

УДК 620.179.152.1:5.39.319

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ ТРУБАХ

**Коликов А.П.<sup>1</sup>**, д.т.н., профессор кафедры технологии и оборудования  
трубного производства (apkolikov@mail.ru)

**Лелётко А.С.<sup>1</sup>**, магистрант кафедры технологии и оборудования трубного производства

**Матвеев Д.Б.<sup>1</sup>**, к.т.н., старший научный сотрудник кафедры технологии  
и оборудования трубного производства

**Кулютин С.А.<sup>2</sup>**, директор по качеству и технологии

**Кадильников С.В.<sup>1</sup>**, аспирант кафедры технологии и оборудования трубного производства

<sup>1</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

<sup>2</sup>Московский трубный завод ОАО «ФИЛИТ»

(121087, Россия, Москва, ул. Баркляя, 6)

**Аннотация.** В последние годы вопросу распределения остаточных напряжений в сварных трубах уделяется большое внимание, поскольку как в процессе изготовления, так и при эксплуатации изделий, изготовленных из труб, одной из причин разрушения сварных труб являются остаточные напряжения. На каждой операции технологического процесса производства в сварных трубах отмечается появление остаточных напряжений  $\sigma_{ост}$ , поскольку процессы пластического формоизменения происходят в холодном состоянии. В связи с этим, важно проведение экспериментальных исследований, которые позволят установить характер распределения остаточных напряжений в формуемой трубной заготовке с применением современных неразрушающих методов. В данной работе приведены результаты экспериментального исследования по измерению остаточных напряжений в различных точках по окружности наружной поверхности труб малого и большого диаметров портативным рентгеновским дифрактометром ДРП-РИКОР, работа которого основана на методе рентгеновской дифрактометрии.

**Ключевые слова:** сварные трубы, пластическое формоизменение, гибка, распруживание, остаточные напряжения, метод рентгеновской дифрактометрии.

В настоящее время объем мирового потребления трубной продукции приближается к 100 млн т, из которых более 60 % занимают сварные трубы: трубы большого диаметра (ТБД) диаметром 530 мм и более, трубы средних (114 – 529 мм) и малых (менее 114 мм) диаметров [1, 2].

За последние 10 – 15 лет ведущими зарубежными фирмами Германии, Японии, Австрии, Италии созданы трубоэлектросварочные агрегаты (ТЭСА) для производства труб диаметром до 630 мм с толщиной стенки до 22 мм из металла категории прочности до X80 с использованием высокочастотной сварки, которые применяются в нефтегазовой промышленности [1, 2], а также в специальных видах техники [3].

В последние десятилетия динамично развивается трубопроводный транспорт: в 2005 г. его протяженность достигла 2 млн км, в том числе протяженность нефтепроводов приближается к 500 тыс. км. По этой сети ежегодно прокачивается более 2 млрд т нефти и нефтепродуктов. Имеются многочисленные проекты строительства новых трубопроводов в мире для транспортировки нефти и газа, в том числе из России в Западную Европу и Китай [1, 2, 4].

В зарубежной и отечественной практике для строительства сухопутных и подводных морских участков трубопроводов преимущественно применяются сварные одношовные трубы диаметром 1220 и 1420 мм толщиной стенки от 7,0 до 48 мм, производство которых

осуществляется с применением формовки листовой заготовки на прессах по схемам UOE и JUOE (JCO) или формовкой в вальцах [2] с последующими операциями сварки и калибровки (рис. 1). На каждой операции технологического процесса производства в сварных трубах отмечается появление остаточных напряжений  $\sigma_{ост}$ , поскольку процессы пластического формоизменения происходят в холодном состоянии.

Следует заметить, что в последние годы вопросу распределения остаточных напряжений в сварных трубах уделяется большое внимание, поскольку как в процессе изготовления, так и при эксплуатации изделий, изготовленных из труб, одной из причин их разрушения, по мнению авторов работ [2, 4], являются именно остаточные напряжения. Поэтому, например, в сварных трубах малого диаметра, которые применяются в энергетике, величина  $\sigma_{ост}$  регламентируется на стадии их изготовления (ТУ 14-3Р-19702001. Технические условия. Трубы бесшовные из коррозионностойких марок стали с повышенным качеством поверхности. Первоуральский новотрубный завод).

