

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ ВЫСОКОЙ ПОЛОСЫ С МАЛЫМИ ОБЖАТИЯМИ

Е.А. Шкуратов, А.В. Выдрин

Проведено теоретическое исследование процесса обжатия высокой полосы и разработана математическая модель. Модель определения усилия получена с помощью метода линий скольжения и экспериментальных данных. Сравнение расчетных и экспериментальных результатов показывает высокую точность разработанной математической модели усилия прокатки.

Ключевые слова: прокатка, высокая полоса, линии скольжения.

Большинство из существующих в настоящее время зависимостей для определения усилия прокатки выведены из предположения о том, что пластическая деформация проникает на всю глубину деформируемой полосы в геометрическом очаге деформации. В то же время на практике применяются процессы прокатки с малыми обжатиями (например, обжатие кромок полосы при производстве толстых листов), когда это условие не соблюдается.

Наиболее подходящим методом определения усилия, в данном случае, является метод линий скольжения [1]. Данный метод применяется для решения плоских и осесимметричных задач. Однако он имеет свои недостатки, один из которых заключается в неоднозначности построения сетки линий скольжения.

Поэтому для построения достоверной математической модели процесса прокатки высокой полосы с малыми обжатиями проведено экспериментальное исследование по определению фактической формы очага деформации.

Для изучения характера пластической деформации в эксперименте использовались свинцовые заготовки с нанесенной на боковую поверхность координатной сеткой. Ограничились сеткой с квадратной ячейкой размером 2 мм.

Прокатку образцов осуществляли с обжатиями 2; 5; 10; 16 % с двойной кратностью повторения опытов. При этом также фиксировали усилие прокатки.

С целью повышения точности результатов координатная сетка, полученная на недокатах, сканировалась и затем обрабатывалась на компьютере с использованием приложения КОМПАС-3D. В итоге были определены для разных обжатий фактические границы очага деформации, представленные на рис. 1.

По результатам эксперимента также можно определить зависимость глубины проникновения пластической деформации от степени обжатия.

График зависимости степени проникновения пластической деформации от величины относительного обжатия для условий эксперимента, представлен на рис. 2.

Как видно на рис. 1 и 2 пластическая деформация не проникает на всю глубину при обжатии до 5 %, но следует отметить, что при обжатии от 5 % до 16 % пластическая деформация проникает на всю глубину лишь частично.

Решение задачи методом линий скольжения начинается с построения сетки линий скольжения [2]. В общем случае, сетку линий скольжения с учетом экспериментальной информации можно представить так, как показано на рис. 3.

Выполненные экспериментальные исследования позволили конкретизировать форму сетки линий скольжения для случая процесса прокатки с обжатиями до 5 %.

При построении сетки линий скольжения учитывались граничные условия на линии АЕ [2]:

$$\varphi = \psi \pm \frac{1}{2} \arccos \frac{f_{\tau}}{\tau_s} + m\pi; \quad (1)$$

$$\sigma = f_n + \tau_s \sin 2(\varphi - \psi),$$

где φ – угол между касательной к линии скольжения и осью Ox ; ψ – угол между нормалью к рассматриваемой границе и осью Ox ; f_{τ} – касательное напряжение на рассматриваемой границе; f_n – нормальное напряжение на рассматриваемой границе; τ_s – сопротивление деформируемого металла пластической деформации сдвига.

На первом шаге построения рассчитывается положение точки C_2 , характеризующей положение нейтрального сечения. Для первого приближения воспользуемся зависимостью Эжелунда – Павлова [3]:

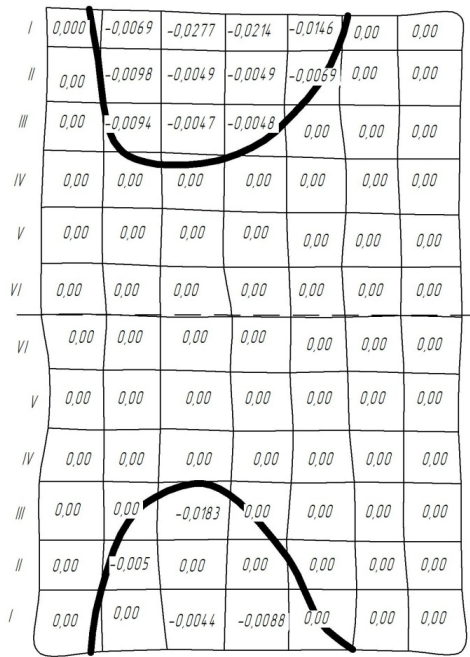
$$\gamma = \frac{\alpha_0}{2} \left(1 - \frac{\alpha_0}{\mu} \right), \quad (2)$$

где μ – коэффициент трения; α_0 – угол захвата, рад.

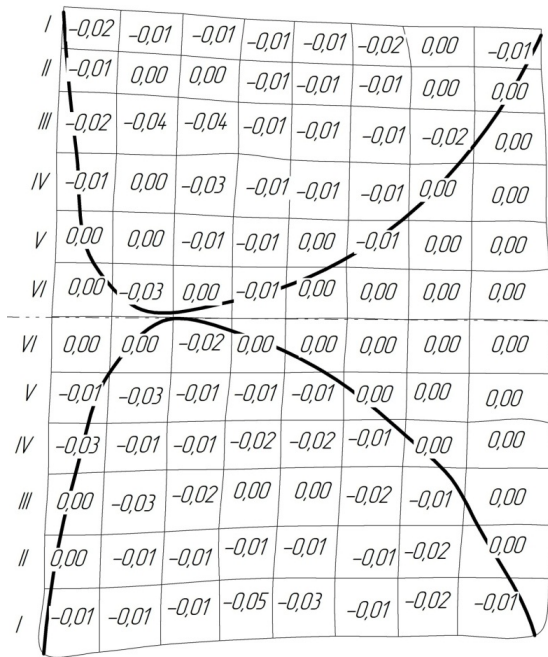
$$\alpha_0 = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}, \quad (3)$$

где Δh – абсолютное обжатие, мм; R – радиус валков, мм.

