

Шинкин В.Н. ©

Доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики,
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПРОЧНОСТЬ МЕТАЛЛА ПРИ ЭКСПАНДИРОВАНИИ СТАЛЬНОЙ ЗАГОТОВКИ

Аннотация

Предложен аналитический метод расчета остаточных напряжений листовой заготовки при ее изгибе на трубоформовочном прессе и максимальных напряжений в стенке трубы при экспандировании по технологии JCOE фирмы SMS Meer.

Ключевые слова: стальные сварные трубы большого диаметра, остаточные напряжения, трубоформовочный пресс, экспандер, магистральные трубопроводы.

Keywords: the welded steel major-diameter tubes, the residual stresses, the O-forming press, the expander, the main pipelines.

Производство труб большого диаметра для магистральных трубопроводов. В отечественных магистральных трубопроводах используются трубы большого диаметра – прямошовные, двухшовные и спиральношовные (диаметром до 1420 мм) класса прочности до K65 по стандарту API различного способа изготовления. Новейшими технологиями производства прямошовных одношовных сварных труб большого диаметра 1020 мм, 1220 мм и 1420 мм из сталей класса прочностей K38–K65 и X42–X80, с толщиной стенки до 52 мм и рабочим давлением до 22,15 МПа являются процессы формовки листа по схеме JCOE фирмы SMS Meer [1–48], используемые российскими заводами – АО «ВМЗ», ЗАО «ИТЗ», ОАО «ЧТПЗ», а также заводами Германии и Китая.

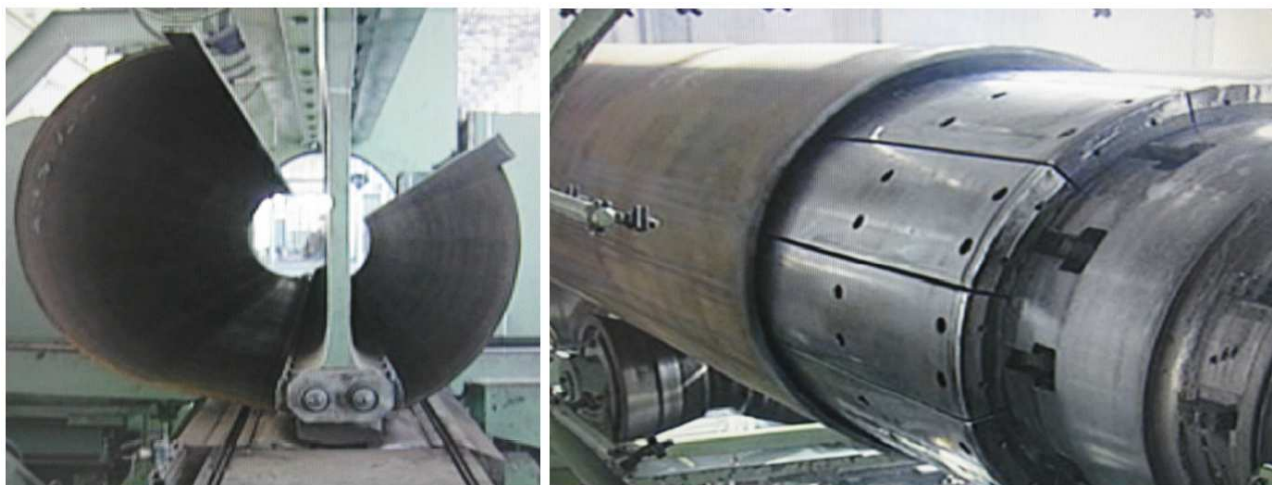


Рис. 1. Трубоформовочный пресс и экспандер SMS Meer

Схема JCOE включает на первой стадии подгибку кромок листовой заготовки с толщиной стенки до 52 мм из стали с пределами текучести и прочности $\sigma_T = 340\text{--}470$ МПа и $\sigma_B = 510\text{--}690$ МПа на кромкогибочном прессе пошаговым способом одновременно с двух сторон. Формовка основной части профиля листовой заготовки осуществляется на трубоформовочном прессе пошаговым способом гибки участков от подогнутых кромок к середине профиля одновременно по всей длине заготовок и обеспечивает получение трубных

заготовок незамкнутого О–профиля (рис. 1). Далее осуществляется сборка трубы с помощью газовой сварки наружного шва трубы и четырех дуговой сварки внутреннего и внешнего швов трубы. После сварки необходимый диаметр трубы и улучшение поперечной округлости трубы достигаются с помощью экспандирования.