С позиций механики дан анализ напряженно-деформированного состояния формуемой листовой заготовки, из которого следует, что после снятия нагрузки происходит ее распруживание и на наружной поверхности появляются сжимающие остаточные напряжения  $-\sigma_\theta$ , а на внутренней поверхности – растягивающие напряжения  $+\sigma_\theta$  (рис. 2) [5, 6]

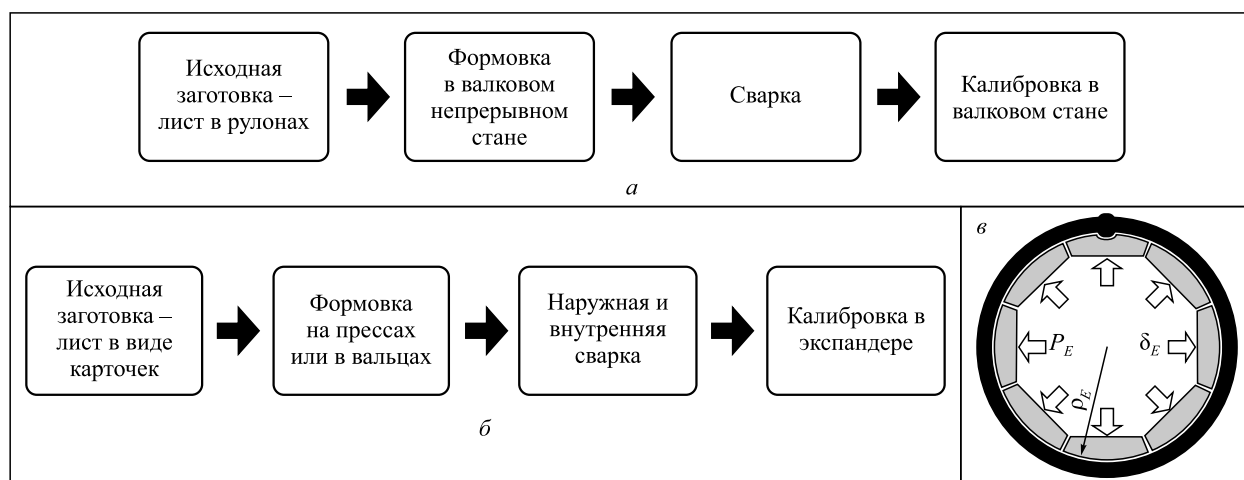


Рис. 1. Технологические операции производства сварных труб малого, среднего (а) и большого (б) диаметров и схема калибровки ТБД в механическом экспандере (в)

Однако, согласно аналитическому анализу, выполненному Ю.М. Матвеевым [7] при формовке трубной заготовки, было показано, что под действием усилия  $P$  металл претерпевает упругопластическую деформацию: наружные слои металла при гибке испытывают растяжение, а внутренние – сжатие (см. рис. 2).

В связи с этим, важно проведение экспериментальных исследований, которые позволят установить характер распределения остаточных напряжений в формируемой трубной заготовке с применением современных неразрушающих методов [8].

Известно, что процесс формовки листовой заготовки сопровождается неоднородностью распределения напряжений и дифференциальное уравнение равновесия

элемента, выделенного в очаге деформации (см. рис. 2), имеет вид [5]

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r}, \quad (1)$$

а уравнение пластичности по гипотезе максимальных касательных напряжений для плоского деформированного состояния можно записать в виде

$$\sigma_p - \sigma_\theta = \pm \sigma_s, \quad (2)$$

где знак плюс относится к зоне растяжения в тангенциальном направлении, знак минус – в зоне сжатия.

