

УДК 531

К.Д. Одющина, Т.Е. Мельникова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ФОРМОВАНИИ ТРУБЫ

Исследован процесс формования цилиндрической заготовки с целью проведения анализа изменения напряжений по толщине заготовки в виде металлической ленты при последовательном пластическом ее деформировании гибкой.

Ключевые слова: цилиндрическая заготовка, напряженное состояние, пластическое деформирование.

K.D. Odiushchina, T.E. Mel'nikova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

STUDY OF STRESS-STRAIN STATE OF THE SHEET BILLET IN THE PROCESS OF PIPE FORMING

The process of forming a cylindrical billet in order to analyze stress changes on the thickness of the billet in the form of a metal strip under sequential plastic bending is studied.

Ключевые слова: cylindrical billet, stress-strain state, plastic bending.

Формовка трубной заготовки – сворачивание плоской заготовки (листа, ленты, штрипса) в цилиндрическую оболочку – является одной из основных операций технологического процесса производства сварных труб [1, 2]. По сравнению с другими технологическими операциями процесс формовки заготовки требует значительно меньших затрат энергии и определяет экономичность производства сварных труб.

Рассмотрен процесс холодной формовки трубной заготовки с образованием щели между свариваемыми кромками по образующей цилиндрической формы (обычная формовка), реализованный на непрерывных многоклетевых валковых формовочных станах для получения рулонной заготовки для труб диаметром менее 6–10 мм. При этом процесс формовки трубы осуществлен с учетом того, что профили калибров имели постепенно уменьшающийся радиус.

Процесс формования цилиндрической заготовки исследован с целью анализа изменения напряжений по толщине заготовки в виде металлической ленты при последовательном пластическом ее деформировании гибкой.

Рассмотрен чистый изгиб ленты при наличии больших деформаций под действием изгибающего момента M , распределенного по длине. Расчетная схема задачи представлена на рис. 1. Основные принятые допущения: 1) деформация ленты в направлении, перпендикулярном плоскостям изгиба, отсутствует; 2) упрочнение материала при гибке ленты и упругие деформации не учитывали; 3) при переходе из первого деформированного пластического состояния (сплошные линии на рис. 1) во второе (штриховые линии на рис. 1) деформации и перемещения считали малыми; 4) при изгибе среднее сечение ленты не смещалось, т.е. нижняя точка этого сечения неподвижна.

При чистом изгибе вследствие симметрии нагружения лента изгибается по дуге окружности. На расчетной схеме (см. рис. 1) представлено развитие процесса пластического деформирования ленты при гибке, а именно – два близких состояния деформированной ленты при формовке. Лента имеет следующие параметры поперечного сечения: h_0 – толщина; углами φ или $\varphi + d\varphi$ ограничена ширина. На рис. 1 указана граничная поверхность, разделяющая область поперечного сечения ленты, растянутую в окружном направлении, от области, сжатой в этом направлении. Внутренний и наружный радиусы сечения в первом деформированном состоянии обозначены через r_1 и r_2 , а радиус граничной поверхности – r_0 . Далее через R_1 , R_2 и R_0 обозначены радиусы окружностей, в которые переходят точки окружностей радиусов r_1 , r_2 и r_0 во втором (следующем) деформированном состоянии.

Процесс формовки трубной заготовки является процессом пластического изгиба ленты с постепенно увеличивающейся кривизной; это задача плоской деформации без изменения длины ленты и ширины поперечного сечения. При решении задачи о круговом пластическом изгибе ленты приняты следующие допущения: а) строгая концентричность выпуклой поверхности рассматриваемой части ленты, ее вогнутой поверхности; б) наружная и внутренняя поверхности свободны от воздействия внешних сил; в) материальные элементы в рассматриваемой стадии процессагиба и во всех предшествующих стадиях процесса расположены на общей нормали к поверхности ленты.

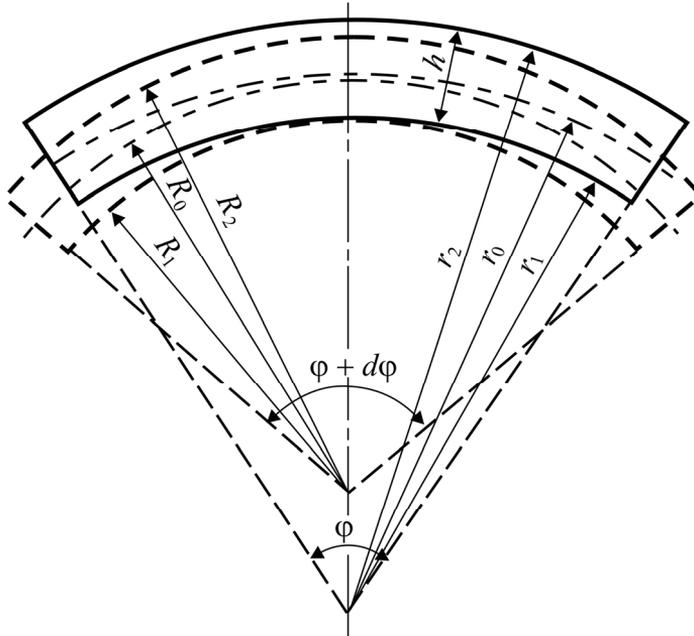


Рис. 1. Расчетная схема изгиба ленты в поперечном направлении

Из симметрии деформации следует, что радиальные и окружные сечения ленты, находящейся в деформированном состоянии, и напряжения в них (окружное, и радиальное) являются главными.

