

Компьютерное моделирование процесса изготовления криволинейного отвода из аустенитной стали на трубогибочном станке с применением нагрева ТВЧ

© О.М. Петров, А.Г. Казанцев

АО «НПО «ЦНИИТМАШ», Москва, 115162, Россия

С использованием метода конечных элементов выполнена оценка остаточных напряжений и деформаций, которые возникают в отводе Ду350 радиусом 1200 мм из аустенитной стали типа 08X18H10T в процессе его изготовления с локальным нагревом токами высокой частоты (ТВЧ) и водяным охлаждением. Показано, что на внутренней поверхности отвода возникают сжимающие напряжения, а на внешней — растягивающие, в связи с чем сечение отвода приобретает эллиптическую форму. Максимальные деформации в зоне сжатия достигают 34 %, в растянутой зоне отвода — 22 %. Представлено исследование влияния термообработки и гидроиспытаний на величину остаточных напряжений. По данным испытаний на растяжение определены характеристики механических свойств металла в различных зонах натурального отвода. Установлено, что в нетермообработанном отводе в сжатой и растянутой зонах наблюдается повышение предела текучести на 10...20 % по сравнению со свойствами исходной трубы. Примерно на столько же относительное удлинение снижается в растянутой зоне и повышается в сжатой. После термообработки с нагревом до 900 °С (30 ч) свойства в различных зонах отвода выравниваются.

Ключевые слова: метод конечных элементов, нагрев токами высокой частоты, остаточные напряжения, криволинейный отвод, термообработка, гидроиспытания, механические свойства

Введение. При изготовлении трубопроводов широко используют криволинейные отводы, созданные пластическим деформированием. При этом в таких отводах возникают остаточные напряжения и деформации, вызывающие склонность к коррозионному растрескиванию, эрозионному износу и повышающие интенсивность накопления усталостных повреждений.

В настоящей работе представлено компьютерное моделирование процесса изготовления из трубы $\varnothing 426 \times 40$ мм (сталь 08X18H10T) отвода радиусом 1200 мм на трубогибочном станке с применением нагрева токами высокой частоты (ТВЧ) и водяного охлаждения [1–4], для того чтобы дать оценку воздействий остаточных напряжений и деформаций на эксплуатационные характеристики полученного отвода.

При гибке применяются кольцевой нагрев узкого участка трубы и охлаждение водой согнутого участка, что повышает ее жесткость при деформациях изгиба и препятствует образованию гофров (складок) и чрезмерной овализации поперечного сечения. Для осуществления

гибки трубу-заготовку, пропуская через индуктор и спрейер, устанавливают в направляющие ролики станка и закрепляют в зажимах подающей каретки и поворотного водила (рис. 1). После этого включают индуктор, спрейер и производят нагрев узкого кольцевого участка. Затем кареткой продольной подачи станка перемещают трубу через направляющие ролики, индуктор, спрейер и при повороте водила, толкаемого трубой, изгибают нагретый участок. Гибкой последовательно нагретых участков движущейся трубы формируется согнутый участок отвода. Деформация трубы определяется радиусом ее изгиба и температурой нагрева растянутой и сжатой зон согнутого участка.

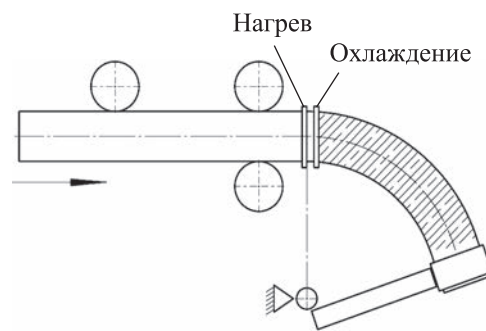


Рис. 1. Схема гибки трубы

Методика расчета. Моделирование рассматриваемого процесса выполняли с помощью конечно-элементного пакета ANSYS [5] и подходов, приведенных в [6–8]. Конечно-элементная модель оснастки станка (зажимов, направляющих роликов, подающей каретки) и трубы представлена на рис. 2. Следует заметить, что ввиду симметрии трубы и оснастки моделировалась их половина.