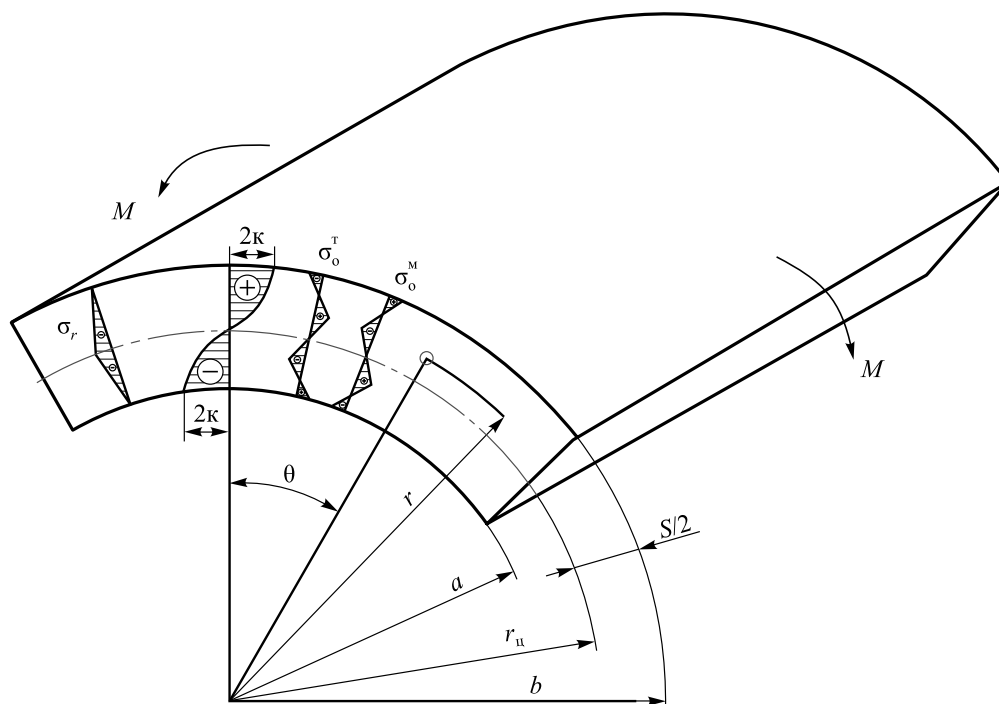


Рис. 2. Схема формовки листовой заготовки и эпюры распределения напряжений по толщине листа

При совместном решении этих уравнений и с учетом граничных условий:  $\sigma_r = 0$  при  $r = a$  и  $r = b$ ;  $\sigma_z = 0,5(\sigma_r + \sigma_\theta)$  А.Д. Томленовым [5] получены формулы распределения напряжений по толщине листа для чистого изгиба (см. рис. 2):

для зоны растяжения в наружном слое $\sigma_\theta - \sigma_r = 2k = \sigma_s$		
$\sigma_r = \sigma_s \ln \frac{r}{b}$	$\sigma_\theta = \sigma_s \left( 1 + \ln \frac{r}{b} \right)$	$\sigma_z = \sigma_s \left( 0,5 + \ln \frac{r}{b} \right)$
для зоны сжатия $\sigma_\theta - \sigma_r = -2k = -\sigma_s$		
$\sigma_r = -\sigma_s \ln \frac{r}{a}$	$\sigma_\theta = -\sigma_s \left( 1 + \ln \frac{r}{a} \right)$	$\sigma_z = -\sigma_s \left( 0,5 + \ln \frac{r}{a} \right)$

При снятии внешней нагрузки происходит распружинивание листовой заготовки под действием остаточных напряжений, эпюра которых показана на рис. 2, и согласно расчетам А.Д. Томленова [5], который рассматривал деформацию бруса при упругопластическом изгибе, в наружном слое растягивающие напряжения  $+\sigma_\theta$  сменились на сжимающие  $-\sigma_\theta^T$ . Однако еще в 1965 г. Ю.М. Матвеев [7] представил реальную эпюру остаточных напряжений в листовой заготовке после снятия нагрузки, согласно которой в наружном слое действуют растягивающие напряжения  $+\sigma_\theta^M$  (рис. 3).

