

РАСЧЕТ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ГИБКИ НА УЧАСТКЕ ПРОИЗВОДСТВА СВАРНЫХ ТРУБ ДЛЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Жигулев Г.П., к.т.н., доцент

Самусев С.В., д.т.н., профессор

Фадеев В.А., инженер (fdv_viktor@mail.ru)

Файзулаев Ф.Х., магистрант

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

Аннотация. Предложена методика учета полей скоростей и контактного взаимодействия в расчетах энергосиловых параметров на примере анализа процесса подгибки кромок листовых заготовок на прессах. По результатам расчета максимальных усилий гибки показана возможность использования формул для инженерных расчетов.

Ключевые слова: трубы, кромка, подгибка, усилия, деформация.

Современные способы производства сварных труб для магистральных трубопроводов включают следующие производственные участки с оборудованием: прессы для подгибки кромок листовой заготовки; прессы для пошаговой формовки участков заданных размеров по ширине до получения готового шелевого профиля; сборочно-сварочные станы для сборки профиля с заданной овальностью под сварку; гидромеханические экспандеры для пошагового формоизменения входящей овальной заготовки до готового размера трубы.

В основу всех деформационных процессов формоизменения листовой заготовки на производственных участках действующих линий ТЭСА заложены разнообразные процессы гибки. Многообразию технологических возможностей процессов гибки соответствует высокопроизводительное оборудование участков, реализующих фиксированную поэтапную гибку – формовку в профилированных валках – штампах или свободную гибку на специализированных прессах.

В данной работе использован метод верхней оценки, основанный на построении кинематически возможных полей скоростей, который относится к числу вариационных методов. Исходные предпосылки метода, основные расчетные уравнения и принципы построения кинематически возможных полей скоростей в различных условиях деформации представлены в работах [1, 2].

Применение вышеуказанного метода для участка подгибки кромок линии ТЭСА позволяет учитывать особенности кинематики частиц и контактного взаимодействия трубной заготовки с деформирующим инструментом в процессе подгибки. В противном случае происходит резкое завышение результатов расчета.

Согласно этому методу предварительно очаг деформации разбивается на жесткие блоки в соответствии с известными картинами макротечения. Принимается, что деформация в очаге происходит только за счет сдвигов по контактными поверхностям смежных жестких блоков.

Кроме условия несжимаемости, в данном методе применяется принцип минимума мощности пластической деформации. После составления уравнения мощности пластической деформации, в которое входят неизвестные или варьируемые параметры, их значения определяются в результате поиска минимума функционала мощности. К таким неизвестным параметрам могут относиться как параметры, связанные с направлениями или значениями скоростей, а так и любые геометрические параметры, связанные с формой очага деформации. После минимизации мощности и нахождения неизвестных значений варьируемых параметров, которые соответствуют минимуму мощности, можно считать, что полученные решения приближаются к действительным, что способствует повышению точности результатов.

Мощность внешних сил W или энергия, вносимая инструментом в деформируемую заготовку, расходуется на преодоление внутренних сил W_i , определяемых сопротивлением пластической деформации заготовки, и сил трения $W_{тр}$:

$$W = W_i + W_{тр}.$$

При поступательном движении инструмента со скоростью V_0 и усилием P мощность внешних сил W равна

$$W = PV_0.$$

Мощность внутренних сил и сил трения определяет- ся полем скоростей в очаге деформации в общем случае по уравнениям:

$$W_i = \int_v \tau_b S_b dV + \int_{f_{ij}} \tau_s V_{i,j} df_{i,j};$$

$$W_{тр} = \int_{i,k} \tau_{i,k} V_{i,k} df_{i,k},$$

где τ_b , S_b – интенсивности касательных напряжений и скорости деформации сдвига; $V_{i,j}$, $V_{i,k}$ – скорости относительного перемещения на поверхностях разрыва внутри заготовки $f_{i,j}$ и на поверхности инструмента $f_{i,k}$; τ_s , $\tau_{i,k}$ – касательные напряжения на поверхностях $f_{i,j}$, $f_{i,k}$ соответственно.