Производственные дефекты стального листа и труб. Перед формовкой труб стальной лист правят на листопрямительных машинах [1, 2, 6–12]. Дефект несплавления сварного продольного шва при сборке трубы изучался в работах [1, 2, 29], дефект «точка перегиба» при изгибе трубной заготовки на трубоформовочном прессе – в [1, 2, 31], дефект стального листа раскатной пригар с риской – в [1, 2, 32].

Остаточные напряжения в стенке заготовки после трубоформовочного пресса. Пусть b и h – длина и толщина трубной заготовки, r_n – радиус формовочного ножа трубоформовочного пресса, $\rho = r_n + h/2$ – радиус кривизны нейтральной линии стенки заготовки, σ_T и E предел текучести и модуль Юнга металла.

Изгибающий момент при формовке равен

$$M = \frac{1}{4}bh^2\sigma_T - \frac{1}{3}b\rho^2\frac{\sigma_T^3}{E^2} + \frac{b(\Pi_p + \Pi_c)}{12}\left(\frac{h}{2\rho} - \frac{\sigma_T}{E}\right)\left(h^2 - h\rho\frac{\sigma_T}{E} - 2\rho^2\frac{\sigma_T^2}{E^2}\right),$$

где Π_p и Π_c – модули упрочнения при растяжении и сжатии.

Остаточная радиус кривизны $\rho_{ост}$ заготовки после разгрузки определяется из уравнения

$$\frac{\mu_1}{\rho_{ост}} = \frac{1}{\rho} - \frac{12M}{Eh^3b}.$$

где $\mu_1 = \text{const}$ – коэффициент, учитывающий скорость деформации металла при формовке.

Наибольшие остаточные напряжения равны

$$\sigma_{ост}^1 = \sigma_T + \Pi(\varepsilon_{max} - \varepsilon_T) - \frac{6M}{bh^2} < 0, \quad \sigma_{ост}^2 = \sigma_T - \frac{12M\sigma_T\rho}{bh^3E} > 0.$$

Поперечное сечение бруса делится на две зоны – упругую и пластическую. Величина, определяющая границу этих зон, равна $y_T = \varepsilon_T\rho = \sigma_T\rho/E$. Результаты вычислений показывают, что остаточные напряжения внутри стенки трубы могут достигать 79–81% от предела текучести металла трубы и в 1,63–1,66 раза больше остаточных напряжений на внешней и внутренней поверхностях трубы.

Напряжения в стенке трубы при экспандировании. После формовки на кромкогибочном и трубоформовочном прессах труба имеет недостаточную округлость ее стенки, а «диаметр» трубы на 0,5–1,5 % меньше требуемого. Достижение требуемого диаметра трубы и максимальной ее округлости достигается с помощью технологической операции экспандирования.

Пусть B – ширина листа, $r_{1e} = B/(2\pi)$ – «радиус» нейтральной линии стенки трубы перед экспандированием, r_{2e} – максимальный внутренний радиус трубы при экспандировании и r_{3e} – требуемый внешний радиус трубы после экспандирования ($r_{1e} < r_{3e} < r_{2e}$). Пусть $D_1 = 2r_{1e} + h$ – «диаметр» трубы до экспандирования.

Максимальный внутренний радиус трубы при экспандировании определяется из уравнения:

$$r_{2e} = \frac{\left(\left(\frac{r_{3e} + \sqrt{r_{3e}^2 - 2r_{1e}h}}{2\mu_2 r_{1e}} - 1\right) / \left(1 - \frac{\Pi}{E}\right) + \frac{\sigma_T}{E} + 1\right) r_{1e} - h}{2\left(\left(\frac{r_{3e} + \sqrt{r_{3e}^2 - 2r_{1e}h}}{2\mu_2 r_{1e}} - 1\right) / \left(1 - \frac{\Pi}{E}\right) + \frac{\sigma_T}{E} + 1\right)},$$

где $\mu_2 = \text{const}$ – коэффициент, учитывающий скорость деформации металла при экспандировании.