Рассмотрим растяжение стандартного образца и кривую  $\sigma - \varepsilon$  реального металла листовой заготовки, формовка которого происходит в области упругопластической деформации в т. В (см. рис. 3). Величину  $\sigma_s$  упрочнения деформируемой заготовки со степенью деформации  $\varepsilon_{\text{пл}}$  в т. В можно определить по графику кривой второго порядка по уравнению [9]

$$\sigma_s = \frac{\sigma_B}{(1 - \psi_{\text{пл}})^2} (1 - 2\psi_{\text{пл}} + \psi). \quad (3)$$

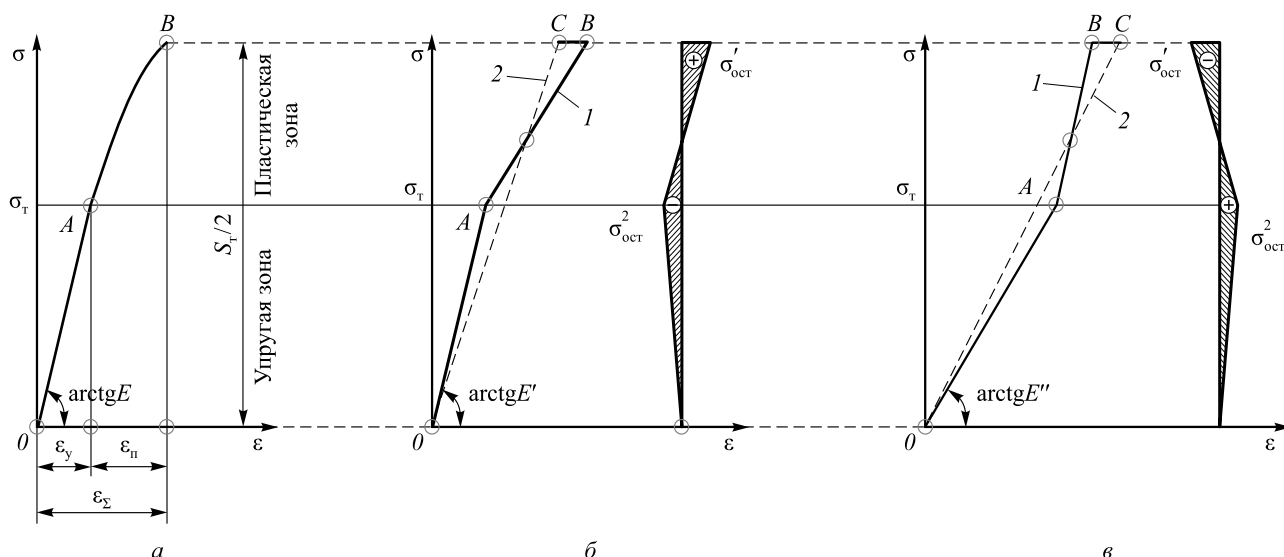


Рис. 3. Эпюры распределения напряжений при растяжении образца: а – реального металла  $\sigma - \varepsilon$ ; б – в модели, принятой в работе [7]; в – в модели, принятой в работе [5]; 1 – нагрузка (линия OAB) и 2 – разгрузка (линия OC)

Различие в принятых моделях упругопластической деформации Ю.М. Матвеева и А.Д. Томленова приводит к разной схеме распределения остаточных напряжений по толщине сформованной листовой заготовки, поскольку как в одном, так и в другом случае величина остаточных напряжений определяется как разность между растягивающими напряжениями в т. В и сжимающими напряжениями в т. С. Из этого следует, что в модели Ю.М. Матвеева  $\sigma_\theta^0 = +\sigma_B - (-\sigma_C) > 0$ , поскольку  $|\sigma_B| > |\sigma_C|$ , а в модели А.Д. Томленова  $\sigma_\theta^0 = +\sigma_B - (-\sigma_C) < 0$ , поскольку  $|\sigma_B| < |\sigma_C|$ , что хорошо показано на рис. 3.

