

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕЙ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОСОБОТОНКОСТЕННЫХ ТРУБАХ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ВОЛОЧЕНИЯ

Г.В. Шимов¹, Ан.В. Серебряков², Ал.В. Серебряков¹, М.А. Розенбаум¹

¹ Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург,

² ОАО «Первоуральский новотрубный завод», г. Первоуральск

Обоснована задача исследования полей остаточных напряжений в особотонкостенных трубах из нержавеющей стали после волочения. Представлены результаты моделирования процесса финишного короткооправочного волочения и волочения раздачей на конической оправке холоднокатаных труб из стали ЭИ847 для оболочек ТВЭЛ атомных реакторов. Проведен сравнительный анализ точности размеров труб, полученных на производстве и при моделировании. Различия в значениях диаметров и толщин стенок труб получены в пределах допусков в соответствии с ТУ 14-159-293-2005, что свидетельствует о правильности математической модели. Получены распределения остаточных напряжений по стенке труб для случая волочения на короткой оправке и случая волочения раздачей. Показана целесообразность применения волочения раздачей на финишной стадии производства труб из коррозионностойких нержавеющей сталей. Рассмотрена одна из технологических особенностей волочения раздачей, заключающаяся в том, что в процессе протягивания оправки через трубу напряжения в очаге деформации в сумме с усилием волочения обеспечивают небольшое пластическое растяжение трубы после схода с оправки. Этот факт гарантирует прямолинейность изготовленной таким методом трубы. Показано, что волочение раздачей на конической оправке в последнем проходе обеспечивает благоприятное распределение остаточных напряжений по стенке трубы и может быть рекомендовано для повышения стойкости коррозионностойких труб, применяемых в атомной энергетике. Определены перспективы технологии, обеспечивающей уход от финишной холодной правки труб, которая, как показано, может приводить к низкому качеству поверхности, а также искажению полей остаточных напряжений в стенке труб.

Ключевые слова: остаточные напряжения; холодноотянутые и катаные трубы; точность размеров; распределение напряжений; волочение раздачей.

Основной причиной появления и развития коррозионных повреждений нержавеющей труб используемых в атомной энергетике, определяющей срок их эксплуатации, является процесс коррозионного растрескивания металла под напряжением.

Важнейшим фактором, влияющим на развитие межкристаллитной коррозии в трубах, применяемых в атомной энергетике, является наличие остаточных напряжений (ОН) в стенках труб после производства. Действие остаточных макронапряжений на прочность и долговечность труб во многом определяется наличием микронапряжений второго и третьего рода, которые могут достигать в локальных микрообъемах значительной величины и вызывать зарождение микротрещин [1]. Растягивающие ОН на поверхности труб способствуют зарождению и дальнейшему росту (раскрытию) язв и трещин, что приводит к моментальному выходу трубы из строя. Отсутствие растягивающих остаточных напряжений в поверхностных слоях труб может снизить риск аварийности и значительно увеличить срок службы коррозионностойких труб [2].

Целью работы является анализ распределения остаточных напряжений в стенке труб, производимых по традиционной технологии и предложению решений по ее совершенствованию.

На сегодняшний день большое внимание уделяется точности размеров и качеству поверхности производимых труб, однако задача введения в технические условия и ГОСТы на трубы ответственного назначения допустимого уровня остаточных напряжений пока не решена.

Известен способ волочения особотонкостенных труб для оболочек ТВЭЛ атомных реакторов из стали ЭИ-847 в последнем проходе в конической волоке с калибрующим пояском диаметром $D_{\text{вол}} = D(1 + 0,035 \log \lambda)$ на цилиндрической оправке диаметром $D_{\text{оп}} = d(1 + 0,025 \log \lambda)$, где λ – коэффициент вытяжки, D и d – наружный и внутренний диаметры заготовки соответственно [3]. Такой способ обеспечивает высокую точность размеров с учетом упругого последействия и качество поверхности труб как внешней, так и внутренней, однако напряженное состояние в таком способе не обеспечивает сжимающих остаточных напряжений на внешней поверхности.

Для анализа распределения остаточных напряжений в стенке таких труб было проведено математическое моделирование волочения трубы в программном пакете DEFORM-2D с соблюдением реальных размеров инструмента и условий процесса.