Дифференциальное уравнение равновесия элемента, вырезанного из ленты двумя главными сечениями, имеет вид [3]

$$\frac{d}{dr}(r\sigma_r) - \sigma_t = 0, \quad (1)$$

где r – текущая координата; σ_r , σ_t – соответственно радиальное и окружное напряжение.

Приращения пластических деформаций связаны с напряжениями следующими зависимостями:

$$\begin{aligned} d\varepsilon_r &= \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon_i}{\sigma_i} (\sigma_r - \sigma_0); \\ d\varepsilon_t &= \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon_i}{\sigma_i} (\sigma_t - \sigma_0); \\ d\varepsilon_z &= \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon_i}{\sigma_i} (\sigma_z - \sigma_0), \end{aligned} \quad (2)$$

где σ_i – интенсивность напряжений; $d\varepsilon_i$ – интенсивность приращений пластических деформаций; σ_0 – среднее нормальное напряжение; σ_z – осевое напряжение.

Из расчетной схемы следует, что $d\varepsilon_z = 0$, поэтому из третьей формулы (2) имеем $\sigma_z = \sigma_0$ и для расчета интенсивности напряжений получим соотношение в виде

$$\sigma_i = \pm \frac{\sqrt{3}}{2} (\sigma_t - \sigma_r). \quad (3)$$

Причем знак плюс в формуле (3) соответствует напряжениям, действующим в области, растянутой в окружном направлении, а знак минус – в сжатой. При отсутствии упрочнения напряжения удовлетворяют условию пластичности по формуле

$$\sigma_t - \sigma_r = \pm \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_T, \quad (4)$$

где σ_T – предел текучести материала при растяжении – сжатии.

Из решения уравнения (1) с учетом (3) и (4) получили соотношения, определяющие радиальные и окружные напряжения в растянутой и сжатой областях поперечного сечения в виде:

– при $r_1 \leq r \leq r_0$

$$\sigma_r = -\frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_T \ln \left(\frac{r}{r_1} \right); \quad (5)$$

$$\sigma_t = -\frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_T \left(1 + \ln \left(\frac{r}{r_1} \right) \right); \quad (6)$$

– при $r_0 \leq r \leq r_2$

$$\sigma_r = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_T \ln \left(\frac{r}{r_2} \right); \quad (7)$$

$$\sigma_t = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_T \left(1 + \ln \left(\frac{r}{r_2} \right) \right). \quad (8)$$

В решении учтены краевые условия в виде: при $r = r_1$ $\sigma_r = 0$, при $r = r_2$ $\sigma_r = 0$, при $r = r_0$ $\sigma_{r\text{сж}} = \sigma_{r\text{раст}}$. Последнее краевое условие отражает непрерывность эпюры радиального напряжения по толщине поперечного сечения ленты и равенство его значений на границе сжатой и растянутой в окружном направлении областей.

Используя данное краевое условие, получили формулу для расчета радиуса граничного слоя:

$$r_0 = \sqrt{r_1 \cdot r_2} . \quad (9)$$

Анализ деформированного состояния ленты при пластической деформации и формовке цилиндрической поверхности показал, что для несжимаемого материала приращения окружной деформации определяются по формуле

$$d\varepsilon_r = \frac{1}{2} \frac{d\varphi}{\varphi} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2} \right) \quad (10)$$

и толщина поперечного сечения ленты при изгибе не меняется.

Формулы (5)–(8) позволяют определять напряжения для заданного внутреннего радиуса поперечного сечения деформированной ленты r_1 при известном значении окружной деформации. При этом, поскольку толщина сечения ленты в процессе изгиба постоянна, наружный радиус сечения ленты определяется как $r_2 = r_1 + h_0$.

Зависимость между внутренним радиусом кривизны и деформацией на внутреннем волокне установлена с учетом условия постоянства объема при деформации ленты. Это условие при равенстве осевой деформации нулю сводится к условию постоянства площади сечения ленты, перпендикулярного оси. Таким образом, логарифмическая окружная деформация в точках внутренней поверхности поперечного сечения деформированной ленты определится по формуле

$$\varepsilon_{r1} = \ln \frac{1}{1 + \frac{h_0}{2r_1}} . \quad (11)$$

Расчет напряжений при формовании трубы из ленточной заготовки проведен с применением математического пакета MathCad. Исход-

ные данные: размеры поперечного сечения ленты (20×1 мм). Радиус сформированной трубы – 3 мм (радиус рассчитан из условия того, что граничный слой не деформируется).