Авторами проведены экспериментальные исследования по измерению остаточных напряжений в различных точках по окружности наружной поверхности труб портативным рентгеновским дифрактометром ДРП-РИКОР, работа которого основана на методе рентгеновской дифрактометрии [8].

На рис. 4 представлены общий вид прибора ДРП-РИКОР и схема измерения остаточных напряжений на образцах, взятых от труб после сварки, калибровки и термической обработки. Подготовка образцов для проведения экспериментальных исследований включала травление кислотой (50 % HCl и 10 % FeCl<sub>3</sub>) и промывку слабым раствором пищевой соды.

Результаты измерения остаточных напряжений на поверхности сварных труб из нержавеющей стали типоразмера  $D_T \times S_T = 40 \times 1,2$  мм после сварки током высокой частоты (ТВЧ) и после калибровочного стана в зоне сварного шва и на определенном расстоянии от сварного шва представлены в табл. 1, а труб размером  $D_T \times S_T = 52 \times 2,5$  мм из стали 09Г2С после сварки ТВЧ и после калибровки и термической обработки – в табл. 2.

Анализ экспериментальных данных (см. табл. 1, 2) убедительно показывает, что в сварных трубах малого типоразмера при формовке, сварке и калибровке на наружной поверхности наблюдаются растягивающие на-

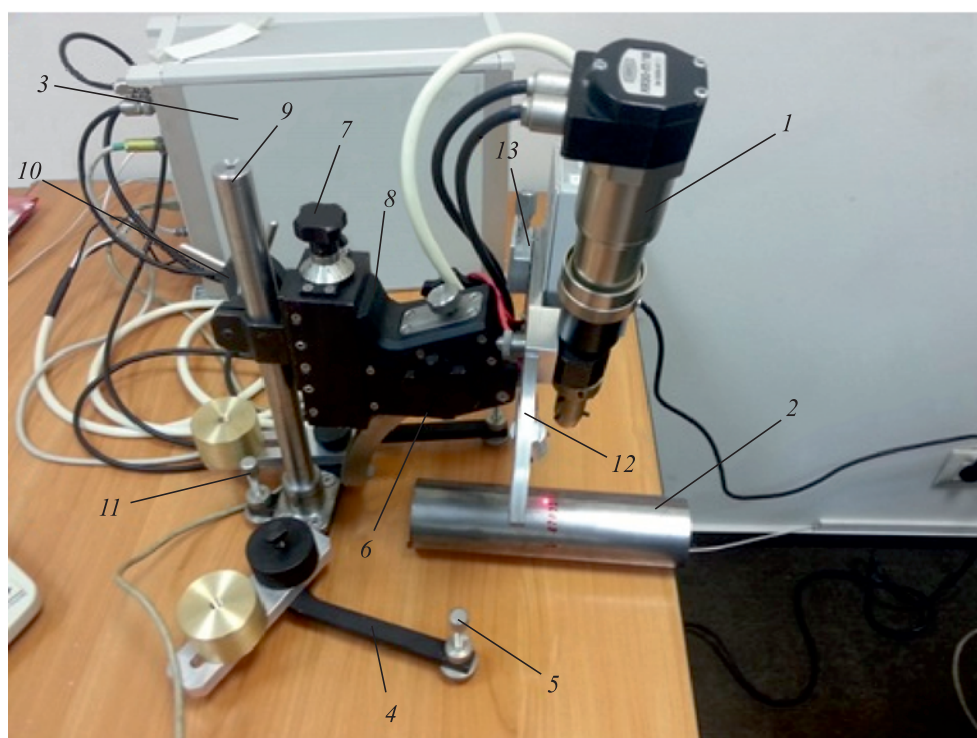


Рис. 4. Общий вид прибора ДРП-РИКОР и подготовленный темплет трубы для измерения остаточных напряжений:  
 1 – рентгеновская трубка в кожухе; 2 – образец; 3 – блок питания и электроники; 4 – скоба-основание; 5 – регулировочные винты скобы-основания; 6 – рукоятка наклона несущей дуги; 7 – рукоятка точной регулировки высоты; 8 – кронштейн; 9 – мини-штатив; 10 – рукоятка грубой регулировки высоты (рукоятка вертикального перемещения вдоль мини-штатива); 11 – регулировочные винты скобы-основания; 12 – несущая дуга; 13 – детектор

