенки лейнера и внешней трубы в зависимости от способа раздачи представлены на рис. 4. В качестве примера на рис. 4, а представлено распределение радиальных (σ_{rr}) и тангенциальных ($\sigma_{\phi\phi}$) остаточных напряжений в составной трубе при гидравлической раздаче без фиксации концов труб, рис. 4, б – с фиксацией концов труб, на рис. 4, в – при раздаче на оправке для первой задачи (см. табл.). Во всех случаях (при гидравлической раздаче без фиксации концов труб (а), с фиксацией концов труб (б) и раздаче труб на оправке (в)) по всей толщине стенки внутренней трубы сохраняются сжимающие остаточные тангенциальные напряжения, во внешней трубе сжимающие остаточные тангенциальные напряжения наблюдаются только во внутренних слоях.

После снятия нагрузки в зоне контакта слоев биметаллической трубы действуют остаточные контактные давления p^* : при раздаче на оправке значение давления составляет порядка 2,6 МПа, при гидравлической раздаче без фиксации концов труб – 5,75 МПа, с фиксацией – 5,86 МПа. Отсюда следует вывод, что при изготовлении биметаллических труб гидравлической раздачей, прочность сцепления выше.

ВЫВОДЫ

При сопоставлении способов раздачи для изготовления лейнированных труб было отмечено следующее.

1. При раздаче на оправке наблюдается более интенсивное утонение толщины стенки внутренней трубы, чем при гидравлической раздаче. В зависимости от обжатия внутренней трубы, относительное утонение может достигать значения от 13,33 до 42 %, т.е. для внутренней трубы с исходной толщиной стенки 1,5 мм,

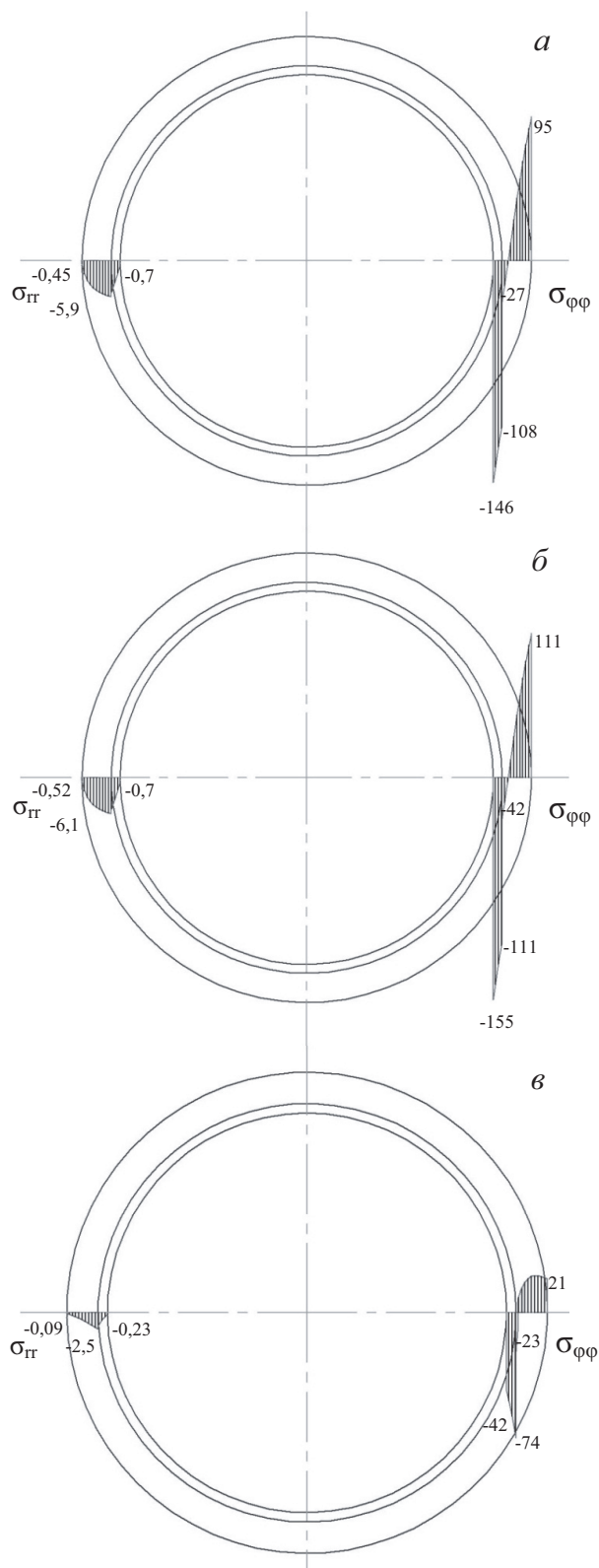


Рис. 4. Распределение остаточных радиальных и тангенциальных напряжений при гидравлической раздаче без фиксации концов труб (а), с фиксацией концов (б) и при раздаче на оправке (в)

конечная толщина стенки может находиться в пределах от 0,87 до 1,3 мм. При изготовлении биметаллических труб гидравлической раздачей без фиксации концов труб, значения отно-

15. Wang X., Li P., Wang R. Study on hydro-forming pipe // International Journal of Machine Tools & technology of manufacturing bimetallic CRA-lined Manufacture. 2005. № 45. P. 373 – 378.

**COMPARISON OF METHODS FOR BIMETALLIC
PIPES MANUFACTURING IN CORROSION-RESISTANT DESIGN**

© 2017 A.A. Bogatov, D.R. Salikhyanov, V.A. Sidorov

Ural Federal University named after the first President of Russia BN. Yeltsin, Yekaterinburg

The article is devoted to comparison of methods of manufacturing bimetallic pipes in corrosion-resistant design. It is shown that at present the oil industry in Russia badly needs corrosion-resistant pipes, while the most effective is the development of a technology for the production of bimetallic pipes. A rational way of their manufacture is assembling and distribution on the mandrel or hydraulic distribution of the inner tube from corrosion-resistant steel to the formation of a strong connection with the outer pipe. It is shown that technological factors, especially the distribution method, influence the parameters of forming and the residual stresses of the bimetallic pipe. Based on the comparative analysis, conclusions are drawn about the most rational way of distribution.

Keywords: bimetallic pipes, tubing, hydraulic distribution, distribution on a mandrel, finite element simulation.

*Alexander Bogatov, Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head at the Processing of Metals by Pressure Department.
E-mail: omd@urfu.ru*

*Denis Salikhyanov, Candidate of Technics, Associate
Research Fellow of Scientific Laboratory «Processing of
Metals by Pressure». E-mail: salenhall@gmail.com*

*Vladislav Sidorov, Post-Graduate Student of the Processing
of Metals by Pressure Department.
E-mail: vladislav-sidorov-1993@mail.ru*