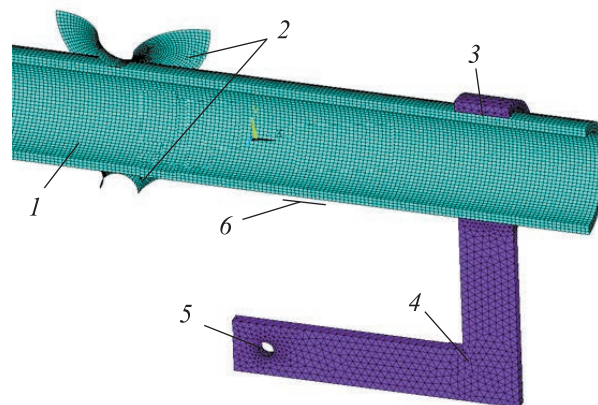


Рис. 2. Конечно-элементная модель оснастки и трубы:
1 — труба; 2 — направляющие; 3 — сцепленный контакт; 4 — захват;
5 — шарнир; 6 — область нагрева

Модель состоит из 28 тыс. элементов и 143 тыс. узлов для трубы, а также 7 тыс. элементов и 14 тыс. узлов для оснастки. Применялись 20-узловые элементы SOLID186. Задача решалась в геометрически нелинейной постановке с учетом больших деформаций и перемещений.

Передний конец трубы с помощью «связанного» (bonded) контакта был жестко закреплен в зажиме поворотного водила, имеющего возможность свободно вращаться вокруг своей оси. Труба под действием продольного усилия от подающей каретки перемещается в направлении к поворотному водилу станка. Нагретый участок изгибается за счет жесткого соединения трубы с зажимом водила и свободного поворота водила вокруг неподвижной оси. Продольная подача трубы происходила со скоростью 10 мм/мин.

Направляющие подающей каретки заданы жесткими недеформируемыми контактными плоскостями, препятствующими поперечному отклонению заднего конца трубы от начального положения.

Для описания упругопластических свойств стали 08X18H10T была использована теория течения с изотропным упрочнением с учетом зависимости упругопластических свойств (предела текучести и модуля упрочнения) от температуры. Также была задана температурная зависимость коэффициента теплового расширения (КТР), значение которого варьируется в диапазоне $(16...20) \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ при температуре $20...1000^\circ\text{C}$ для стали 08X18H10T. Вязкие свойства на этапе создания отвода не задавали, так как процесс гибки с локальным нагревом длится всего несколько минут, и потому релаксацией напряжений за это время было решено пренебречь.

На языке APDL был написан макрос с циклом, при котором происходят движение трубы и соответствующее продольное смещение ее нагретых участков относительно индуктора. В нагретой зоне прочностные свойства материала трубы снижаются, в результате чего труба изгибается только в ней. Ширина нагретой зоны трубы с максимальной температурой 1000°C принята равной 10 мм, причем по обе стороны от зоны с максимальной температурой заданы области с плавным изменением температуры от максимальной до 20°C .

На предварительном этапе, для того чтобы получить распределение температур по длине трубы (по расстоянию от области нагрева), решалась задача теплопроводности. Полученное распределение температур принималось как граничное условие. Таким образом, в качестве граничных условий были заданы только кинематическое перемещение заднего торца трубы и распределение температуры вблизи зоны нагрева ТВЧ.

Положение трубы и зоны нагрева в начальный и конечный моменты гибки показаны на рис. 3.

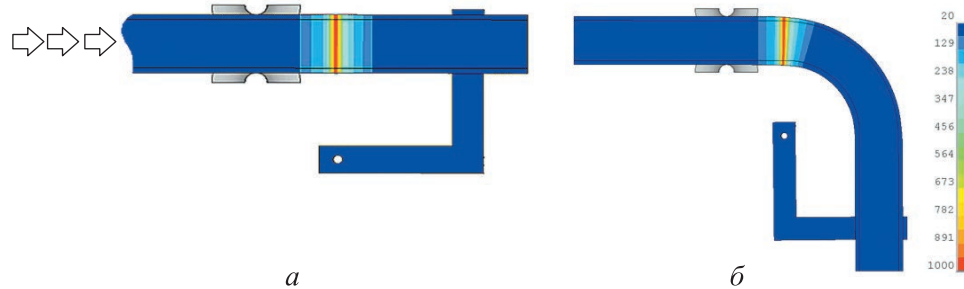


Рис. 3. Положение трубы и зоны нагрева в начальный (а) и конечный (б) моменты гибки (шкала температур в °С)

После достижения заданного угла изгиба происходят остывание трубы и раскрытие зажима поворотного водила. При угле изгиба, равном 90° (рис. 3, б), суммарная длина продольного перемещения трубы составляет 1360 мм (136 шагов цикла продвижения трубы).

