

## ДЕФОРМАЦИОННЫЕ И КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВАЛЬЦЕВОЙ ФОРМОВКИ

А.В. Выдрин<sup>1, 2</sup>, Я.Е. Залавин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> АО «Русский научно-исследовательский институт трубной промышленности»  
(АО «РусНИТИ»), г. Челябинск, Россия,

<sup>2</sup> Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

В настоящее время изготовление труб большого диаметра выполняют на трубосварочных агрегатах с применением прессовой либо вальцевой формовки. В обоих случаях имеет место неравномерность напряженно-деформированного состояния трубной заготовки после формовки, что приводит к снижению геометрических параметров готовых труб и образованию остаточных технологических напряжений в трубах. В случае вальцевой формовки для получения заготовки монотонной кривизны применяют синхронное вращение валков и погружение верхнего валка. Данная технология является относительно новой и не имеет полноценного теоретического описания. На основе энергетического подхода получено уравнение энергобаланса процесса формовки в вальцах и предложена методика расчета усилия формовки. В выражения для расчета усилия формовки входят такие параметры, как сопротивление металла пластической деформации,  $h$  – толщина листа;  $L$  – межосевое расстояние нижних валков;  $R_m$  – радиус заготовки после формовки;  $R_n$  – радиус нижнего валка;  $V_n$  – скорость вертикального перемещения верхнего валка;  $V_b$  – скорость вращения валков;  $\mu$  – коэффициент трения. Также получены зависимости для расчета длины дуги контакта между заготовкой и верхним валком и предложена методика расчета величины погружения верхнего валка. Проверочный расчет параметров формовки проводился для заготовки радиусом 300 мм, толщиной 18 мм и с пределом текучести  $\sigma_T = 520$  МПа. Зависимости изменения усилия формовки от параметра  $R_m$  представлены графически и согласуются с данными реального процесса. Полученные аналитические зависимости позволяют прогнозировать рабочие нагрузки на валки при заданных настройках листогибочной машины и типоразмере трубы, что позволит избежать поломок элементов привода валков и аварийных отключений агрегата.

*Ключевые слова:* вальцовая формовка, энергобаланс, работа формовки, мощность, усилие изгиба, поле скоростей, глубина погружения.

Одним из современных способов производства труб большого диаметра является вальцевая формовка [1].

В технологических линиях с применением вальцевой формовки для получения трубной заготовки под сварку лист вначале изгибают в трехвалковых вальцах до заданного радиуса, затем выполняют догибку плоских участков в клетки догибки кромок, после чего выполняется сборка трубы и наложение технологического шва [2, 3].

В процессе вальцевой формовки основным настроечным параметром, определяющим радиус заготовки на выходе из очага деформации, является глубина погружения верхнего валка [4].

Одним из основных преимуществ вальцевой формовки перед другими способами является более равномерное распределение деформаций по периметру сечения трубы, полу-

чаемое благодаря непрерывности процесса гибки. Тем не менее участки поперечного сечения трубной заготовки, примыкающие к недеформированным прямолинейным участкам, имеют радиус, отличающийся от радиуса готовой трубы.

С целью получения равномерного распределения деформаций в поперечном сечении заготовки в начале прохода погружение верхнего валка целесообразно производить одновременно с вращением валков [5].

Глубина погружения верхнего валка должна удовлетворять двум условиям:

- создать необходимый резерв мощности для пластического изгиба листа;
- обеспечить необходимый радиус трубной заготовки.

Для определения параметров процесса, удовлетворяющим этим условиям, воспользуемся расчетной схемой, представленной на рис. 1.