Для идеально жесткопластического материала без упрочнения [1]

$$\tau_e = \tau_r = 0,5\sigma_s = \text{const},$$

где τ_e – интенсивность касательных напряжений; τ_r – касательные напряжения на контактных поверхностях смежных жестких блоков; σ_s – предел текучести мате- риала заготовки.

Контактное напряжение $\tau_{i,k}$ приближенно можно определить через коэффициент пластического трения $\mu_{i,k}$, который изменяется в пределах 0 – 0,5:

$$\tau_{i,k} = 2\mu_{i,k}\sigma_s.$$

Для расчета усилия P получим следующее уравнение:

$$P = \frac{\tau_b}{V_0} \left(\int_v S_b dV + \int_{f_{i,j}} V_{i,j} df_{i,j} + \int_{f_{i,k}} 2\mu_{i,k} V_{i,k} df_{i,k} \right).$$

Для полей скоростей из жестких блоков при усло- вии, что деформация осуществляется за счет сдвигов между блоками, в которых однородное поле скоростей, характерна простота расчетов. Поскольку на любой поверхности сдвигов $f_{i,j}$ разность касательных состав- ляющих скоростей $V_{i,j}$ по всей поверхности $f_{i,j}$ имеет постоянное значение, первый интеграл превращается в ноль, а два других могут быть заменены на суммы:

$$P = \frac{\tau_b}{V_0} \left(\sum_{i,j} f_{i,j} V_{i,j} + \sum_{i,k} 2\mu_{i,k} f_{i,k} V_{i,k} \right). \quad (1)$$

Суммирование в правой части уравнения должно быть проведено по всем поверхностям разрыва скорости.

Как показывает уравнение (1), при определении мощности и усилий внешних сил необходимо опре- делить кинематически возможное поле скоростей из жестких блоков. Затем определить сумму произведений

площадей контакта смежных блоков на скорости их от- носительного перемещения (разрывы скоростей). В об- щем случае поверхности разрыва скоростей могут быть не только плоскими, но и криволинейными, например, цилиндрическими.

Модель процесса подгибки на кромкогибочном прессе (КГП) кромки листовой заготовки сечением $f_0 = Bh$ (B – шаг подачи на КГП, h – толщина трубной заготовки) может быть представлена множеством по- следовательных локальных гибов за счет изгибающего момента $M_{и}$, возникающего при движении нижнего ин- струмента со скоростью V_m (рис. 1, 2).

Производственные эксперименты [3, 4], а также мо- делирование в среде DEFORM [5] показали (см. рис. 2), что такое предположение вполне обосновано, так как нижний подвижный инструмент (матрица) в течение всего времени движения имеет контакт с заготовкой, близкий к точечному в месте приложения силы (точ- ке A). В процессе нагружения при подгибке кромки на расстоянии $(0,25 - 0,30)L_{кр}$ от зоны прижима заготовка начинает отрываться от поверхности пуансона и имеет изменяющейся точечный контакт с его поверхностью. При этом точка контакта перемещается вдоль поверх- ности пуансона при дальнейшем нагружении.

В конце нагружения по видам износа [4] поверх- ность контактного взаимодействия верхнего непод- вижного инструмента (пуансона) с заготовкой состоит из трех участков. Первый контактный участок длиной $(0,25 - 0,30)L_{кр}$ примыкает к плите прижима. Второй участок с менее изношенной рабочей поверхностью пуансона длиной $(0,5 - 0,6)L_{кр}$ не контактирует с заго- товкой. Заготовка на этом участке во время локального изгиба отрывается от поверхности пуансона. Об этом свидетельствует поле скоростей V_y [5]. Отрыв заготовки от пуансона находится на участке, где векторы скорос- тей V_y направлены вниз (см. рис. 2). Размер плоского контактного участка в конце нагружения составляет $(2,1 - 2,5)h$.