Полученные результаты. Распределение остаточных (пластических) деформаций в согнутом на 90° отводе приведено на рис. 4. Максимальные остаточные деформации, сосредоточенные в зоне сжатых волокон отвода, достигают 34 % (в этой зоне толщина стенки увеличилась в 1,3 раза), максимальная деформация в растянутой зоне отвода равна 22 %. У нейтральной линии остаточные деформации не превышают 3 %.

Распределение остаточных деформаций по толщине стенки отвода в различных зонах поперечного сечения показано на рис. 5. Приведенные далее распределения остаточных деформаций и напряжений указаны для 45-градусного (относительно поворотной траектории оси трубы) сечениягиба, т. е. посередине кривизныгиба.

Поперечное сечение отвода в процессе гибки приобретает эллипсоидную форму. Значения минимальной и максимальной толщины стенки, измеренные в реальном изделии (производства АО «ЗКО», г. Белгород) в зонах растянутых и сжатых волокон отвода, а также полученные в результате расчета, представлены в табл. 1, данные которой свидетельствуют об удовлетворительном совпадении экспериментальных и расчетных значений (отклонение менее 7 %).

Распределение окружных и осевых остаточных напряжений в поперечном сечении отвода (в его средней части) представлено на рис. 6.

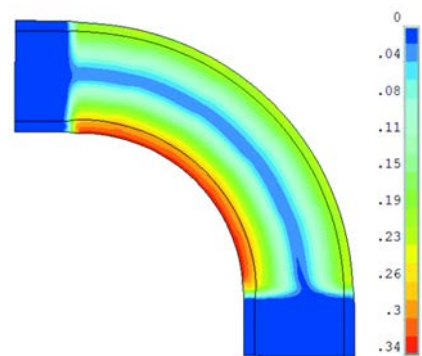


Рис. 4. Распределение интенсивности остаточных пластических деформаций (ед.)

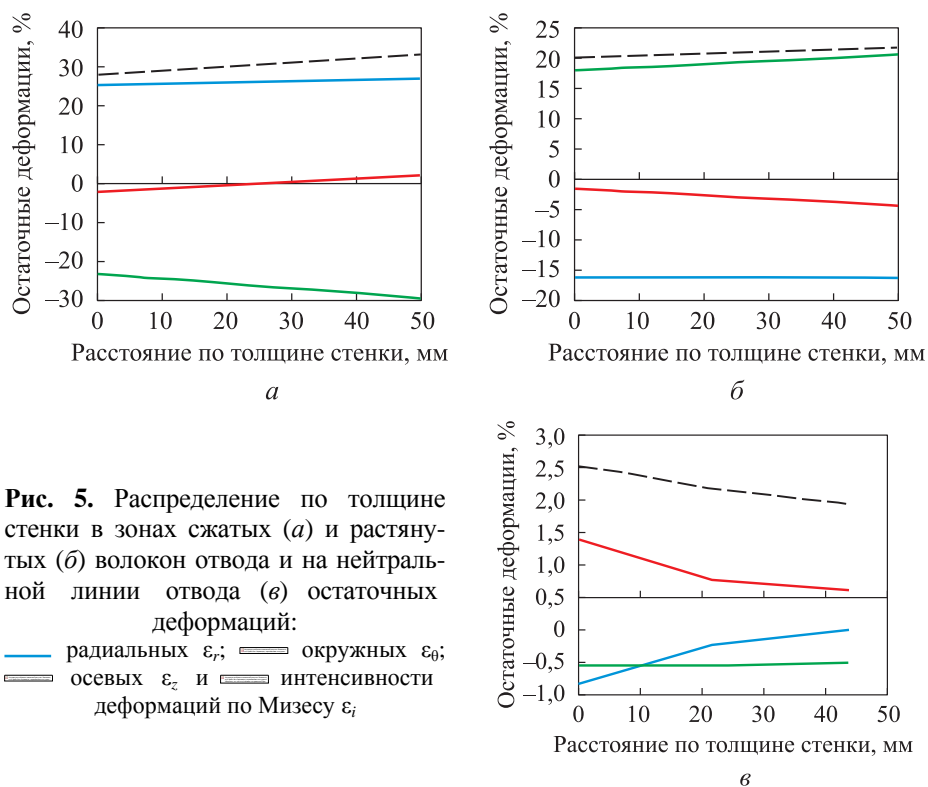


Таблица 1

Толщина стенки в зоне растянутых и сжатых волокон отвода

Толщина стенки трубы	Результат, мм	
	замера	расчета
Исходная прямой трубы	40	
Минимальная в зоне растянутых волокон	35,6	34,1
Максимальная в зоне сжатых волокон	48,2	51,6