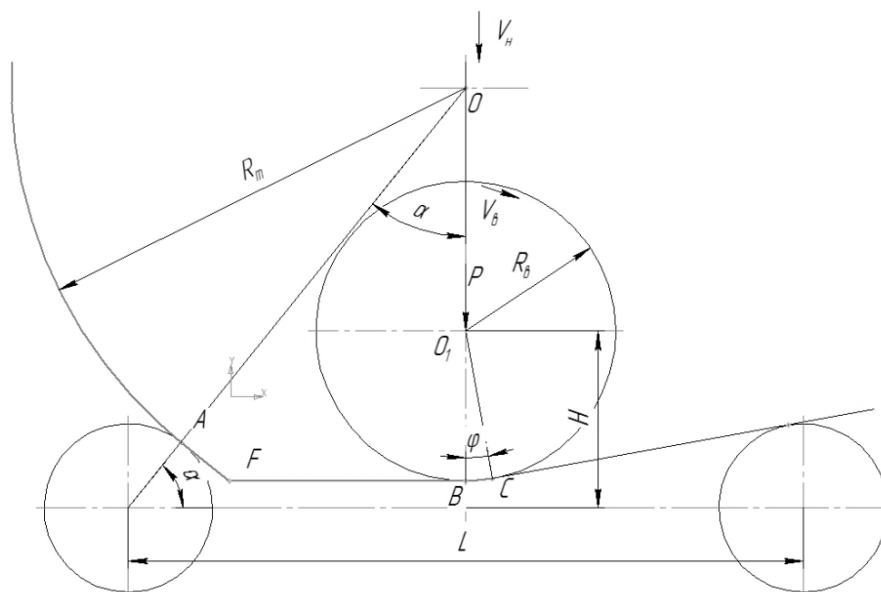


Рис. 1. Расчетная схема формовки

При построении расчетной схемы приняты следующие допущения.

1. Центр окружности трубной заготовки радиусом  $R_m$  лежит на вертикальной оси симметрии (точка  $O$ ).

2. Неизвестная заранее кривизна листа на участке  $AB$  между точками контакта с верхним и нижним валком линейаризуется и представляется ломаной линией  $AFB$ . Точка перегиба  $F$  является точкой пересечения касательной к поверхности нижнего левого валка в точке  $A$  и касательной к поверхности верхнего валка в точке  $B$ .

3. Прогиб листа под действием сил тяжести на участке между точками касания с верхним и нижним правым валком отсутствует.

В качестве теоретической базы для методики расчета параметров процесса целесообразно использовать энергостатический метод [6], который успешно применяется для анализа процессов производства бесшовных труб [7].

Рассмотрим методику определения глубины погружения  $H$ , обеспечивающую получение заготовки с заданным радиусом  $R_m$ .

Запишем уравнение баланса мощности процесса с учетом сделанных допущений.

1. Мощность в рассматриваемую систему подводится за счет перемещения верхнего валка в вертикальном направлении со скоростью  $V_u$ . Эта мощность равна

$$N_p = PV_u, \quad (1)$$

где  $P$  – сила, действующая на валок при его погружении.

2. Мощность в рассматриваемую систему подводится за счет вращения верхнего валка с угловой скоростью  $\omega$ . Эта мощность равна

$$N_M = M\omega, \quad (2)$$

где  $M$  – момент, подводимый к верхнему валку.

С учетом того, что действие равно противодействию, подводимый к валу момент равен моменту сопротивления вращению, создаваемому силами трения  $T$  на дуге  $BC$ . Следовательно,

$$M = T \cdot R_b. \quad (3)$$

Примем, что силы трения подчиняются закону Амонтона – Кулона [8, 9] и равнодействующая вертикальной нагрузки приложена в середине дуги  $BC$ . Тогда

$$M = R_b \cdot \mu \cdot P \cos \frac{\psi}{2}, \quad (4)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения; величина угла  $\psi$  заранее не известна.

3. Мощность в рассматриваемой системе затрачивается на изгиб листа в точке  $F$  на угол  $\alpha$ . При этом меняется направление вектора скорости при неизменном его уровне (рис. 2).

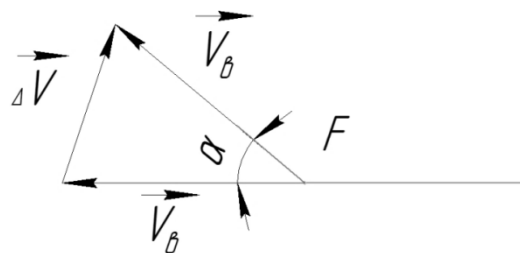


Рис. 2. Схема изменения вектора скорости

Как видно из рис. 2, в процессе изгиба происходит поворот вектора скорости  $\vec{V}_B$  со скоростью  $\Delta\vec{V}$ . Нетрудно заметить, что скорость поворота будет равна

$$\Delta\vec{V} = 2V_B \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (5)$$

В свою очередь,

$$\sin \alpha = \frac{L}{2(R_m + R_n)}, \quad (6)$$

где  $R_n$  – радиус нижнего вала.