Максимальные окружные напряжения на нейтральной поверхности трубы только от экспандирования (без учета остаточных напряжений от изгиба заготовки на трубоформовочном прессе) равны

$$\sigma_{\max}^{\text{экс}} = \sigma_{\tau} + \Pi_{\text{п}} \left(\frac{r_{2e} + \sqrt{r_{2e}^2 + 2r_{1e}h} - 2r_{1e}}{2r_{1e}} - \frac{\sigma_{\tau}}{E} \right) > 0.$$

Результаты расчета. Максимальные окружные напряжения в стенке трубы только от экспандирования (без учета остаточных напряжений от формовки заготовки на трубоформовочном прессе) для трубы диаметром $D = 1420$ мм ($r_{3e} = 710$ мм) из листа шириной $B = 4365$ мм ($r_{1e} = 694,7$ мм) с пределом текучести $\sigma_{\tau} = 500$ МПа превышают предел текучести металла. Поэтому внутри стенок экспандируемых труб могут возникать суммарные окружные напряжения (равные сумме нормальных остаточных напряжений от трубоформовочного прессы и окружных нормальных напряжений только от экспандирования) превышающие предел прочности металла трубы $\sigma_{\text{в}}$.

Для рассмотренной выше трубы диаметром $D = 1420$ мм и толщиной стенки $h = 21$ мм из стального листа с пределом текучести $\sigma_{\tau} = 500$ МПа и пределом прочности $\sigma_{\text{в}} = 600$ МПа максимальная сумма остаточных напряжений после трубоформовочного прессы и экстремальных окружных напряжений при экспандировании внутри трубы равна $1,524 \sigma_{\text{в}}$. На внутренней и внешней поверхностях той же трубы максимальные суммарные окружные напряжения соответственно равны $1,254 \sigma_{\text{в}}$ и $0,437 \sigma_{\text{в}}$.

В этом случае максимальные касательные напряжения внутри стенки трубы (на расстоянии u_{τ} от срединной поверхности стенки трубы в сторону ее внешней поверхности) и на ее внутренней поверхности станут больше половины предела прочности металла. По третьей теории прочности внутри стенок таких труб и на их внутренних поверхностях могут образоваться дефекты (отсутствующие на внешних поверхностях труб) – микротрещины и микрорасслоения металла, приводящие к заметному снижению предела выносливости (усталости) металла при циклических нагрузках.

Литература

1. Шинкин В.Н. Сопротивление материалов для металлургов. – М: Изд. Дом МИСиС, 2013. – 655 с.
2. Шинкин В.Н. Механика сплошных сред для металлургов. – М: Изд. Дом МИСиС, 2014. – 628 с.
3. Шинкин В.Н. Сопротивление материалов. Простые и сложные виды деформаций в металлургии. – М: Изд. Дом МИСиС, 2008. – 307 с.
4. Шинкин В.Н. Теоретическая механика для металлургов. – М: Изд. Дом МИСиС, 2012. – 679 с.
5. Буланов Э.А., Шинкин В.Н. Механика. Вводный курс. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 172 с.
6. Шинкин В.Н. Математическая модель правки стальной полосы на пятироликовой листопрямляющей машине фирмы Fagor Arrasate // Молодой ученый. 2015. №8 (88). С. 344–349.
7. Шинкин В.Н. Правка толстой стальной полосы на одиннадцатироликовой листопрямляющей машине линии поперечной резки фирмы Fagor Arrasate // Молодой ученый. 2015. №9 (89). С. 359–365.
8. Шинкин В.Н. Расчет технологических параметров правки тонкой стальной полосы на пятнадцатироликовой листопрямляющей машине фирмы Fagor Arrasate // Молодой ученый. 2015. №10 (90). С. 361–366.
9. Шинкин В.Н. Холодная правка толстого стального листа на девятироликовой машине фирмы SMS Siemag на металлургическом комплексе стан 5000 // Молодой ученый. 2015. №11 (91). С. 467–472.
10. Шинкин В.Н. Четырехроликовый режим холодной правки толстого стального листа на пятироликовой листопрямляющей машине фирмы Fagor Arrasate // Молодой ученый. 2015. №12 (92). С. 356–361.
11. Шинкин В.Н. Упругопластическая деформация металлического листа на трехвалковых вальцах // Молодой ученый. 2015. №13 (93). С. 225–229.
12. Шинкин В.Н. Шестироликовый режим предварительной правки стальной полосы на листопрямляющей машине фирмы Fagor Arrasate // Молодой ученый. 2015. №14 (94). С. 205–211.