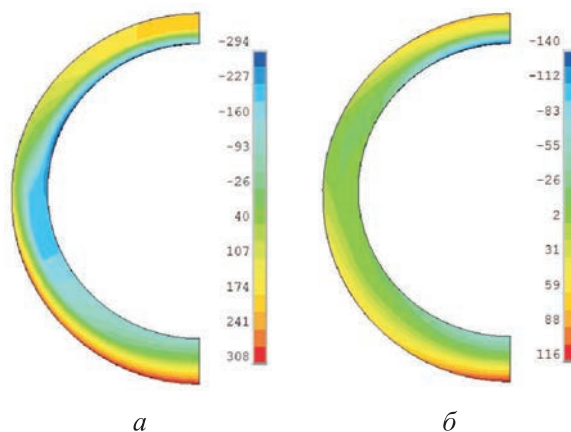


Рис. 6. Распределение в поперечном сечении отвода осевых (*а*) и окружных (*б*) остаточных напряжений (МПа)

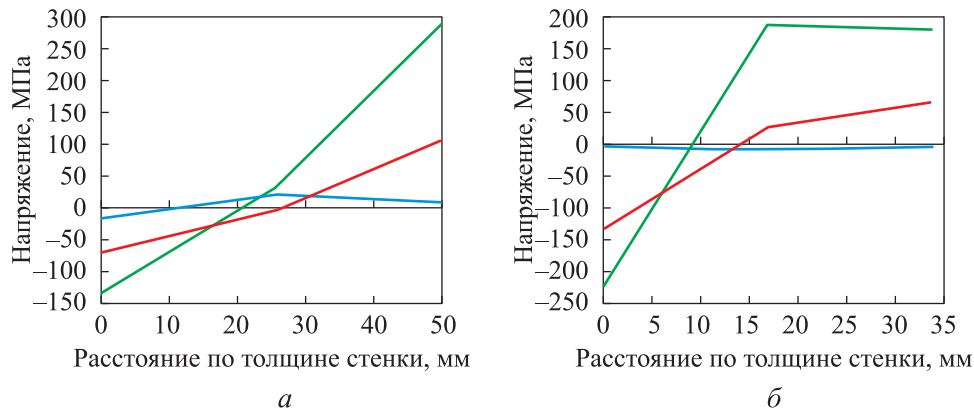


Рис. 7. Изменение по толщине стенки в зоне сжатых (а) и в зоне растянутых волокон отвода (б) остаточных напряжений:

— радиальных σ_r ; — окружных σ_θ ; — осевых σ_z

Изменение окружных и осевых остаточных напряжений по толщине стенки отвода (в направлении от внутренней поверхности к наружной) для зоны сжатых и растянутых волокон показано на рис. 7. На рис. 6 и 7 видно, что на внутренней поверхности отвода напряжения σ_θ и σ_z — сжимающие. Примерно в середине толщины стенки напряжения изменяют знак и становятся растягивающими, их значения возрастают с приближением к наружной поверхности отвода. Радиальные напряжения σ_r близки к нулю.

Максимальный уровень остаточных осевых растягивающих напряжений, который наблюдается на наружной поверхности отвода в зоне сжатых волокон, составляет около 300 МПа, на растянутой стороне — около 180 МПа, окружные напряжения на наружной поверхности на сжатой стороне достигают 110 МПа, на растянутой — 70 МПа. На внутренней поверхности максимальные сжимающие окружные напряжения равны 140 МПа, осевые — 300 МПа.

Выполненные аналогичные расчеты с загибом трубы на 30° и 60° показали, что характер распределения и значения пластических деформаций и остаточных напряжений на криволинейном участке не зависят от углагиба.

Термообработка отводов из аустенитной нержавеющей стали, изготовленных с применением спрейерного охлаждения водой, не является обязательной [9]. Необходимость ее проведения определяется с учетом конкретной области применения отвода. При высоких усталостных нагрузках и отсутствии коррозионных воздействий на внутреннюю поверхность отвода она может дать положительный эффект за счет снижения высоких растягивающих напряжений на наружной поверхности отвода. При наличии агрессивной среды термообработка не всегда целесообразна, так как в этом случае желательно сохранить сжимающие напряжения на внутренней поверхности.

Оценка влияния термообработки на остаточные напряжения в отводе выполнена для двух вариантов — с нагревом до 900 °С и нагревом до 650 °С с последующей выдержкой (30 ч).