Значит,

$$\Delta V = \frac{V_B L}{2(R_m + R_n)}. \quad (7)$$

Поворот вектора скорости происходит под действием сил.

Поскольку изменение углов вызывается касательными напряжениями и в рассматриваемом случае имеет место пластический изгиб, касательные напряжения должны быть равны сопротивлению металла пластической деформации сдвига  $\tau_s$  [10]. Это напряжение действует на площади, равной произведению толщины листа ( $h$ ) на его ширину. Если для удобства принять ширину листа равной единице, то мощность, затрачиваемая на изгиб, будет равна

$$N_n = \frac{1}{2} \tau_s h \frac{V_B L}{(R_m + R_n)}. \quad (8)$$

С учетом сделанных выкладок уравнение баланса мощности запишется в виде

$$P V_n + \mu \frac{V_B}{R_n} \cdot R_n \cdot P \cdot \cos \frac{\psi}{2} = \frac{1}{2} \tau_s h \frac{V_B L}{(R_m + R_n)}, \quad (9)$$

отсюда усилие, действующее на верхний валок, равно

$$P = \frac{\tau_s h L}{(R_m + R_n) \left( \frac{V_n}{V_B} + \mu \cos \frac{\psi}{2} \right)}. \quad (10)$$

Полученные уравнения содержат две неизвестных величины:  $P$  – усилие, действующее на верхний валок, и  $\psi$  – угол, определяющий длину дуги контакта листа с верхним валком.

Следует отметить, что только с помощью геометрических построений величину угла  $\psi$  определить нельзя, так как длина дуги контакта, величину которой он определяет, должна обеспечить достаточный резерв сил трения для продвижения и изгиба листа на участке  $AB$ . Следовательно, для решения задачи необходимо привлечь еще одно уравнение физического характера.

4. Рассмотрим условия равновесия сил участка листа  $AC$ .

Расчетная схема представлена на рис. 3.

В этом случае условие равновесия проекций сил на ось  $ox$  примет вид

$$Q_x + P_x - T_x = 0, \quad (11)$$

или

$$Q \sin \alpha + P \sin \frac{\psi}{2} - T \cos \frac{\psi}{2} = 0, \quad (12)$$

где  $Q$  – реакция нажимного вала;  $T$  – сила трения, действующая на контакте с верхним валком.

Если принять за основу закон трения Амонтона – Кулона, получим

$$Q \sin \alpha + P \sin \frac{\psi}{2} - P \mu \cos \frac{\psi}{2} = 0. \quad (13)$$

Условие равновесия проекций сил на ось  $oy$  примет вид

$$Q_y - P_y - T_y = 0, \quad (14)$$

или

$$Q \cos \alpha + P \cos \frac{\psi}{2} - P \mu \sin \frac{\psi}{2} = 0. \quad (15)$$

5. Запишем основную систему уравнений:

$$\begin{cases} P = \frac{\tau_s h L}{(R_m + R_n) \left( \frac{V_n}{V_B} + \mu \cos \frac{\psi}{2} \right)}; \\ Q \sin \alpha + P \sin \frac{\psi}{2} - P \mu \cos \frac{\psi}{2} = 0; \\ Q \cos \alpha + P \cos \frac{\psi}{2} - P \mu \sin \frac{\psi}{2} = 0. \end{cases} \quad (16)$$

Записанная система из четырех уравнений содержит четыре неизвестных величины:  $P, Q_1, Q_2, \psi$ . Следовательно, поскольку число

