

Шинкин В.Н. ©

Профессор, доктор физ.-мат. наук, кафедра физики,
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ГОФРА ПРИ ФОРМОВКЕ СТАЛЬНОЙ ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ НА КРОМКОГИБОЧНОМ ПРЕССЕ SMS MEER

Аннотация

Получен математический критерий возникновения гофра кромки стального широкого листа на кромкогибочном прессе фирмы SMS Meer при производстве сварных толстостенных одношовных прямошовных труб большого диаметра по схеме JCOE для магистральных газонефтепроводов.

Ключевые слова: труба большого диаметра, стальная листовая заготовка, кромкогибочный пресс.

Keywords: major-diameter pipe, steel blank, flanging press.

На рынке производства стальных сварных труб большого диаметра для магистральных газонефтепроводов утвердился процесс формовки трубной заготовки по схеме JCOE, разработанный фирмой SMS Meer [1–17].

На первой стадии процесса осуществляется подгибка кромок листовой заготовки на кромкогибочном прессе (КГП) пошаговым способом одновременно с двух сторон [1–2, 4–8], показанная на рис. 1, где 1 – листовая заготовка, 2 – пуансон, 3 – матрица, 4 – прижимной упор, 5 – технологическая планка, 6 – направляющий ролик.

Затем идет формовка основной части листовой заготовки на трубоформовочном прессе (ТФП) пошаговым способом от подогнутых кромок к середине заготовки одновременно по всей длине заготовки [1–3, 9–14]. Далее осуществляется сборка трубы с помощью сварки продольного шва трубы. После сварки необходимые диаметр и поперечная округлость трубы достигаются с помощью экспандирования трубы [1, 2, 10, 11, 15, 16]. Затем следуют процессы гидроиспытания трубы [1, 2, 16] и нанесения изоляции на поверхности трубы.

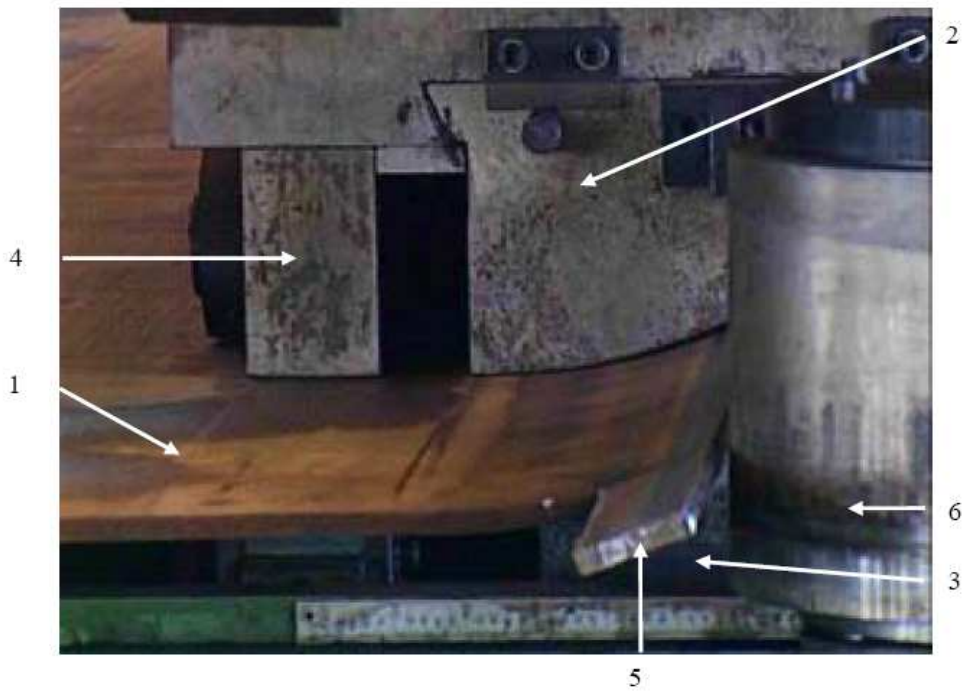


Рис. 1. Деформация листовой заготовки на КГП

Дефект образования гофра продольной кромки трубной заготовки на КГП SMS Meer изучался в работах [1, 2, 5, 9], вредное влияние остаточных напряжений металла после ТФП SMS Meer на процесс экспандирования трубы – в [1, 2, 15], дефект «точка перегиба» при изгибе трубной заготовки на ТФП SMS Meer – в [1, 2, 17], дефект несплавления сварного продольного шва при сборке трубы – в [1, 2, 18], дефект трубы «раскатной пригар с риской» – в [1, 2, 19], процессы правки стального листа на многороликовых листопрямильных машинах SMS Siemag и Fagor Arrasate для производства труб – в [20–23]. Процессы прокатки стального листа для производства труб изучались в работах [24–28].