Для моделирования происходящих при этом процессов ползучести в материале отвода для скорости деформации ползучести (модель ползучести Нортона [5]) использовано следующее соотношение:

$$\dot{\epsilon} = C_1 \sigma^{C_2} e^{-C_3/T},$$

где $\dot{\epsilon}$ — скорость ползучести, ч⁻¹; σ — напряжения, МПа; T — температура, °С; $C_1 = 10^{-14,2}$; $C_2 = 5,0$; $C_3 = 47,5$ — параметры, полученные на основе приведенных в [10, 11] экспериментальных данных по ползучести для стали 08Х18Н10Т.

Указанная модель (уравнение) ползучести использована в данном расчете сложного напряженного состояния, реализуя заложенный в программе неявный метод интегрирования по времени [5].

Выполненные расчеты показали, что при термообработке с максимальной температурой 900 °С остаточные напряжения снимаются практически полностью (не превышают 10 МПа).

Эпюры компонент остаточных напряжений после термообработки при $T_{\max} = 650$ °С приведены на рис. 8. В этом случае, что видно при сопоставлении изображений на этом рисунке и на рис. 6, остаточные напряжения снижаются примерно в 3 раза.

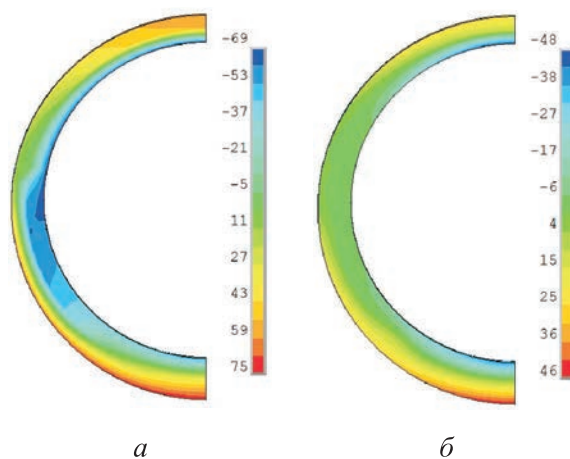


Рис. 8. Распределение осевых (а) и окружных (б) остаточных напряжений (МПа) после термической обработки при $T_{\max} = 650$ °С в поперечном сечении отвода

График релаксации напряжений в наиболее нагруженной точке сжатой зоны (середина отвода) приведен на рис. 9, на котором можно выделить три участка:

- на участке I (0...30 ч) происходит нагрев трубы с 20 до 650 °С, причем значительно уменьшаются напряжения вследствие ухудшения свойств материала и снижения ползучести;
- на участке II (30...60 ч) осуществляется выдержка трубы при постоянной температуре 650 °С, напряжения снижаются незначительно (на 5 МПа);
- на участке III (60...90 ч) материал трубы остывает до комнатной температуры, и незначительно увеличиваются напряжения.

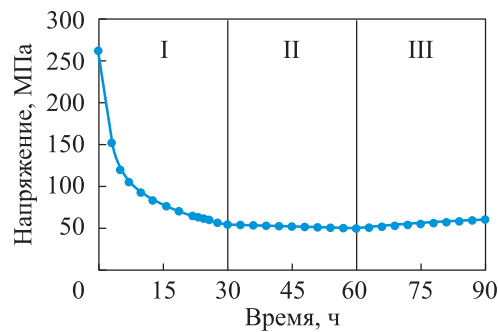


Рис. 9. График релаксации напряжений в отводе в течение всего цикла термической обработки:
I — нагрев; II — выдержка при 650 °С; III — остывание

Определенное влияние на величину остаточных напряжений оказывают также гидравлические испытания. На рис. 10 показано распределение напряжений в поперечном сечении отвода при гидроиспытаниях в случае воздействия внутреннего давления, составляющего 24,5 МПа, без учета остаточных напряжений.

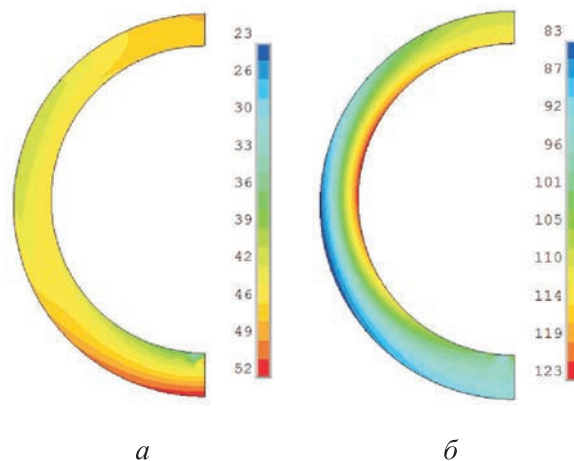


Рис. 10. Распределение осевых (а) и окружных (б) напряжений (МПа) в поперечном сечении отвода при действии внутреннего давления 24,5 МПа (без учета остаточных напряжений)

На рисунке видно, что зона максимальных осевых остаточных напряжений и зона напряжений от действия внутреннего давления при гидравлических испытаниях (наружная поверхность на сжатой стороне отвода) совпадают.