При изгибе листовой заготовки процесс можно рас- сматривать как локальные вращения жесткой зоны 2 (см. рис. 1) относительно деформированной зоны 1 за счет появления пластического шарнира. Такая модель позволяет сравнительно просто найти мощность де- формации, а затем и усилия в зависимости от длины остающейся недеформированной части заготовки.

Мгновенные кинематически возможные поля ско- ростей при локальных гибох трубной заготовки вдоль рабочей поверхности верхнего инструмента можно представить состоящими из двух зон: подвижной (2) и неподвижной (1). Подвижная зона (2) поворачивается относительно зоны (1) с угловой скоростью ω по ци- линдрической поверхности предполагаемого пластичес- кого шарнира с радиусом R . На рис. 1 показана дуга CB длиной L_d пластического шарнира, а координаты цент- ра шарнира лежат на нейтральной (серединной) линии сечения изгибаемой кромки. В этом случае размер B ,

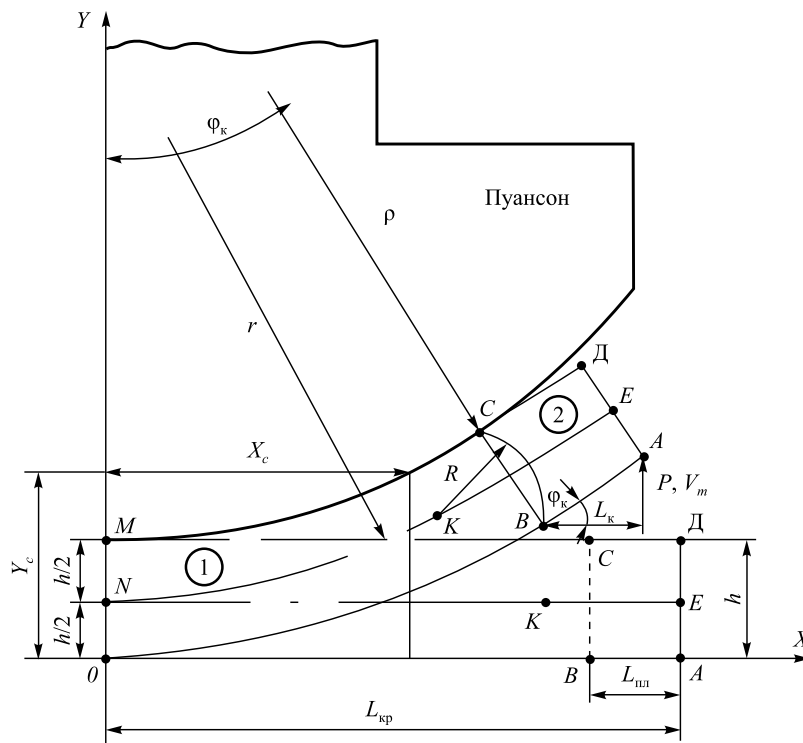


Рис. 1. Схема подгибки кромки на прессе

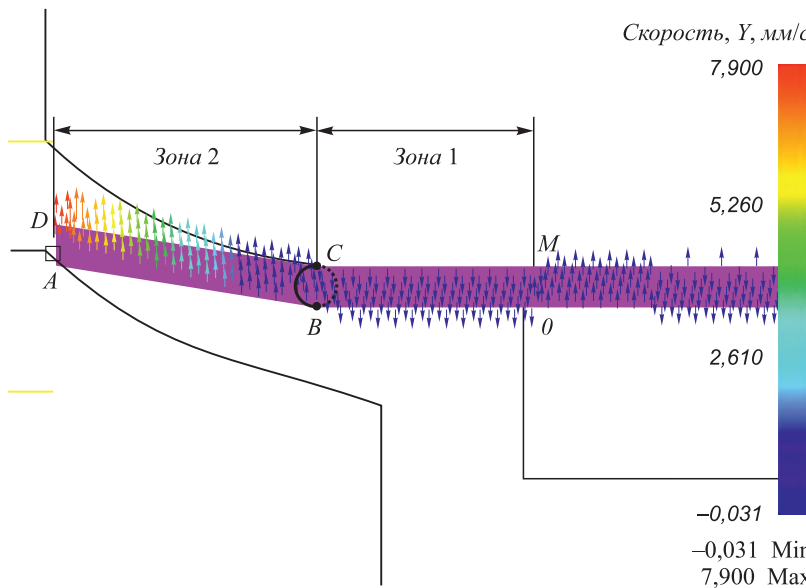


Рис. 2. Мгновенное поле скоростей V_y при подгибке кромки [5]

