

## 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.

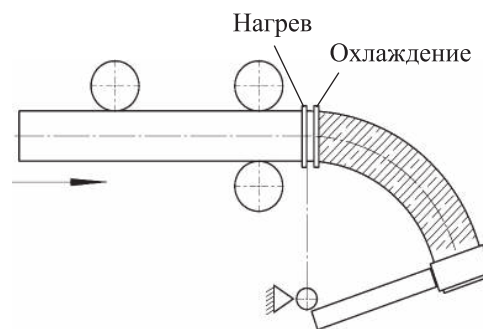


Рис. 1. Схема гибки трубы

**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.

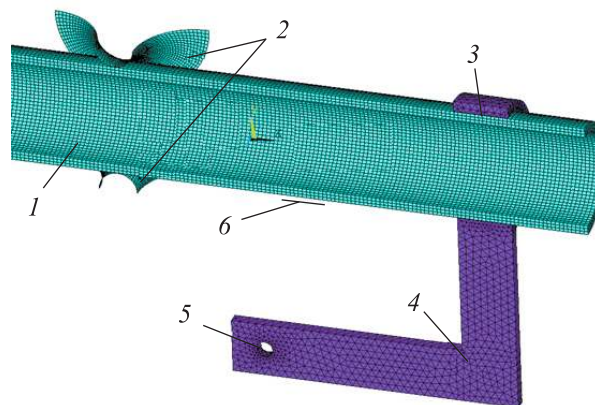


Рис. 2. Конечно-элементная модель оснастки и трубы:

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  $1000^\circ\text{C}$  принята равной 10 мм, причем по обе стороны от зоны с максимальной температурой заданы области с плавным изменением температуры от максимальной до  $20^\circ\text{C}$ .

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.