Сумма напряжений в этой зоне при гидравлических испытаниях (с учетом остаточных напряжений) превышает предел текучести. Как следствие, после гидроиспытаний за счет пластической деформации происходит некоторое перераспределение остаточных напряжений — максимальные растягивающие окружные и осевые напряжения, действующие на наружной поверхности, снижаются примерно на 12 % (рис. 11).

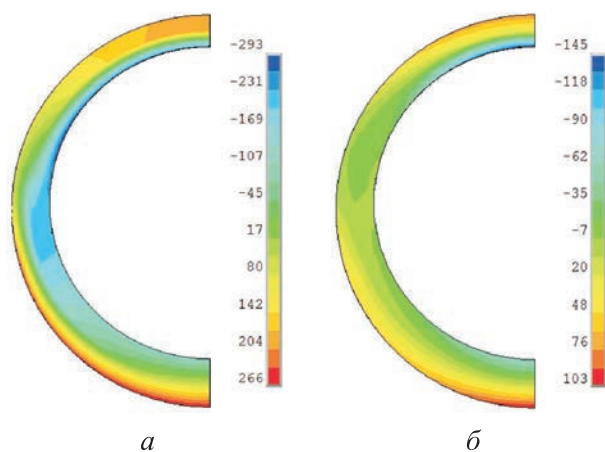


Рис. 11. Распределение осевых (а) и окружных (б) остаточных напряжений (МПа) после гидравлических испытаний в поперечном сечении отвода

Для определения влияния пластических деформаций на свойства металла из отвода, изготовленного по рассмотренной технологии, были вырезаны для испытаний на растяжение стандартные образцы с рабочим диаметром 6 мм. Установленные значения механических свойств при температурах 20 °С и 350 °С в осевом и тангенциальном направлениях в растянутой и сжатой зоне отвода, а также в области нейтральной линии) приведены в табл. 2. Согласно представленным данным, в сжатой и растянутой зоне за счет наклепа наблюдается повышение предела текучести на 10...20 % по сравнению со свойствами исходной трубы, которые соответствуют значениям, указанным для нейтральной зоны. Примерно на столько же снижается относительное удлинение в растянутой зоне и повышается удлинение в сжатой зоне. Временное сопротивление и относительное сужение изменяются незначительно. Свойства в продольном и в тангенциальном направлениях практически совпадают.

Механические свойства стали 08X18H10T в различных зонах отвода, находящегося в нетермообработанном состоянии

Зона вырезки	Ориентация образца	Предел текучести, МПа	Временное сопротивление, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	T, °C
Растянутая сторона	Продольная	351	605	57,2	74,5	20
	Тангенциальная	353	596	54,5	72,2	
	Продольная	284	420	26,5	71	350
	Тангенциальная	287	416	27	66,5	
Нейтральная зона	Продольная	290	587	62,5	76,5	20
	Тангенциальная	300	590	60,5	72,0	
	Продольная	216	417	35,5	72,0	350
	Тангенциальная	233	435	34	64,5	
Сжатая сторона	Продольная	322	598	64,5	75,5	20
	Тангенциальная	325	604	64,0	71,5	
	Продольная	258	422	31,0	72,0	350
	Тангенциальная	251	426	30,5	66,5	

После термообработки по рекомендуемым в [9] режимам с нагревом до 900 °C происходят выравнивание свойств в различных зонах отвода и снижение предела текучести и временного сопротивления (соответственно до 235...255 МПа и 545...555 МПа при T = 20 °C).

Заключение. При изготовлении отвода на его внутренней поверхности возникают сжимающие, а на внешней — растягивающие осевые и окружные остаточные напряжения. Максимальный уровень остаточных растягивающих напряжений на наружной поверхности отвода, который наблюдается для осевых напряжений в зоне сжатых волокон, составляет около 300 МПа. На внутренней поверхности, соответствующей растянутой стороне отвода, остаточные напряжения — сжимающие, их максимальное значение составляет около 300 МПа (осевая компонента напряжений).