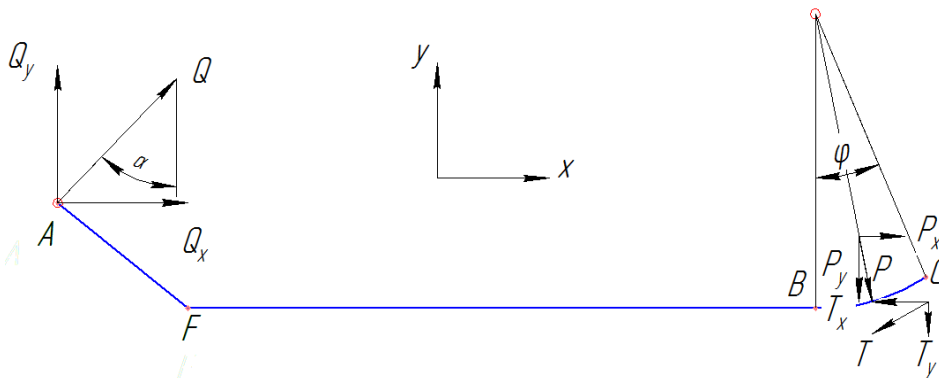


Рис. 3. Расчетная схема

## Обработка металлов давлением...

уравнений равно количеству неизвестных, теоретически она может быть решена.

Введем обозначение  $\sin \frac{\psi}{2} = z$ . Тогда

$$\cos \frac{\psi}{2} = \sqrt{1 - z^2}.$$

С учетом этого первое уравнение системы запишется следующим образом:

$$P = \frac{\tau_s h L}{(R_m + R_H) \left( \frac{V_H}{V_B} + \mu \sqrt{1 - z^2} \right)}. \quad (17)$$

Из второго уравнения системы имеем:

$$Q \sin \alpha = \mu P \sqrt{1 - z^2} - Pz; \quad (18)$$

$$Q = \frac{P(\mu \sqrt{1 - z^2} - z)}{\sin \alpha}. \quad (19)$$

Подставим этот результат в последнее уравнение системы:

$$P \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} - P \sqrt{1 - z^2} - \mu Pz = 0; \quad (20)$$

$$P \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} (\mu \sqrt{1 - z^2} - z) - P \sqrt{1 - z^2} - \mu Pz = 0; \quad (21)$$

$$P [(\mu \sqrt{1 - z^2} - z) \operatorname{ctg} \alpha - \sqrt{1 - z^2} - \mu z] = 0. \quad (22)$$

Поскольку при пластическом изгибе  $P \neq 0$ , справедливо

$$(\mu \sqrt{1 - z^2} - z) \operatorname{ctg} \alpha - \sqrt{1 - z^2} - \mu z = 0. \quad (23)$$

Решая уравнение относительно параметра  $z$ , находим:

$$z = \pm \frac{\mu \operatorname{ctg} \alpha - 1}{\sqrt{\mu(\mu + \operatorname{ctg} \alpha) + \operatorname{ctg}^2 \alpha + 1}}. \quad (24)$$

6. Подставим выражение (24) в формулу (17). В результате получим зависимость для определения усилия погружения верхнего валка

$$P = \frac{\tau_s h L}{2(R_m + R_H) \left[ \frac{V_H}{V_B} + \mu \sqrt{1 - \frac{1}{(\mu \operatorname{ctg} \alpha - 1)^2 + 1}} \right]} = \frac{\tau_s h L}{2(R_m + R_H) \left[ \frac{V_H}{V_B} + \frac{\mu(\mu + \operatorname{ctg} \alpha)}{\sqrt{(\mu + \operatorname{ctg} \alpha)^2 + (\mu \operatorname{ctg} \alpha - 1)^2}} \right]}. \quad (25)$$

С учетом того, что

$$\sin \alpha = \frac{L}{2(R_m + R_H)}, \quad (26)$$

имеем

$$\operatorname{ctg} \alpha = \sqrt{4 \left( \frac{R_m + R_H}{L} \right)^2 - 1}. \quad (27)$$

7. Определяем из физических условий величину угла  $\psi$

$$\psi = 2 \arcsin \frac{\mu \operatorname{ctg} \alpha - 1}{\sqrt{\mu(\mu + \operatorname{ctg} \alpha) + \operatorname{ctg}^2 \alpha + 1}}. \quad (28)$$

После этого величина внедрения верхнего валка, обеспечивающая формирование цилиндрической обечайки радиусом  $R_m$ , может быть найдена с помощью простых геометрических соотношений.

С этой целью воспользуемся расчётной схемой, представленной на рис. 4.