13. Шинкин В.Н. Определение критических давлений магистральных газонефтепроводов при частичном несплавлении продольного сварного шва стальных толстостенных труб // Молодой ученый. 2015. №15 (95). С. 222–227.
14. Шинкин В.Н. Критерий разрушения труб при дефекте раскатной пригар // Молодой ученый. 2015. №16 (96). С. 261–265.
15. Шинкин В.Н. Дефект перегиба стальной заготовки на трубоформовочном прессе // Молодой ученый. 2015. №17 (97). С. 318–323.
16. Шинкин В.Н. Подгибка кромок стального листа по эвольвенте // Молодой ученый. 2015. №18 (98). С. 231–237.
17. Шинкин В.Н. Гофр продольной кромки листа при его формовке на кромкогибочном прессе // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. 2009. Вып. 6. С. 171–174.
18. Шинкин В.Н., Уандыкова С.К. Гибка стальной листовой заготовки на кромкогибочном прессе при производстве труб большого диаметра // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. 2009. № 16. С. 110–112.
19. Шинкин В.Н., Коликов А.П. Моделирование процесса формовки заготовки для труб большого диаметра // Сталь. 2011. № 1. С. 54–58.
20. Шинкин В.Н., Коликов А.П. Моделирование процесса пластического формоизменения листовой заготовки для производства труб большого диаметра // Обработка металлов давлением, 2011. № 3(28). С. 7–11.
21. Шинкин В.Н., Коликов А.П. Формовка листовой заготовки в кромкогибочном прессе и условие возникновения гофра при производстве труб магистральных трубопроводов // Производство проката. 2011. № 4. С. 14–22.
22. Шинкин В.Н. Математическое моделирование процессов производства труб большого диаметра для магистральных трубопроводов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. №4 (62). Вып. 4. С. 69–74.
23. Шинкин В.Н., Коликов А.П. Упругопластическое формоизменение металла на кромкогибочном прессе при формовке труб большого диаметра // Сталь. 2011. № 6. С. 53–56.
24. Шинкин В.Н., Коликов А.П. Модель пластического формоизменения кромок листовой заготовки при производстве труб большого диаметра для магистральных трубопроводов // Известия вузов. Черная металлургия. 2011. № 9. С. 45–49.
25. Шинкин В.Н., Коликов А.П. Моделирование процессов экспандирования и гидроиспытания труб большого диаметра для магистральных трубопроводов // Производство проката. 2011. № 10. С. 12–19.
26. Шинкин В.Н., Коликов А.П., Барыков А.М. Технологические расчеты процессов производства труб большого диаметра по технологии SMS Meer // Металлург. 2011. № 11. С. 77–81.
27. Shinkin V.N., Kolikov A.P. Simulation of the shaping of blanks for large-diameter pipe // Steel in Translation. 2011. Vol. 41. No. 1. P. 61–66.
28. Shinkin V.N., Kolikov A.P. Elastoplastic shaping of metal in an edge-ending press in the manufacture of large-diameter pipe // Steel in Translation. 2011. Vol. 41. No. 6. P. 528–531.
29. Шинкин В.Н., Барыков А.М., Коликов А.П., Мокроусов В.И. Критерий разрушения труб большого диаметра при несплавлении сварного соединения и внутреннем давлении // Производство проката. 2012. № 2. С. 14–16.
30. Шинкин В.Н., Коликов А.П., Мокроусов В.И. Расчет максимальных напряжений в стенке трубы при экспандировании с учетом остаточных напряжений заготовки после трубоформовочного пресса SMS Meer // Производство проката. 2012. № 7. С. 25–29.
31. Шинкин В.Н. Критерий перегиба в обратную сторону свободной части листовой заготовки на трубоформовочном прессе SMS Meer при производстве труб большого диаметра // Производство проката. 2012. № 9. С. 21–26.
32. Шинкин В.Н., Мокроусов В.И. Критерий разрыва труб газонефтепроводов при дефекте раскатной пригар с риской // Производство проката. 2012. № 12. С. 19–24.
33. Shinkin V.N., Kolikov A.P. Engineering calculations for processes involved in the production of large-diameter pipes by the SMS Meer technology // Metallurgist. 2012. Vol. 55. Nos. 11–12. P. 833–840.
34. Шинкин В.Н., Федотов О.В. Расчет технологических параметров правки стальной горячекатаной рулонной полосы на пятироликовой машине линии поперечной резки фирмы Fagor Arrasate // Производство проката. 2013. № 9. С. 43–48.

