

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТЕПЛООБМЕННЫХ ТРУБАХ ПОСЛЕ ВОЛОЧЕНИЯ И РАЗДАЧИ

## RESEARCH RESIDUAL STRESS THIN-WALLED PIPES OF CORROSION RESISTANT STAINLESS STEEL

Г.В. Шимов, Ан.В. Серебряков, Ал.В. Серебряков,  
Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

### Abstract

*The simulation of the process of finishing fixed plug pipe drawing and expansion of pipe in the conical mandrel cold-rolled steel pipes for steam generators for nuclear reactor fuel cladding. A comparative analysis of the accuracy of pipe sizes obtained in the production and in the simulation. Differences in values of the diameters and wall thicknesses are obtained within the limits according to the TU14-159-293-2005, indicating the correctness of the mathematical model.*

*Distributions of residual stresses on the wall of the pipe for the case of fixed plug pipe drawing and expansion of pipe in the conical mandrel. The expediency of using expansion of pipe in the conical mandrel in the final stage of production of pipes from corrosion-resistant stainless steel.*

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, 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 предложение решений 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 с каждым годом становится актуальнее.

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  $\lambda$  – коэффициент вытяжки,

$D$  и  $d$  – наружный и внутренний диаметры заготовки соответственно [3]. Такой способ обеспечивает высокую точность размеров с учетом упругого последствия 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 процесса волочения с соблюдением реальных размеров инструмента.

При расчете напряженно-деформированного состояния решается также связанная задача теплопроводности. При этом учитывается тепловыделение от пластической деформации и контактного трения, а также потери тепла теплопередачей, задаваемой коэффициентом теплопередачи  $A$  (кВт/м<sup>2</sup>·°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  $\sigma_s$  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 реальны и

соответствуют использующимся в экспериментальных исследованиях.

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

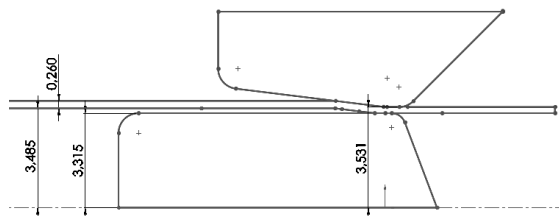


Рис. 1. Геометрия инструмента и трубы для моделирования в DEFORM-2D

Волочение осуществлялось со скоростью 0,5 м/спри коэффициенте трения  $\mu=0,08$ . Коэффициент теплопередачи от трубы к волоке принят  $a=10$  кВт/м<sup>2</sup>·°К, а коэффициент конвективной теплоотдачи  $a_K=50$  кВт/м<sup>2</sup>·°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 изволоки, а так же получить остаточное напряженное состояние после снятия напряжения волочения.

Целью моделирования было изучение упругого 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  $D_{\text{вн1}}=6,607$  мм, а толщина стенки  $S_1=0,207$  мм.

Аналогичные задачи были решены для труб с внутренним диаметром  $D_{\text{вн}}=7,490$  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 [2] и требованиями ТУ.

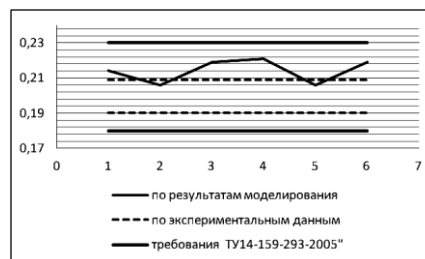


Рис. 2. Разброс результатов моделирования в сравнении с экспериментальными данными [7] и требованиями ТУ

Сравнивая результаты моделирования с экспериментальными данными, полученными на производстве [2], можно сделать вывод, что модель хорошо описывает реальный процесс волочения с учетом упругого последствия 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  $\sigma_{11}$ , тангенциальных  $\sigma_{22}$  и радиальных  $\sigma_{33}$  (рис. 3-5).