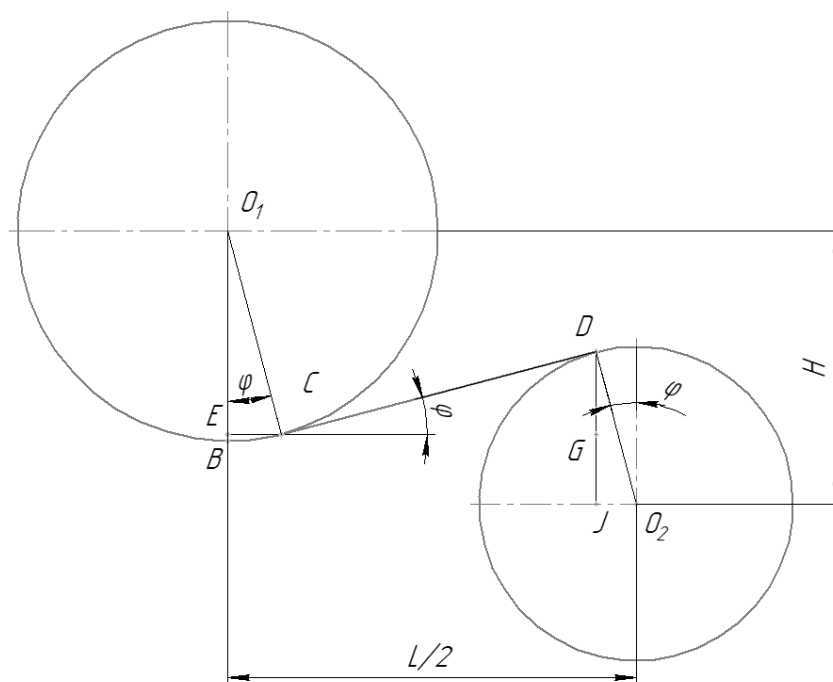


Рис. 4. Расчётная схема глубины погружения верхнего валка

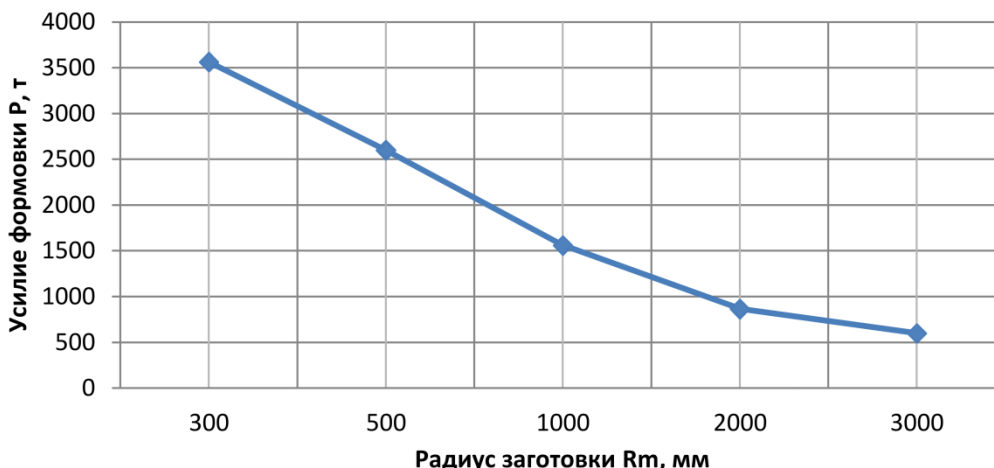


Рис. 5. Изменение усилия формовки в зависимости от радиуса заготовки

Из расчетной схемы (см. рис. 4) видно:

$$H = O_1B + GJ; \quad (29)$$

$$O_1E = R_B \cos \psi; \quad (30)$$

$$GJ = DJ - DG; \quad (31)$$

$$DJ = R_H \cos \psi; \quad (32)$$

$$DG = CG \operatorname{tg} \psi; \quad (33)$$

$$CG = \frac{L}{2} - R_B \sin \psi - R_H \sin \psi = \frac{L}{2} - (R_B + R_H) \sin \psi. \quad (34)$$