При расчете напряженно-деформированного состояния решается также связанная задача теп-

Краткие сообщения

лопроводности. При этом учитывается тепловыделение от пластической деформации и контактного трения, а также потери тепла теплопередачей, задаваемой коэффициентом теплопередачи a (кВт/м²·К), от заготовки к инструменту.

Заготовка трубы задавалась конечной длины. При этом за стационарную фазу волочения принималась деформация участка, отстоящего от исходного сечения выхода из волоки на расстоянии не менее 5 диаметров трубы (прутка). Потери тепла учитывались коэффициентом конвективной теплоотдачи. Механические свойства металла трубы и прутка задавались таблично с линейной интерполяцией между заданными значениями. Зависимость σ_s от степени деформации и температуры принималась по литературным данным. Контактное трение описывалось законом Кулона и коэффициент трения принимался постоянным на всей контактной поверхности в течение всего процесса волочения. Теплофизические свойства материалов волоки и оправки принимались для уровня температуры 20...80 °С. Размеры инструмента реальные и соответствуют используемым в экспериментальных исследованиях.

Труба с внутренним диаметром $D_{вн} = 7,490$ мм и толщиной стенки $S_0 = 0,260$ мм протягивалась через волоку с диаметром калибрующего пояска $D_{вол} = 7,062$ мм на оправке диаметром $D_{оп} = 6,629$ мм. Коэффициент вытяжки по сечению трубы составил $\lambda = 1,329$. Геометрия инструмента и заготовки представлена на рис. 1.

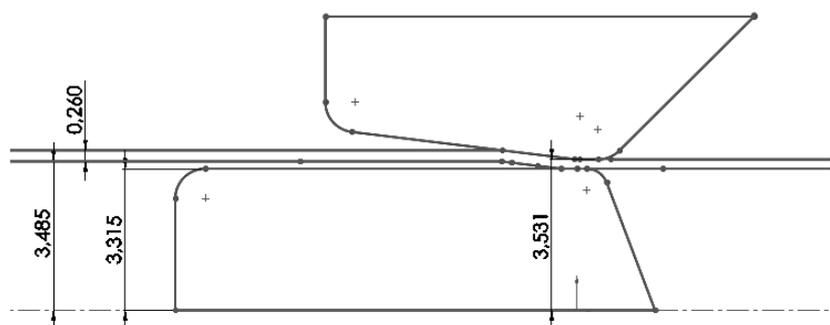


Рис. 1. Геометрия инструмента и трубы для моделирования в DEFORM-2D

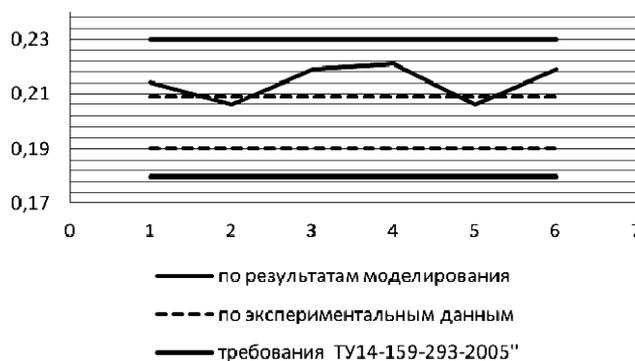


Рис. 2. Разброс результатов моделирования в сравнении с экспериментальными данными [3] и требованиями ТУ

Волочение осуществлялось со скоростью 0,5 м/с при коэффициенте трения $\mu = 0,08$. Коэффициент теплопередачи от трубы к волоке принят $a = 10$ кВт/м²·К, а коэффициент конвективной теплоотдачи $a_k = 50$ кВт/м²·К. На графиках S – радиальная координата по толщине стенки трубы. При этом $S=0$ соответствует внутренней поверхности трубы.

Задача решалась в упруго-пластической постановке, что позволило отследить упругое последствие трубы после выхода из волоки, а так же получить остаточное напряженное состояние после снятия напряжения волочения.