Таблица 1

### Результаты измерения остаточных напряжений на трубах типоразмера $D_t \times S_t = 40 \times 1,2$ мм

Точки измерения – расстояние до сварного шва	Остаточные напряжения, МПа	
	труба после сварки	труба после калибровочного стана
Т. 0 – в сварном шве	+145	+205
Т. 1 – 10 мм от сварного шва	+70	+145
Т. 2 – при повороте на 90° от сварного шва	+210	+130
Т. 3 – при повороте на 180° от сварного шва	–	+130

Таблица 2

### Результаты измерения остаточных напряжений на трубах типоразмера $D_t \times S_t = 52 \times 2,5$ мм

Точки измерения – расстояние до сварного шва	Остаточные напряжения, МПа	
	труба после калибровочного стана	труба после термической обработки
Т. 1 – в сварном шве	+245	– 30
Т. 2 – 5 мм от сварного шва	+140	+30
Т. 3 – 15 мм от сварного шва	+70	+35
Т. 4 – 20 мм от сварного шва	+55	+35
Т. 5 – 25 мм от сварного шва	+55	+30
Т. 6 – 30 мм от сварного шва	+90	+30
Т. 7 – при повороте на 90° от сварного шва	+75	+30

пряжения, тогда как в исходном холоднокатаном листе из нержавеющей стали по ширине отмечены только сжимающие напряжения в интервале  $\sigma_{\text{ост}}^{\text{лист}} = 150 - 120$  МПа и стали 09Г2С –  $\sigma_{\text{ост}}^{\text{лист}} = 30 - 60$  МПа.

Из труб большого диаметра, изготовленных по различным схемам формовки из стали 10Г2ФБЮ категории прочности К60, были взяты фрагменты – образцы и проведены замеры по этой же методике [8] (табл. 3). Следует отметить, что трубы диаметром 1420 мм были изготовлены по схеме JOE, а трубы диаметром 1020 мм – по схеме UOE [2], однако все они прошли операцию калибрования-раздачи по диаметру на механическом экспандере. Особенность процесса калибрования ТБД заключается в том, что сварной шов располагается в вертикальной плоскости так, что он не должен подвергаться деформации, как показано на рис. 1, в. Таким образом, в сварном шве сохраняются остаточные напряжения, полученные при сварке, а на остальных участках трубы растягивающие напряжения  $+\sigma_{\text{ост}}$  частично снимаются и переходят в сжимающие  $-\sigma_{\text{ост}}$  в результате экспандирования.

На втором этапе были проведены экспериментальные исследования осевых и тангенциальных остаточных напряжений в середине и на конце прямошовной трубы большого диаметра (табл. 4).

Данные исследования подтвердили наличие растягивающих остаточных напряжений, которые могут быть опасными и вызывать появление различных дефектов, способствующих усталостному разрушению

металла при последующей эксплуатации трубопровода [4]. При этом, как отмечает Л.И. Эфрон [4], при длительной эксплуатации трубопроводов возможно разрушение даже при напряжениях, не превышающих максимально допустимые в результате действия всех нагрузок на поверхность труб, включая сварочные напряжения и остаточные напряжения, возникающие в процессе изготовления труб [4].