Таким образом, имеем:

$$DG = \left[ \frac{L}{2} - (R_B + R_H) \sin \psi \right] \operatorname{tg} \psi; \quad (35)$$

$$GJ = R_H \cos \psi - \left[ \frac{L}{2} - (R_B + R_H) \sin \psi \right] \operatorname{tg} \psi; \quad (36)$$

$$H = R_B \cos \psi + R_H \cos \psi - \left[ \frac{L}{2} - (R_B + R_H) \sin \psi \right] \operatorname{tg} \psi =$$

$$= (R_B + R_H) \cos \psi - \left[ \frac{L}{2} - (R_B + R_H) \sin \psi \right] \operatorname{tg} \psi. \quad (37)$$

Построим график зависимости  $P(R_m)$  (рис. 5). Примем для материала листа предел текучести  $\sigma_m = 520 \frac{H}{\text{мм}^2}$ ; толщину листа  $h = 18$  мм, межцентровое расстояние валков  $L = 600$  мм, радиусы нижнего и верхнего валков соответственно  $R_H = 250$  мм,  $R_B = 150$  мм, коэффициент трения  $\mu = 0,3$ .

Из графика видно, что с ростом радиуса кривизны заготовки при постоянных  $h, \sigma_m, L, R_H, R_B, \mu$  усилие формовки убывает, что согласуется с общими представлениями об упруго-пластическом изгибе стальной полосы в вальцах.

### Литература

1. Коликов, А.П. *Обработка металлов давлением: теория процессов трубного производства* / А.П. Коликов, Б.А. Росманцев, А.С. Алещенко. – М.: Издат. дом НИТУ «МИСиС», 2019. – 502 с.
2. *Технология и оборудование трубного производства* / В.Я. Осадчий, А.С. Вавилин, В.Г. Зимовец, А.П. Коликов. – М.: Интермет инжиниринг, 2001. – 608 с.
3. Серебряков, А.В. *Технология производства сварных труб: учеб. пособие* / А.В. Серебряков, Д.А. Павлов. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2020. – 104 с.
4. Мошин, Е.Н. *Гибка и правка на ротационных машинах* / Е.Н. Мошин. – М.: Машиностроение, 1967. – 269 с.
5. Ильичев, В.Г. *Технологические особенности и резервы улучшения геометрических характеристик при вальцевой формовке заготовки для труб большого диаметра* / В.Г. Ильичев, Я.Е. Залавин // *Сталь*. – 2016. – № 1. – С. 32–35.
6. Дукмасов, В.Г. *Математические модели и процессы прокатки профилей высокого качества* / В.Г. Дукмасов, А.В. Выдрин. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. – 215 с.
7. Al-Jumali, M.J. *Elaboration of a digital model for estimation of power parameters in a continuous rolling mill* / M.J. Al-Jumali, A.V. Vydrin, Ye.A. Shkuratov // *AIP Conference Proceeding (American Institute of Physics)*. – Vol. 2213, 2020.
8. Грудев, А.П. *Внешнее трение при прокатке* / А.П. Грудев. – М.: Металлургия, 1973. – 288 с.

9. Боуден, Ф.П. Трение и смазка твердых тел: моногр. / Ф.П. Боуден, Д. Тейбор; пер. с англ. под ред. д-ра техн. наук И.В. Крагельского. – М.: Машиностроение, 1968. – 544 с.

10. Выдрин, А.В. Теория пластической деформации металлов и сплавов / А.В. Выдрин. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2020. – 218 с.

**Выдрин Александр Владимирович**, д-р техн. наук, профессор, заместитель генерального директора по научной работе, АО «Русский научно-исследовательский институт трубной промышленности» (АО «РусНИТИ»), г. Челябинск; профессор кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; vydrinav@rosniti.ru.

**Залавин Яков Евгеньевич**, начальник сектора технологии формовки труб, АО «Русский научно-исследовательский институт трубной промышленности» (АО «РусНИТИ»), г. Челябинск; zalavin@rosniti.ru.