перпендикулярный плоскости рисунка, равен шагу подгибки, и тогда площадь пластического шарнира $f_{1,2} = BL_d$.

Длина дуги окружности пластического шарнира $L_d = 2R \arcsin(h/2R)$. Мгновенные скорости перемещения частиц на поверхности пластического шарнира $V_{1,2} = \omega R$. Из условия равенства мощности внешних и внутренних сил получим следующее уравнение:

$$M_{ш} \omega = \tau_r f_{1,2} V_{1,2} = 2\tau_r \omega BR^2 \arcsin\left(\frac{h}{2R}\right). \quad (3)$$

Для плоской деформации интенсивность касательных напряжений $\tau_\epsilon = \tau_r / \sqrt{3}$. Значение R может быть определено из условия экстремума $dM_{ш}/dR = 0$, откуда $R = 0,55h$.

С учетом найденного значения R величина изгибающего момента при локальных гibaх вдоль профиля верхнего инструмента постоянна при движении нижнего инструмента и $M_{ш} = 0,66\tau_r Bh^2$.

С другой стороны $M_{ш} = P_i L_x$, где L_x – длина плеча приложения силы. Для определения промежуточных значений величины усилия P_i , развиваемого на нижнем

инструменте при подгибке кромки, необходимо определить после разгрузки величину плеча L_x для текущего значения угла изгиба φ_i .

Производственные эксперименты показали, что при подгибке кромки на КГП всегда после разгрузки на кромке появляется плоский участок, который деформируется упруго и длина которого равна приблизительно $L_{пл} = (2,1 - 2,5)h_0$. Поэтому максимальное усилие подгибки рассчитывается для конечного этапа, когда $L_x = L_k$, а значение $P_{max} = M_{и}/L_k$.

Для конечной стадии подгибки при расчете усилия можно принять, что $L_k = L_{пл} \cos \varphi_k$. Значение конечного угла подгибки φ_k определяется для нейтральной линии заготовки:

$$\varphi_k = \frac{L_{кр} - L_{пл}}{R_p + 0,5h} \quad (4)$$

Проверочные расчеты представлены для трубы 1420×45 при значениях $\sigma_t = 580$ Н/мм², длине кромки $L_{кр} = 435$ мм, шаге подачи $B = 3590$ мм, скорости нижнего инструмента $V_0 = 8$ м/с, величине радиуса верхнего инструмента $R_p = 665$ мм. Результаты расчета: $M_{и} = 1,391$ МН·м. При длине плеча $L_x = 117$ мм, усилие $P = 11,8$ МН. При $L_x = 88,4$ мм $P = 15,75$ МН. При $L_x = 76$ мм усилие $P = 18,3$ МН.

Для определения максимального усилия подгибки расчет необходимо остановить при $L_x = L_k = 88,4$ мм. В этом случае усилие подгибки кромки составит $P = 15,75$ МН. Длина плоского участка заготовки после разгрузки кромки будет равна $L_{пл} = 100$ мм. Общая формула расчета P_{max} :

$$P_{max} = 0,66 \tau_t \frac{Bh^2}{L_{пл} \cos \left(\frac{L_{кр} - L_{пл}}{R_p + 0,5h} \right)} \quad (5)$$