**Выводы.** Полученные результаты убедительно подтверждают вывод Ю.М. Матвеева о наличии растягивающих напряжений на поверхности сварных труб, которые появляются как в сварном шве, так и в металле сформованной листовой заготовки как в тангенциальном, так и в осевом направлениях. Такие исследования актуальны для прогнозирования разрушения нефтегазопроводных ТБД в процессе эксплуатации, а также при выборе труб малого диаметра для применения в специальных отраслях техники.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Стасовский Ю.Н., Сокурено В.П., Степаненко А.Н., Угрюмов Ю.Д. Уровень техники и технологии в мире для производства трубной продукции: современное состояние, перспективы развития: Сб. науч. статей. – Днепропетровск: Акцент ПП, 2014. С. 195 – 203.
2. Осадчий В.Я., Коликов А.П. Производство и качество стальных труб. – М.: Изд-во МГУПИ, 2012. – 370 с.
3. Шимов Г.В., Серебряков Ал.В., Серебряков Ан.В. Апробация способа, совмещающего электроконтактную термообработку и

Таблица 3

Экспериментальные значения тангенциальных остаточных напряжений на образцах труб большого диаметра из стали 10Г2ФБЮ класса прочности К60

Типоразмер трубы $D_t \times S_t = 1420 \times 12$ мм		Типоразмер трубы $D_t \times S_t = 1020 \times 26$ мм	
расстояние до сварного шва, мм	остаточные напряжения, МПа	расстояние до сварного шва, мм	остаточные напряжения, МПа
Центр сварного шва	+220	Центр сварного шва	+150
Т. 2 на расстоянии 24 мм	–40	Т. 2	+45
Т. 4 – 37 мм	–70	Т. 4	– 90
Т. 5 – 50 мм	–70	Т. 5	– 100
Т. 6 – 79 мм	–75	–	–

Таблица 4

Распределение остаточных напряжений в поперечных сечениях прямошовной сварной трубы большого диаметра

Точки измерения $\sigma_{\text{ост}}$	Остаточные напряжения в поперечном сечении ТБД, МПа			
	в середине трубы		на конце трубы	
	осевые	тангенциальные	осевые	тангенциальные
Т. 1 – в районе сварного шва	+12	–5	+50	–25
Т. 2 – при повороте на 90° от сварного шва	+80	+40	–20	–25
Т. 3 – при повороте на 180° от сварного шва	+5	–60	+14	–5



правку теплообменных труб парогенераторов: Сб. докл. науч.-техн. конгресса «ОМД 2014. Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии» Ч. 2. – М.: ООО «Белый ветер», 2014. С. 9 – 17.

4. Эфрон Л.Д. Металловедение в «большой металлургии». Трубные стали. – М.: Металлургия, 2012. – 696 с.
5. Томленов А.Д. Теория пластического деформирования металлов. – М.: Металлургия, 1972. – 408 с.
6. Шинкин В.Н. Механика сплошных сред для металлургов. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2014. – 628 с.
7. Матвеев Ю.М., Каширин Н.А. Распределение остаточных напряжений в заготовке для производства труб большого диамет-

ра: Сб. статей ВНИТИ. Вып. 5. – М.: Металлургия, 1965. С. 6 – 10.

8. Коликов А.П., Котелкин А.В., Звонков А.Д. и др. Применение метода рентгеновской дифрактометрии для исследования остаточных напряжений в деталях при холодной обработке давлением // Черные металлы. 2013. № 3. С. 20 – 24.
9. Ильин Л.Н. Основы учения о пластической деформации. – М.: Машиностроение, 1980. – 150 с.

© 2014 г. Коликов А.П., Лелётко А.С., Матвеев Д.Б., Кулютин С.А., Кадильников С.В.  
Поступила 23 октября 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA – FERROUS METALLURGY. 2014. Vol. 57. No. 11, pp. 48–53.

## INVESTIGATION OF RESIDUAL STRESSES IN WELDED PIPES

**Kolikov A.P.<sup>1</sup>**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Technology and equipment for pipe production”

(apkolikov@mail.ru)

**Leletko A.S.<sup>1</sup>**, MA student of the Chair “Technology and equipment for pipe production”

**Matveev D.B.<sup>1</sup>**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Chair “Technology and equipment for pipe production”

**Kulyutin S.A.<sup>2</sup>**, Director of quality and technology

**Kadil'nikov S.V.<sup>1</sup>**, Graduate student of the Chair “Technology and equipment for pipe production”

<sup>1</sup> National University of Science and Technology «MISiS» (4, Leninskii pr., Moscow, 119049, Russia)