При формовке стальной листовой заготовки на кромкогибочном прессе в продольном направлении листа из-за разности высот листа в точках его контакта с пуансоном и рольгангом возникают остаточные пластические деформации, которые могут вызвать появление дефекта в виде гофра на участке перехода между шагами. Найдем форму листовой заготовки в продольном направлении в момент ее формовки на КГП (рис. 2).

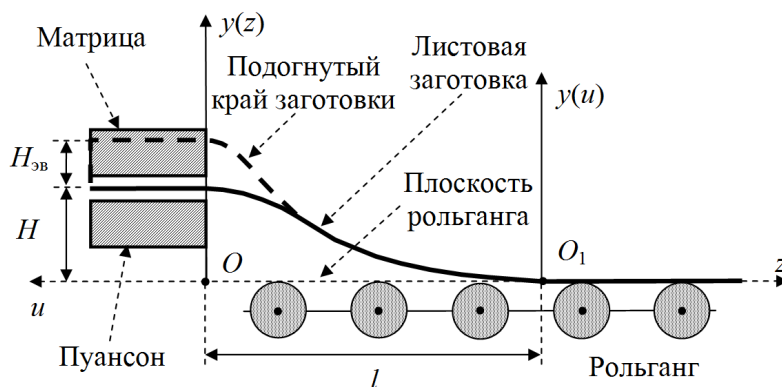


Рис. 2. Форма продольной кромки листовой заготовки на КГП

Пусть H и $H_{эв}$ – продольный перепад высот и высота подгибки боковой кромки листовой заготовки при формовке на КГП, l – неизвестная длина отрыва листа от плоскости рольганга, E – модуль Юнга металла, b и h – ширина и толщина листа, J_x – момент инерции

поперечного сечения листа ($J_x = bh^3/12$), γ – удельный вес стали, $q = \gamma bh$ – погонный вес листа в продольном направлении.

Пусть O_1 – точка отрыва листа от плоскости рольганга в декартовой прямоугольной системе координат O_1u и Oyz : $u = l - z$. Дифференциальное уравнение продольной нейтральной линии листа имеет вид

$$EJ_x \frac{d^4 y(u)}{du^4} = -q,$$

После интегрирования по u с учетом граничных условий

$$y(0) = 0, \quad y(l) = H, \quad \left. \frac{dy(u)}{du} \right|_{u=0} = 0, \quad \left. \frac{dy(u)}{du} \right|_{u=l} = 0,$$

получаем

$$EJ_x \frac{d^2 y(u)}{du^2} = \left(-\frac{ql}{12} + \frac{6EJ_x H}{l^3} \right) + \left(\frac{ql}{2} + \frac{12EJ_x H}{l^3} \right) u - \frac{qu^2}{2} = M_x(u),$$

$$EJ_x \frac{dy(u)}{du} = \left(-\frac{ql}{12} + \frac{6EJ_x H}{l^3} \right) u + \left(\frac{ql}{2} + \frac{12EJ_x H}{l^3} \right) \frac{u^2}{2} - \frac{qu^3}{6},$$

$$EJ_x y(u) = \left(-\frac{ql}{12} + \frac{6EJ_x H}{l^3} \right) \frac{u^2}{2} + \left(\frac{ql}{2} + \frac{12EJ_x H}{l^3} \right) \frac{u^3}{6} - \frac{qu^4}{24},$$

где $M_x(u)$ – изгибающий момент листовой заготовки.

Край недеформируемой части листа, касающийся плоскости рольганга, является прямой линией, поэтому изгибающий момент в точке O_1 отрыва листа от плоскости рольганга равен нулю:

$$M_x(0) = \left(-\frac{ql}{12} + \frac{6EJ_x H}{l^3} \right) = 0,$$

откуда находим длину l отрыва листа от плоскости рольганга:

$$l = \sqrt[4]{\frac{72EJ_x H}{q}}.$$

Учесть эффект подгибки кромок листа в поперечном направлении при формовке можно с помощью введения постоянного безразмерного коэффициента приведенной длины μ , определяемого экспериментальным путем. Переходя от z к u и подставляя l и μ , получаем

$$l = \frac{1}{\mu} \sqrt[4]{\frac{6Eh^2 H}{\gamma}}, \quad y(z) = H \left(1 - \mu z^4 \sqrt{\frac{\gamma}{6Eh^2 H}} \right)^3 \left(1 + 3\mu z^4 \sqrt{\frac{\gamma}{6Eh^2 H}} \right),$$

$$\frac{dy(z)}{dz} = -12H\mu^2 z \sqrt{\frac{\gamma}{6Eh^2 H}} \left(1 - \mu z^4 \sqrt{\frac{\gamma}{6Eh^2 H}} \right)^2,$$

$$\frac{d^2 y(z)}{dz^2} = -12H\mu^2 \sqrt{\frac{\gamma}{6Eh^2 H}} \left(1 - \mu z^4 \sqrt{\frac{\gamma}{6Eh^2 H}} \right) \left(1 - 3\mu z^4 \sqrt{\frac{\gamma}{6Eh^2 H}} \right).$$