35. Шинкин В.Н., Барыков А.М. Расчет технологических параметров холодной правки стального листа на девятироликовой машине SMS Siemag металлургического комплекса стан 5000 // Производство проката. 2014. № 5. С. 7–15.
36. Шинкин В.Н. Расчет технологических параметров правки стального листа на одиннадцатирولیковой листопрáвильной машине линии поперечной резки фирмы Fagor Arrasate // Производство проката. 2014. № 8. С. 26–34.
37. Шинкин В.Н., Барыков А.М. Расчет формы трубной заготовки при гибке на кромкогибочном и трубоформовочном прессах фирмы SMS Meer при производстве труб большого диаметра по схеме JCOE // Производство проката. 2014. № 12. С. 13–20.
38. Шинкин В.Н., Борисевич В.Г., Федотов О.В. Холодная правка стального листа в четырехроликовой листопрáвильной машине // В сборнике: Глобализация науки: проблемы и перспективы. Том 2. – Уфа: Башкирский государственный университет, 2014. – С. 119–121.
39. Шинкин В.Н. Математическая модель правки тонкого стального листа на пятнадцатирولیковой листопрáвильной машине линии поперечной резки фирмы Fagor Arrasate // Производство проката. 2015. № 1. С. 42–48.
40. Шинкин В.Н., Барыков А.М. Гибка стального листа на трубоформовочном прессе при производстве труб большого диаметра // Сталь. 2015. № 4. С. 38–42.
41. Шинкин В.Н. Производство труб большого диаметра по схеме JCOE фирмы SMS Meer для магистральных трубопроводов // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2015. № 3–1. С. 64–67.
42. Шинкин В.Н. Расчет технологических параметров кромкогибочного пресса фирмы SMS Meer // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2015. № 4–1. С. 114–119.
43. Шинкин В.Н. Математический критерий возникновения гофра при формовке стальной листовой заготовки на кромкогибочном прессе SMS Meer // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2015. № 5–1. С. 96–99.
44. Шинкин В.Н. Расчет усилий трубоформовочного пресса SMS Meer при изгибе плоской толстой стальной заготовки при производстве труб большого диаметра // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2015. № 6–1. С. 115–118.
45. Шинкин В.Н. Оценка усилий трубоформовочного пресса SMS Meer при изгибе стальной цилиндрической заготовки // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2015. № 7–1. С. 74–78.
46. Шинкин В.Н., Барыков А.М. Сила давления пуансона трубоформовочного пресса SMS Meer при изгибе частично изогнутой толстой стальной заготовки // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2015. № 8–1. С. 78–83.
47. Шинкин В.Н., Барыков А.М. Математический критерий перегиба стальной заготовки на трубоформовочном прессе SMS Meer // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2015. № 9–1.
48. Пермичев Н.Ф., Барыков А.М., Палева О.А. Управление инновационным потенциалом предприятия. – Нижний Новгород: Изд. ВВАГС, 2008. – 83 с.