Целью моделирования было изучение упруго-последствия, в результате которого происходит некоторое изменение толщины стенки трубы, которое необходимо учитывать при проектировании инструмента волочения. Второй задачей моделирования являлось изучение поля остаточных напряжений в стенке труб.

После волочения внутренний диаметр трубы составил $D_{вн1} = 6,607$ мм, а толщина стенки $S_1 = 0,207$ мм.

Аналогичные задачи были решены для труб с внутренним диаметром $D_{вн} = 7,490$ и толщинами стенок в интервале 0,257...0,270 мм. В результате толщины стенок полученных труб оказались в интервале 0,206...0,221 мм.

На рис. 2 представлен разброс результатов моделирования в сравнении с экспериментальными данными и требованиями ТУ.

Сравнивая результаты моделирования с экспериментальными данными, полученными на производстве, можно сделать вывод, что модель хорошо описывает реальный процесс волочения с учетом упругого последействия и размеры готовой трубы попадают в поле допусков в соответствии с ТУ14-159-293-2005.

В результате моделирования были получены распределения главных остаточных напряжений: продольных σ_{11} , тангенциальных σ_{22} и радиальных σ_{33} (рис. 3–5).

Из графиков (см. рис. 3–5) видно, что на поверхности труб, полученных известным способом, присутствуют значительные осевые и тангенциальные растягивающие остаточные напряжения, которые при эксплуатации могут явиться причиной раскрытия коррозионных язв и трещин. К формированию такого поля остаточных напря-

жений приводит напряженно-деформированное состояние, характерное для волочения на короткой закрепленной оправке.

Противоположная картина будет наблюдаться, если в последнем проходе применить раздачу волочением на цилиндрической оправке. Для подтверждения этого было проведено моделирование процесса раздачи в последнем проходе.

Труба предготового размера после ХПТР с внутренним диаметром $D_{вн}=6,444$ мм и толщиной стенки $S_0=0,206$ мм подвергалась раздаче на конической оправке с диаметром калибрующего пояска $D_{оп}=6,584$ мм. Коэффициент вытяжки по сечению трубы составил $\lambda=1,261$. Геометрия инструмента и заготовки представлена на рис. 6.

Задний конец трубы фиксировался относительно осей координат X и Y , передний конец трубы оставался свободным. Оправка протягивалась

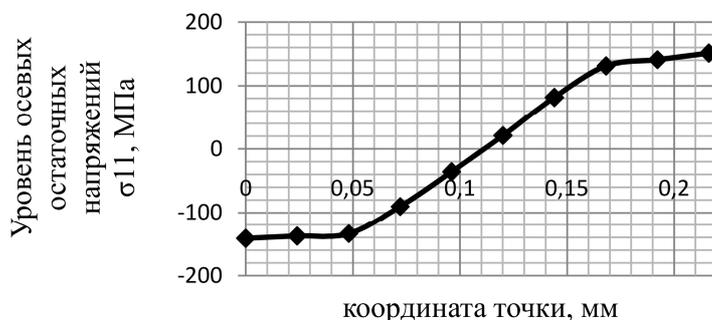


Рис. 3. Распределение продольных остаточных напряжений в стенке трубы 6,6x0,2 после волочения на закрепленной цилиндрической оправке

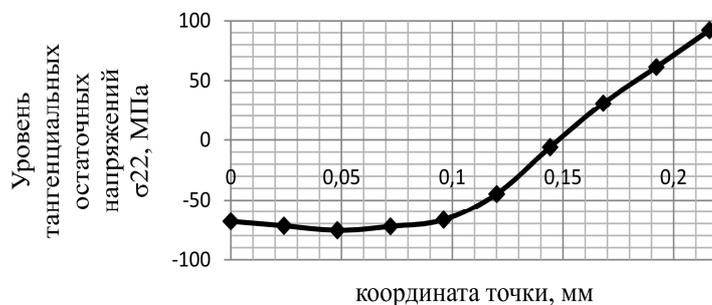


Рис. 4. Распределение тангенциальных остаточных напряжений в стенке трубы 6,6x0,2 после волочения на закрепленной цилиндрической оправке