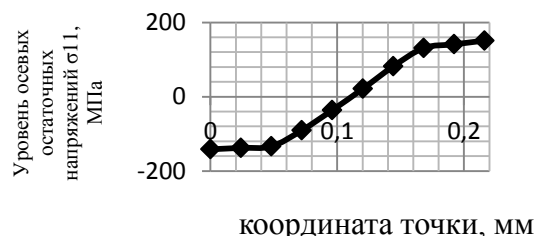


Рис. 3. Распределения продольных остаточных напряжений в стенке трубы 6,6×0,2 после волочения на закрепленной цилиндрической оправке

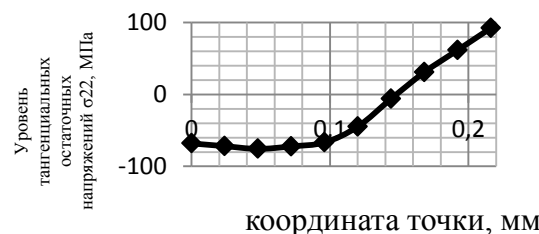


Рис. 4. Распределения тангенциальных остаточных напряжений в стенке трубы 6,6×0,2 после волочения на закрепленной цилиндрической оправке



Рис. 5. Распределения радиальных остаточных напряжений в стенке трубы 6,6×0,2 после волочения на закрепленной цилиндрической оправке

Из графиков 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 ОН 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 предготовного 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.

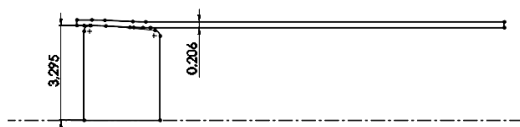


Рис. 6. Геометрия оправки и трубы для моделирования в DEFORM-2D

Задний конец трубы фиксировался относительно осей координат X и Y, передний конец трубы оставался свободным. Оправка протягивалась 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  $\sigma_{11}$ , тангенциальных  $\sigma_{22}$  и радиальных  $\sigma_{33}$  (рис. 7-9).

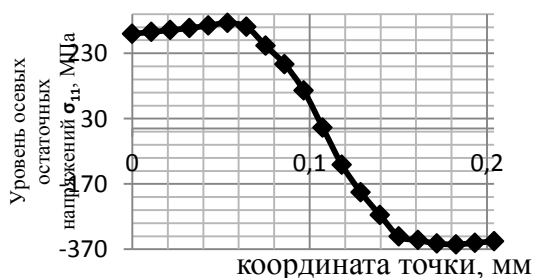


Рис. 7. Распределения продольных остаточных напряжений в стенке трубы 6,6×0,2 после раздачи волочением на конической оправке

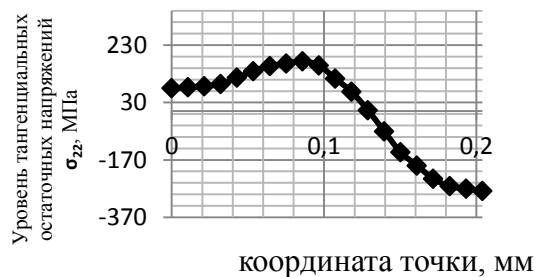


Рис. 8. Распределения продольных остаточных напряжений в стенке трубы 6,6×0,2 после раздачи волочением на конической оправке

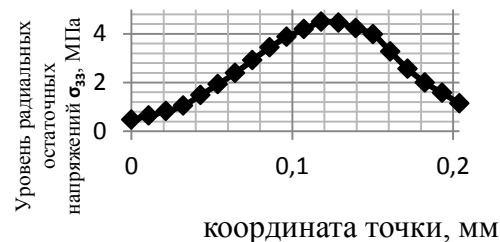


Рис. 9. Распределения продольных остаточных напряжений в стенке трубы 6,6×0,2 после раздачи волочением на конической оправке

Из графиков 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 «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.

#### Список литературы

1. Соколов И.А., Уральский В.И. Остаточные напряжения и качество металлопродукции. М.: Металлургия, 1981. 96 с.
2. Карзов Г.П. Материалы 8-го международного семинара по горизонтальным парогенераторам. ОКБ "ГИДРОПРЕСС", Подольск, 2010.
3. Серебряков Ал.В., Серебряков Ан.В., Буркин С.П., Шимов Г.В. Повышение точности и качества поверхности труб из коррозионностойкой стали для атомной энергетики/ Черные металлы. 2012. №4. С. 16-20.