Максимальные остаточные деформации, сосредоточенные в зоне сжатых волокон, достигают 34 %, максимальная деформация в растянутой зоне отвода составляет 22 %. Полученные в результате расчета значения остаточных деформаций и толщины стенок отвода согласуются с данными измерений сечения реального отвода радиусом 1200 мм, изготовленного по изложенной технологии из аустенитной трубы Ø426×40.

Механические свойства в различных зонах нетермообработанного отвода различаются. В сжатой и растянутой зонах наблюдается увеличение предела текучести (на 10...20 %) по сравнению со свойствами исходной трубы. Примерно на столько же снижается относительное удлинение в растянутой зоне и повышается удлинение в сжатой зоне. Временное сопротивление и относительное сужение изменяются незначительно. В термообработанном с нагревом до 900 °С (30 ч) отводе свойства в различных зонах выравниваются.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гальперин А.И. *Машины и оборудование для изготовления криволинейных участков трубопровода*. Москва, Недра, 1983, 203 с.
- [2] Низкий В.В., Быков Н.А. Особенности гибки труб из сталей аустенитного и перлитного классов с нагревом ТВЧ. *Труды НИКИМТ*, т. 6. Москва, 2003, с. 59–71.
- [3] Суворов В.П., Низкий В.В. Оборудование для гибки труб с нагревом ТВЧ. *Труды НИКИМТ*, т. 6. Москва, 2003, с. 77–79.
- [4] Миронов К.А., Козлов А.В., Шеркунов В.Г., Суворов А.Л. Исследование силовых характеристик при гибке труб с обкатыванием, с использованием автоматизированного модуля и ПК. *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*, 2015, № 2, с. 45–48.
- [5] *ANSYS Mechanical APDL Theory Reference*. Release 14.0-2011 SAS IP.
- [6] Коликов А.П., Звонарев Д.Ю., Таупек И.М. Применение математического моделирования для расчета режимов пластического формоизменения толстолистовой заготовки и повышение качества труб большого диаметра. *Черные металлы*, 2018, № 11, с. 60–66.
- [7] Korobkov G.E., Yanchushka A.P., Zakiryanov M.V. Numerical modelling of stress-strain state of a gas pipeline with cold bending offsets according to in-line inspection. *Journal of Mining Institute*, 2018, vol. 234, pp. 643–648.
- [8] Sloderbach Z. Generalized model of strains during bending of metal tubes in bending machines. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2014, no. 52 (4), pp. 1093–1106.
- [9] *СТП 26.260.484–2004. Термическая обработка коррозионноустойчивых сталей и сплавов на железникелевой основе в химическом машиностроении*. Москва, НИИХИММАШ, 2004, 33 с.
- [10] *Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергоустановок ПНАЭ Г-7-002–86*. Москва, Энергоатомиздат, 1989, 525 с.
- [11] Катанаха Н.А., Гецов Л.Б., Данюшевский И.А., Семенов А.С. Ресурс гибов высокотемпературных трубопроводов. *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского политехнического университета*, 2013, № 3 (78), с. 82–94.

Статья поступила в редакцию 14.09.2023

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Петров О.М., Казанцев А.Г. Компьютерное моделирование процесса изготовления криволинейного отвода из аустенитной стали на трубогибочном станке с применением нагрева ТВЧ. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 9. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-9-2301>

Петров Олег Максимович — старший научный сотрудник, ГНЦ «АО «ЦНИИТМАШ». Сфера научных интересов: механика разрушения, расчетно-экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния элементов конструкций. Автор 9 научных публикаций. e-mail: oleg518@mail.ru

Казанцев Александр Георгиевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий отделом, ГНЦ «АО «ЦНИИТМАШ». Сфера научных интересов: малоцикловая и многоцикловая усталость, механика разрушения, расчетно-экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния элементов конструкций. Автор более 200 научных публикаций. e-mail: agkasantsev@cniitmash.com

Computer simulation of manufacturing a swept bend of austenitic steel using a pipe bending machine with the HFC heating

© O.M. Petrov, A.G. Kazantsev

JSC “RPA “CNIITMASH”, Moscow, 115162, Russia

The finite element method was used to evaluate residual stresses and deformations arising in the Du350 bend with a radius of 1200 mm made of the 08X18H10T type austenitic steel during its manufacture with local heating by the high frequency current (HFC) and water cooling. The paper shows that compressive stresses appear on the bend inner surface, and the tensile stresses — on the outer. The bend cross-section acquires the elliptical shape. Maximum deformation in the compression zone reaches 34%, and 22% in the bend tension zone. Heat treatment and hydrotesting influence on the residual stresses magnitude was studied. Based on the tensile test data, characteristics of the metal mechanical properties in various zones of the full-scale bend were determined. It was established that in the non-heat-treated bend an increase in the yield strength (by 10...20%) compared to the original pipe properties was registered in the compressed and tensile zones. Relative elongation in the tensile zone decreased by approximately the same length, and elongation in the tensile zone increased. After heat treatment with heating of up to 900 °C (30 hours), properties in the different bend sections were leveling.