<sup>2</sup> Moscow Pipe Factory JSC «FILIT» (6, Barclay Str., Moscow, 121087, Russia)

**Abstract.** The problem of residual stress distribution in welded tubes is paid a lot attention in recent years because of it is the one of the fracture reason of welded tubes both in production process and in service of products made of them. Since the plastic forming process is performed in cold condition the residual stress appearance ( $\sigma_{rs}$ ) in welded tubes is found in the every operation of production process. In this regard it is important to carry out the experimental investigations that make possible the determination of the residual stress nature in the formable workpiece using modern nondestructive methods. This article describes the experimental results of residual stress measurement in the different points around circumference of the outer surface of both small-diameter and large-diameter tubes with the application of portable X-ray diffractometer “DRP-RIKOR” based on X-ray diffraction method.

**Keywords:** welded pipes, plastic form change, bending, spring-back effect, residual stresses, X-ray diffraction method.

## REFERENCES

1. Stasovskii Yu.N., Sokurenko V.P., Stepanenko A.N., Ugryumov Yu.D. *Uroven' tekhniki i tekhnologii v mire dlya proizvodstva trubnoi produktsii: sovremennoe sostoyanie, perspektivy razvitiya*

[The level of equipment and technology in the world for the production of tubular products: current state and prospects of development]. In: *Sb. nauchnykh statei* [Compilation of scientific articles]. Dnepropetrovsk. Aktsent PP, 2014, pp.195–203. (In Russ.).

2. Osadchii V.Ya., Kolikov A.P. *Proizvodstvo i kachestvo stal'nykh trub* [Production and quality of steel pipes]. Moscow: Izd-vo MGUPI, 2012. 370 p. (In Russ.).
3. Shimov G.V., Serebryakov A.I.V., Serebryakov A.N.V. *Aprobatsiya sposoba sovmeshchayushchego elektrokontaktuyu termoo obrabotku i pravku teploobmennyykh trub parogeneratorov* [Testing method combines the electric-contact heat treatment and straightening of heat exchanger tubes of steam generators]. *Sb. dokladov n/t kongressa «OMD 2014. Fundamental'nye problemy. Innovatsionnye materialy i tekhnologii» Ch. 2.* [Compilation reports s/t congress “OMD 2014. Fundamental problems. Innovative materials and technology” Part. 2]. Moscow: ООО «Belyi veter», 2014, pp. 9–17. (In Russ.).
4. Efron L.D. *Metallovedenie v «bol'shoi metallurgii». Trubnye stali* [Metallurgical science in the “big steel”. Tubular steel]. Moscow: Metallurgiya 2012. 696 p. (In Russ.).
5. Tomlenov A.D. *Teoriya plasticheskogo deformirovaniya metallov* [Theory of plastic deformation of metals]. Moscow: Metallurgiya. 1972, 408 p. (In Russ.).
6. Shinkin V.N. *Mekhanika sploshnykh sred dlya metallurgov* [Continuum mechanics for metallurgists]. Moscow: Izd. Dom MISiS, 2014. 628 p. (In Russ.).
7. Matveev Yu.M., Kashirin N.A. *Raspredelenie ostatochnykh napryazhenii v zagotovke dlya proizvodstva trub bol'shogo diametra* [The distribution of residual stresses in the workpiece for the production of large diameter pipes]. In: *Sb. statei VNITI* [Compilation of articles VNITI]. Issue 5. Moscow: Metallurgiya 1965, pp. 6–10. (In Russ.).
8. Kolikov A.P., Kotelkin A.V., Zvonkov A.D. etc. The application of method of X-ray diffraction for the investigation of residual stresses in detail by cold working pressure. *Chernye metally*. 2013, no. 3, pp. 20–24. (In Russ.).
9. Il'in L.N. *Osnovy ucheniya o plasticheskoi deformatsii* [Fundamentals of plastic deformation]. Moscow: Mashinostroenie, 1980. 150 p. (In Russ.).

Received October 23, 2014