Радиус кривизны листа в продольном направлении равен

$$\rho(z) = \frac{\left(1 + \left(\frac{dy(z)}{dz} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}}{\frac{d^2 y(z)}{dz^2}}.$$

Сопротивление деформации стали $\sigma_T^* = \mu_{кпп} \sigma_T$, где σ_T – предел текучести стали, $\mu_{кпп} = \text{const} \approx 1$ – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость деформации заготовки. Остаточные продольные пластические деформации, приводящие к появлению гофра, будут возникать, если нормальные напряжения в продольном направлении листа

достигнут предела текучести σ_T : $\rho \leq \rho_{\text{упр}} = (H_{\text{эв}} + h/2)E/\sigma_T^*$. Поэтому критерий возникновения гофра в продольном направлении листовой заготовки на КГП имеет вид

$$|\rho_{\min}| = |\rho(0)| = \left(12H\mu^2 \sqrt{\frac{\gamma}{6Eh^2H}} \right)^{-1} \leq \rho_{\text{упр}}, \quad H \geq \frac{\sigma_T^{*2} h^2}{24\gamma\mu^4 (H_{\text{эв}} + h/2)^2 E}.$$

Литература

1. Шинкин В.Н. Механика сплошных сред для металлургов. - М: Изд. Дом МИСиС, 2014. - 628 с.
2. Шинкин В.Н. Сопротивление материалов для металлургов. - М: Изд. Дом МИСиС, 2013. □ 655 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. Гофр продольной кромки листа при его формовке на кромкогибочном прессе // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. 2009. Вып. 6. С. 171–174.
5. 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.
6. Шинкин В.Н., Коликов А.П. Упругопластическое изменение металла на кромкогибочном прессе при формовке труб большого диаметра // Сталь. 2011. № 6. С. 53-56.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. Шинкин В.Н., Коликов А.П. Моделирование процесса формовки заготовки для труб большого диаметра // Сталь. 2011. № 1. С. 54–58.
13. 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.
14. 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 JSOE // Производство проката. 2014. № 12. С. 13–20.
15. 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.
16. Шинкин В.Н., Коликов А.П. Моделирование процессов экспандирования и гидроиспытания труб большого диаметра для магистральных трубопроводов // Производство проката. 2011. № 10. С. 12–19.
17. 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.
18. 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.
19. Шинкин В.Н., Мокроусов В.И. Критерий разрыва труб газонефтепроводов при дефекте «раскатной пригар с риской» // Производство проката. 2012. № 12. С. 19-24.
20. Шинкин В.Н., Федотов О.В. Расчет технологических параметров правки горячекатаной рулонной полосы на пятироликовой машине линии Fagor Arrasate // Производство проката. 2013. № 9. С. 43-48.

21. 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.
22. 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.
23. Шинкин В.Н. Математическая модель правки тонкого стального листа на пятнадцатирولیковой листопрáвильной машине линии поперечной резки фирмы Fagor Arrasate // Производство проката. 2015. № 1. С. 42–20.
24. Бельский С.М., Третьяков В.А., Барышев В.В., Кудинов С.В. Исследование процесса формирования ширины сляба в черновой группе широкополосного стана // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1998. № 1. С. 24-29.
25. Скороходов В.Н., Чернов П.П., Мухин Ю.А., Бельский С.М. Математическая модель процесса свободного уширения при прокатке полос // Сталь. 2001. № 3. С. 38–40.
26. Скороходов В.Н., Мухин Ю.А., Бельский С.М., Мазур С.И. Особенности профилировок рабочих валков для клеток с осевой сдвижкой. Сообщение 1 // Производство проката. 2007. № 12. С. 17–19.
27. Скороходов В.Н., Мухин Ю.А., Бельский С.М., Мазур С.И. Особенности профилировок рабочих валков для клеток с осевой сдвижкой. Сообщение 2 // Производство проката. 2008. № 1. С. 21-24.
28. Бельский С.М. О некоторых эффектах применения осевой сдвижки рабочих валков // Производство проката. 2008. № 7. С. 21–24.