*Поступила в редакцию 26 марта 2021 г.*

---

DOI: 10.14529/met210205

## DEFORMATION AND KINEMATIC PARAMETERS OF ROLL FORMING

**A.V. Vydrin**<sup>1, 2</sup>, vydrinav@rosniti.ru,

**Ya.E. Zalavin**<sup>1</sup>, zalavin@rosniti.ru

<sup>1</sup> The Russian Research Institute of the Tube & Pipe Industries, Joint Stock Company (RusNITI JSC), Chelyabinsk, Russian Federation,

<sup>2</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

Currently, the manufacture of large-diameter pipes is performed on pipe-welding units using press or roll forming. In both cases, there is an unevenness of the stress-strain state of the pipe billet after forming, which leads to a decrease in the geometric parameters of the finished pipes and the formation of residual technological stresses in the pipes. In the case of roll forming, synchronous rotation of the rolls and immersion of the upper roll are used to obtain a blank of monotonic curvature. This technology is relatively new and does not have a full theoretical description. On the basis of the energy approach, the equations of the energy balance of the forming process in rollers are obtained and a method for calculating the forming force is proposed. The expressions for calculating the forming force include such parameters as: resistance of the metal to plastic deformation, sheet thickness, the center distance of the lower rolls, the radius of the workpiece after forming, radius of the lower roll; speed of vertical movement of the upper roll, the rotation speed of the rolls, is the coefficient of friction. Also, the dependences for calculating the length of the arc of contact between the workpiece and the upper roll were obtained, and a method for calculating the amount of immersion of the upper roll was proposed. The verification calculation of the forming parameters was carried out for a billet with a radius of 300 mm, a thickness of 18 mm, and with a yield point 520 MPa. The dependences of the change in the forming force and on the radius of the workpiece are presented graphically and are consistent with the data of the real process. The obtained analytical dependences make it possible to predict the working loads on the rolls at the given settings of the bending machine and the standard size of the pipe, which will avoid breakdowns of the roll drive elements and emergency shutdowns of the unit.

*Keywords: roll forming, energy balance, forming work, power, bending force, velocity field, immersion depth.*

## References

1. Kolikov A.P., Rosmantsev B.A., Aleshchenko A.S. *Obrabotka metallov davleniyem: teoriya protsessov trubnogo proizvodstva* [Metal forming by pressure: theory of pipe production processes]. Moscow, Publishing house of NUST "MISiS", 2019. 502 p.
2. Osadchiy V.Ya., Vavilin A.S., Zimovets V.G., Kolikov A.P. *Tekhnologiya i oborudovaniye trubnogo proizvodstva* [Technology and equipment for pipe production]. Moscow, Intermet inzhiniring Publ., 2001. 608 p.
3. Serebryakov A.V., Pavlov D.A. *Tekhnologiya proizvodstva svarnykh trub: uchebnoye posobiye* [Welded pipe production technology]. Ekaterinburg, Ural Federal University Publ., 2020. 104 p.
4. Moshnin E.N. *Gibka i pravka na rotatsionnykh mashinakh* [Bending and straightening on rotary machines]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1967. 269 p.
5. Il'ichev V.G., Zalavin Ya.E. [Technological features and reserves for improving geometric characteristics during roll forming of billets for large diameter pipes]. *Steel*, 2016, no. 1, pp. 32–35. (in Russ.)
6. Dukmasov V.G., Vydrin A.V. *Matematicheskiye modeli i protsessy prokatki profiley vysokogo kachestva* [Mathematical models and processes of high quality rolling profiles]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2002. 215 p.
7. Al-Jumali M. J., Vydrin A.V., Shkuratov Ye.A. Elaboration of a digital model for estimation of power parameters in a continuous rolling mill. *AIP Conference Proceeding (American Institute of Physics)*. Vol. 2213, 2020.
8. Grudev A.P. *Vneshneye treniye pri prokatke* [External rolling friction]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1973. 288 p.
9. Bowden F.P., Tabor D. *Reviewed the Friction and Lubrication of Solids*. Oxford University Press, New York, 1950. 337 p.
10. Vydrin A.V. *Teoriya plasticheskoy deformatsii metallov i splavov* [The theory of plastic deformation of metals and alloys]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2020. 218 p.

Received 26 March 2021

## ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Выдрин, А.В. Деформационные и кинематические параметры вальцевой формовки / А.В. Выдрин, Я.Е. Залавин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 51–57. DOI: 10.14529/met210205

## FOR CITATION

Vydrin A.V., Zalavin Ya.E. Deformation and Kinematic Parameters of Roll Forming. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 51–57. (in Russ.) DOI: 10.14529/met210205