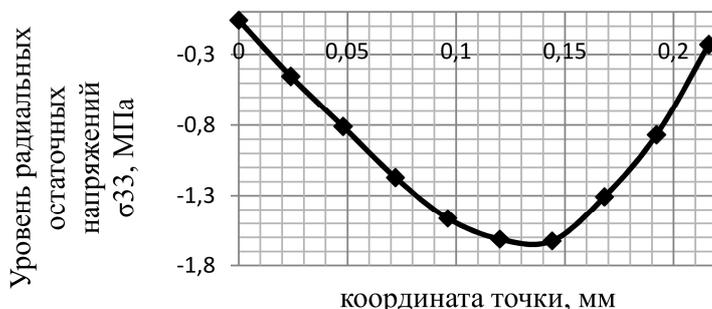


Рис. 5. Распределение радиальных остаточных напряжений в стенке трубы 6,6x0,2 после волочения на закрепленной цилиндрической оправке

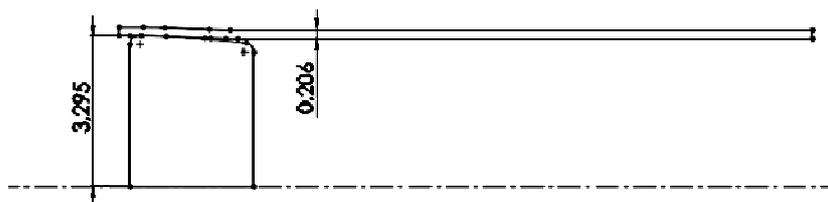


Рис. 6. Геометрия оправки и трубы для моделирования в DEFORM-2D

через трубу со скоростью волочения. Размеры трубы после волочения и снятия напряжений составили $D_{вн1}=6,608$ мм и толщиной стенки $S_1=0,202$ мм, что укладывается в поле допусков в соответствии с ТУ14-159-293-2005.

В результате моделирования были получены распределения главных остаточных напряжений: продольных σ_{11} , тангенциальных σ_{22} и радиальных σ_{33} (рис. 7–9).

Из графиков (см. рис. 7–9) видно, что на поверхности труб, полученных способом раздачи, на конической оправке присутствуют осевые и тангенциальные сжимающие остаточные напряжения.

Еще одной особенностью волочения раздачей является то, что в процессе протягивания оправки через трубу напряжения в очаге деформации в сумме с усилием волочения обеспечивают небольшое пластическое растяжение трубы после

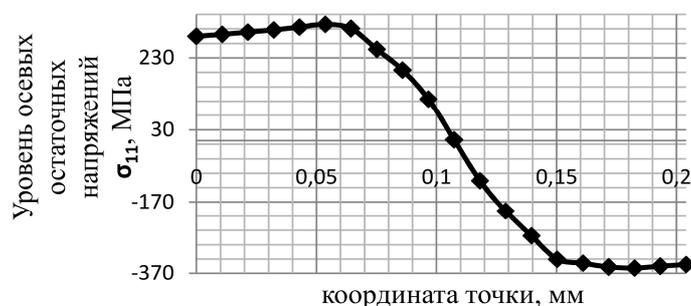


Рис. 7. Распределение продольных остаточных напряжений в стенке трубы 6,6×0,2 после раздачи волочением на конической оправке



Рис. 8. Распределение тангенциальных остаточных напряжений в стенке трубы 6,6×0,2 после раздачи волочением на конической оправке



Рис. 9. Распределение радиальных остаточных напряжений в стенке трубы 6,6×0,2 после раздачи волочением на конической оправке

схода с оправки. Этот факт гарантирует прямолинейность изготовленной таким методом трубы. Перспективой внедрения данной технологии может являться уход от финишной холодной правки труб, которая приводит к низкому качеству поверхности, а также искажает поле остаточных напряжений в стенке труб.

Таким образом, волочение раздачей на конической оправке в последнем проходе обеспечивает благоприятное распределение остаточных напряжений по стенке трубы и может быть рекомендовано для повышения стойкости коррозионностойких труб, применяемых в атомной энергетике.

Шимов Георгий Викторович, аспирант, ассистент кафедры обработки металлов давлением, Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург; geosh@bk.ru.

Серебряков Андрей Васильевич, канд. техн. наук, начальник отдела, ОАО «Первоуральский новотрубный завод», г. Первоуральск; info@chelpipe.ru.