Keywords: *finite element method, HFC heating, residual stresses, swept bend, heat treatment, hydrotesting, mechanical properties*

REFERENCES

- [1] Galperin A.I. *Mashiny i oborudovanie dlya izgotovleniya krivolinyeynykh uchastkov truboprovoda* [Machines and equipment for manufacture of the curved sections of pipelines]. Moscow, Nedra Publ., 1983, 203 p.
- [2] Nizkiy V.V., Bykov N.A. Osobennosti gibki trub iz staley austenitnogo i perlitnogo klassov s nagrevom TVCh [Features of bending pipes made of austenitic and pearlitic steels with HFC the heating]. *Trudy NIKIMT — Proceedings of NIKIMT*, vol. 6. Moscow, 2003, pp. 59–71.
- [3] Suvorov V.P., Nizkiy V.V. Oborudovanie dlya gibki trub s nagrevom TVCh [Equipment for bending pipes with HFC heating]. Moscow, *Trudy NIKIMT — Proceedings of NIKIMT*, vol. 6. Moscow, 2003, pp. 77–79.
- [4] Mironov K.A., Kozlov A.V., Sherkunov V.G., Suvorov A.L. Issledovanie silovykh kharakteristik pri gibke trub s obkатыvaniem, s ispolzovaniem avtomatizirovannogo modulya i PK [The study of power characteristics during pipe bending with burnishing, using an automated module and PC]. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova — Vestnik of Nosov Magnitogorsk Technical University*, 2015, no. 2, pp. 45–48.
- [5] *ANSYS Mechanical APDL Theory Reference*. Release 14.0-2011, SAS IP.
- [6] Kolikov A.P., Zvonarev D.Yu., Taupek I.M. Primenenie matematicheskogo modelirovaniya dlya rascheta rezhimov plasticheskogo formoizmeneniya tololistovoy zagotovki i povyshenie kachestva trub bolshogo diametra [Usage of mathematical simulation for calculation of conditions plastic deformations for heavy plate billets and quality improvement in large-diameter tubes]. *Chernye metally*, 2018, no. 11, pp. 60–66.

- [7] Korobkov G.E., Yanchushka A.P., Zakiryanov M.V. Numerical modeling of stress-strain state of a gas pipeline with cold bending offsets according to in-line inspection. *Journal of Mining Institute*, 2018, vol. 234, pp. 643–648.
- [8] Sloderbach Z. Generalized model of strains during bending of metal tubes in bending machines. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2014, no. 52 (4), pp. 1093–1106.
- [9] STP 26.260.484–2004. *Termicheskaya obrabotka korroziionnostoykikh staley i splavov na zheleznonikelevoy osnove v khimicheskoy mashinostroyeni* [Heat treatment of corrosion-resistant steels and iron-nickel alloys in chemical engineering]. Moscow, NIIKhIMMASH Publ., 2004, 33 p.
- [10] *Normy rascheta na prochnost oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energostanovok PNAE G-7-002–86* [Standards for calculating the strength of equipment and pipelines of nuclear power plants PNAE G-7-002–86]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989, 525 p.
- [11] Katanakha N.A., Getsov L.B., Danyushevsky I.A., Semenov A.S. Resurs gibov vysokotemperaturnykh truboprovodov [The resource for the bends of high-temperature steampipes]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo politekhnicheskogo universiteta — St. Petersburg State Polytechnical University Journal*, 2013, no. 3 (78), pp. 82–94.

Petrov O.M., Senior Researcher, JSC “RPA “CNIITMASH”. Research interests: fracture mechanics, computational and experimental studies of stress-strain state of the structural elements. Author of 9 scientific publications. e-mail: oleg518@mail.ru

Kazantsev A.G., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of Department, JSC “RPA “CNIITMASH”. Research interests: low-cycle and high-cycle fatigue, fracture mechanics, computational and experimental studies of stress-strain state of the structural elements. Author of more than 200 scientific publications. e-mail: agkazantsev@cniitmash.com