Предварительно, например для корректировки значения τ_e , необходимо определить величину деформации в наружных и внутренних волокнах, которые должны быть выше деформаций, соответствующих σ_t (0,22 %) на кривой упрочнения металла трубной заготовки. Для рассматриваемого случая (труба 1420×45) деформации в поверхностных волокнах при подгибке кромки трубной заготовки примерно равны 3,273 % > 0,22 %. Поэтому разработанную по методу верхней оценки модель деформации для жестко-пластической среды можно применять для процесса подгибки кромок на кромкогибочном прессе на длине участка заготовки, равной разности значений $L_{кр} - L_{пл}$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Джонсон В., Кудо Х. Механика процесса выдавливания металла. – М.: Металлургия, 1985.
2. Алюшин Ю.А. Метод верхней оценки и его применение при решении задач обработки металлов давлением. – Ростов-на-Дону: РИСХМ, 1977. – 75 с.
3. Самусев С.В., Люскин А.В., Романцов А.И. и др. // Изв. вуз. Черная металлургия. № 3. 2013. С. 20 – 22.
4. Самусев С.В., Товмасын М.А., Хлыбов О.С. и др. // Производство проката. 2014. № 2. С. 40 – 42.
5. Самусев С.В., Жигулев Г.П., Романцов А.И., и др. // Тр. Междунар. форума «Инженерные системы – 2012». Инжиниринговая компания «ТЕСИС». – М.: Макс Пресс, 2012. С. 209 – 213.

© 2014 г. Жигулев Г.П., Самусев С.В.,
Фадеев В.А., Файзулаев Ф.Х.
Поступила 23 апреля 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA – FERROUS METALLURGY. 2014. No. 7. Vol. 57, pp. 39–42.

CALCULATION OF ENERGY-POWER PARAMETERS OF BENDING PROCESS IN PRODUCTION OF WELDED PIPES FOR GAS PIPELINES

Zhigulev G.P., Cand. Eng., Assist. Professor
Samusev S.V., Dr. Eng., Professor
Fadeev V.A., Engineer (fdv_viktor@mail.ru)
Faizulaev F.H., Master student

National Research Technological University MISIS (Leninskii pr., 4, Moscow, 119049, Russia)

Abstract. The authors suggested the technique of application of velocity fields and contact interaction in the calculation of energy-power parameters based on the analysis of the process of hemming the edges of sheet blanks on presses. The calculation of maximum bending efforts demonstrates the ability to use formulas for engineering calculations.

Keywords: pipes, edge, bending, efforts, deformation.

REFERENCES

1. Johnson W., Kudo H. *The mechanics of metal extrusion*. Manchester University Press, 1962, 226 p. (Russ. ed.: Johnson W., Kudo H. *Mekhanika protsessa vydavlivaniya metalla*. Moscow: Metallurgiya, 1985).

2. Alyushin Yu.A. *Metod verkhnei otsenki i ego primenenie pri reshenii zadach obrabotki metallov davleniem* [Upper bound method and its application in solving the problems of metal forming]. Rostov-on-Don, RISKhM, 1977. P.75. (In Russ.).
3. Samusev S.V., Lyuskin A.V., Romantsov A.I. etc. Development of the methodology for calculating the parameters of the instrument to unify groups of welded pipe at section of edge bending press. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. No. 3, 2013. Pp. 20–22. (In Russ.).
4. Samusev S.V., Tovmasyan M.A., Khlybov O.S. etc. Application of photogrammetry and laser scanning for 3D-profile measuring of instrument for edge bending press line TESA 1420. “Vyksa Steel Works”. *Proizvodstvo prokata*. No. 2, 2014, pp. 40–42. (In Russ.).
5. Samusev S.V., Zhigulev G.P., Romantsov A.I. etc. Kinematic parameters of elastoplastic deformation in bending the marginal portions of plates based on modeling system DEFORM 2D-3D. *Trudy Mezhunarodnogo foruma “Inzhenernye sistemy – 2012”. Inzhiniringovaya kompaniya “TESIS”* [Proceedings of the International Forum “Engineering Systems -2012”, Engineering company “Tesis”]. Moscow: Maks Press, 2012. Pp. 209–213. (In Russ.).

Received April 23, 2014