Серебряков Александр Васильевич, канд. техн. наук, доцент кафедры обработки металлов давлением, Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург.

Розенбаум Михаил Александрович, аспирант кафедры обработки металлов давлением, Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург.

Литература

1. Соколов, И.А. Остаточные напряжения и качество металлопродукции / И.А. Соколов, В.И. Уральский. – М.: Металлургия, 1981. – 96 с.

2. Карзов, Г.П. Материалы 8-го международного семинара по горизонтальным парогенераторам. ОКБ «ГИДРОПРЕСС», Подольск, 2010.

3. Повышение точности и качества поверхности труб из коррозионностойкой стали для атомной энергетики / Ал.В. Серебряков, Ан.В. Серебряков, С.П. Буркин, Г.В. Шимов // Черные металлы. – 2012. – № 4. – С. 16–20.

Поступила в редакцию 6 апреля 2015 г.

DOI: 10.14529/met160220

STUDY OF RESIDUAL STRESS FIELDS IN THIN-WALLED TUBES OF STAINLESS STEEL AFTER DRAWING

G.V. Shimov¹, geosh@bk.ru,
An.V. Serebryakov², info@chelpipe.ru,
Al.V. Serebryakov¹,
M.A. Rosenbaum¹

¹ Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation,

² JSC "Pervouralsk New Pipe Plant", Pervouralsk, Russian Federation

The article discusses investigations of the fields of residual stresses in thin-walled tubes made of stainless steel after drawing. The results of simulation of the finish short mandrel drawing and hand drawing on the conical mandrel of cold-rolled EI847 steel pipes for fuel cladding of nuclear reactors are presented. A comparative analysis of the dimensional accuracy of pipe obtained in the production and during simulation was made. Differences in sizes of diameters and wall thicknesses are obtained within the TU 14-159-293-2005 standard and show the correctness of the mathematical model. Distributions of residual stresses on pipe walls in case of drawing on short mandrel and in case of hand drawing were obtained. The importance of using hand drawing on the final stage of production of pipes from corrosion-resistant stainless steel is shown. One of the technological features of hand drawing is considered: in the process of pulling the mandrel through the tube the stresses in the deformation area together with the dragging increase providing small plastic stretching of the tube after leaving the mandrel. This fact guarantees the straightness of the pipe manufactured by this method. It is shown that hand drawing on the conical mandrel in the last passage provides favorable distribution of residual stresses on the pipe wall and can be recommended for the improvement of the corrosion resistance of pipes used in the nuclear industry. The technology prospects are shown which can avoid the final cold straightening of tubes leading to the low surface quality as well as to the distortion of fields of residual stresses in the pipe wall.

Keywords: residual stress; cold-drawn and cold-rolled pipes; dimensional accuracy; stress distribution; hand drawing.

References

1. Sokolov I.A., Ural'skiy V.I. *Ostatochnye napryazheniya i kachestvo metalloproduksii* [Residual Stress and Quality of Metal]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1981. 96 p.
2. Karzov G.P. *Materialy 8-go mezhdunarodnogo seminara po gorizontalmym parogeneratoram* [Proceedings of the 8th International Seminar on Horizontal Steam Generators]. Podol'sk, OKB GIDROPRESS Publ., 2010. (in Russ.)
3. Serebryakov A.I.V., Serebryakov An.V., Burkin S.P., Shimov G.V. [Increasing the Accuracy and Surface Quality of Stainless Steel Tubes for the Nuclear Power Industry]. *Chernye metally*, 2012, no. 4. p. 16–20. (in Russ.)

Received 6 April 2015

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Исследование полей остаточных напряжений в особотонкостенных трубах из нержавеющей стали после волочения / Г.В. Шимов, Ан.В. Серебряков, Ал.В. Серебряков, М.А. Розенбаум // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 127–132. DOI: 10.14529/met160220

FOR CITATION

Shimov G.V., Serebryakov An.V., Serebryakov A.I.V., Rosenbaum M.A. Study of Residual Stress Fields in Thin-Walled Tubes of Stainless Steel after Drawing. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 127–132. (in Russ.) DOI: 10.14529/met160220