По формуле (11) определена максимальная окружная деформация ленты: $\varepsilon_{t1} = -0,154$. Для расчета напряжений выбраны последовательные значения окружной деформации: 1) $\varepsilon_{t1} = -0,038$; 2) $-0,076$; 3) $-0,114$; 4) $-0,154$. Для каждого варианта деформации рассчитаны геометрические параметры деформации поперечного сечения ленты (r_1, r_2, r_0); затем по формулам (5)–(8) рассчитаны напряжения σ_r, σ_t и построены эпюры напряжений по толщине поперечного сечения ленты. Эпюры напряжений для одного из вариантов приведены на рис. 2, 3 (напряжения на графиках приведены в условных единицах – безразмерных).

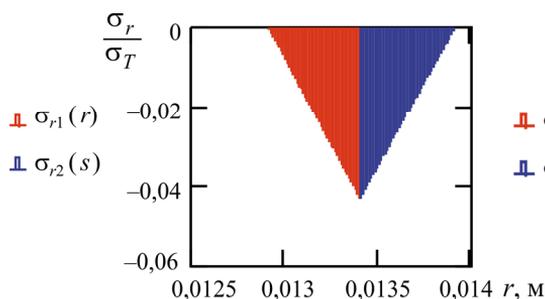


Рис. 2. Эпюра радиальных напряжений при формовке трубы (данные расчета по варианту деформации № 1)

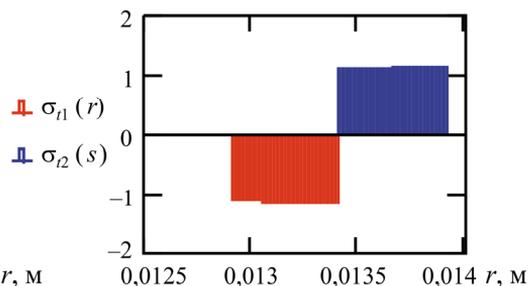


Рис. 3. Эпюра окружных напряжений при формовке трубы (данные расчета по варианту деформации № 1)

Таким образом, исследовано напряженное состояние при изгибе металлической ленты с целью получения цилиндрической заготовки. Получены эпюры радиального и окружного напряжений по толщине поперечного сечения ленты при изгибе с различной степенью деформации.

Анализ полученных результатов показал, что окружные напряжения претерпевают разрыв на граничной поверхности с радиусом r_0 , а радиальное напряжение в области граничной поверхности имеет существенное значение.

Задача расчета напряженного состояния при изгибе ленты с целью формовки цилиндрической поверхности требует уточнения, так как в решении не учитывалось влияние температуры, скорости деформации, упрочнение материала и другие параметры.

Список литературы

1. Килов А.С., Килов К.А. Производство заготовок. Листовая штамповка: учеб. пособие: в 6 кн. Кн. 2. Получение заготовок из листового материала / Оренбург. гос. ун-т. – Оренбург, 2004. – 182 с.
2. Трубное производство / Б.А. Романцев, А.В. Гончарук, Н.М. Вавилкин, С.В. Самусев. – М.: Изд. дом МИСиС, 2011. – 970 с.
3. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести: учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
4. Кирьянов Д.В. Самоучитель Mathcad 13. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 528 с.

References

1. Kilov A.S, Kilov K.A. Proizvodstvo zagotovok. Listovaia shtampovka. Kniga 2. Poluchenie zagotovok iz listovogo materiala [Manufacture of performs. Stamping. Book 2. Preparation of blanks of sheet material]. Orenburg: Orenburgskii gosudarstvennyi universitet, 2004. 182 p.
2. Romantsev B.A., Goncharuk A.V., Vavilkin N.M., Samusev S.V. Trubnoe proizvodstvo [Pipe production]. Moscow: MISiS, 2011. 970 p.
3. Malinin N.N. Prikladnaia teoriia plastichnosti i polzuchesti [Applied theory of plasticity and creep. Textbook for universities]. Moscow: Mashinostroenie, 1975. 400 p.
4. Kir'ianov D.V. Samouchitel' Mathcad 13 [Tutorial Mathcad 13]. Saint-Petersburg: BHV-Peterburg, 2006. 528 p.

Об авторах

Одющина Ксения Дмитриевна (Пермь, Россия) – студентка Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: elesonchupa@mail.ru).

Мельникова Татьяна Евгеньевна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Динамика и прочность машин» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: taevmel@gmail.com).

About the authors

Kseniia D. Odiushhina (Perm, Russian Federation) – Student, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: elesonchupa@mail.ru).

Tat'iana E. Mel'nikova (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Dynamics and Strength of Machines, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: taevmel@gmail.com).