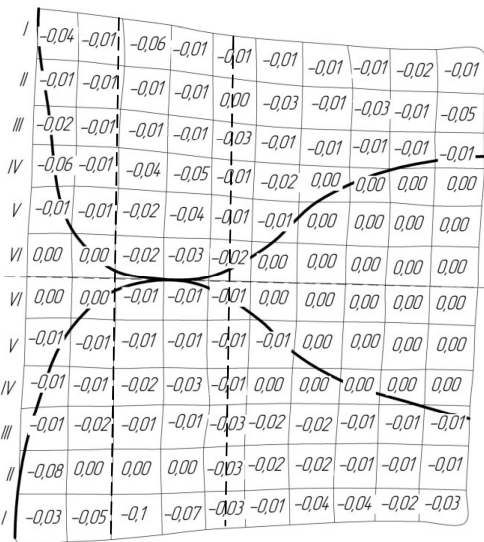
Угол между нормалью к рассматриваемой границе и осью Ox может быть определен как:



а)



б)



в)



г)

Рис. 1. Форма очага деформации при прокатке полосы при обжатии 2 % (а), 5 % (б), 10 % (в), 16 % (г)

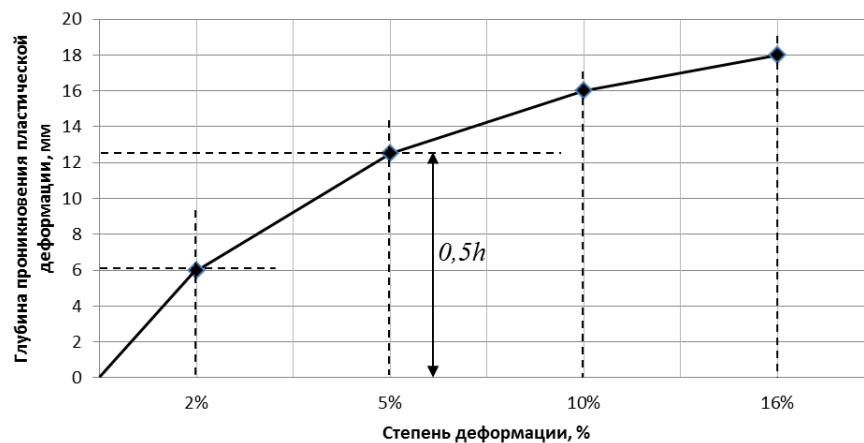


Рис. 2. Зависимость глубины проникновения пластической деформации от обжатия

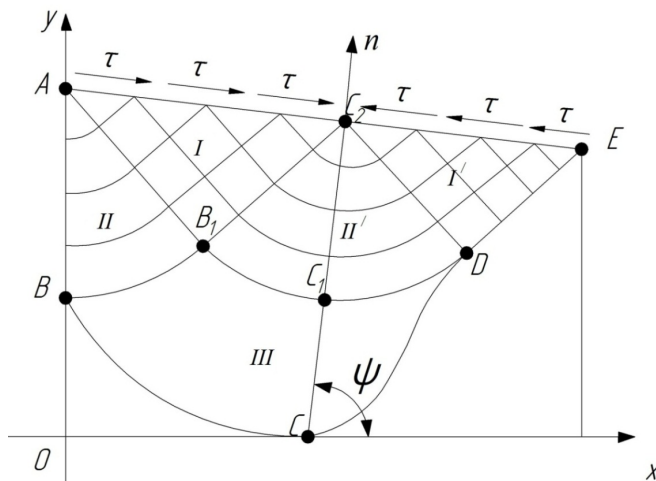


Рис. 3. Сетка линий скольжения

$$\psi = \frac{\pi}{2} - \alpha_k = \frac{\pi}{2} - \text{arctg} \left(\frac{\Delta h}{2l_{\text{о.д}}} \right), \quad (4)$$

где $l_{\text{о.д}}$ – длина очага деформации, мм; α_k – угол конусности, рад.

На втором шаге ведется расчет основных углов сетки линий скольжения (рис. 4):

$$\angle B_1AC_2 = \varphi_{\text{от}} - \alpha_k = \psi - \frac{1}{2} \arccos \mu - \alpha_k, \quad (5)$$

где $\varphi_{\text{от}}$ – угол между касательной к линии скольжения и осью Ox , рассматриваемый для зоны отставания.

$$\angle C_2ED = \varphi_{\text{оп}} - \alpha_k = \psi + \frac{1}{2} \arccos \mu + \alpha_k, \quad (6)$$

где $\varphi_{\text{оп}}$ – угол между касательной к линии скольжения и осью Ox , рассматриваемый для зоны опережения.

Угол раскрытия центрированного веера:

$$\Theta = \pi - (\alpha_1 + \alpha_2) = \pi + \psi - \frac{1}{2} \arccos \mu - \psi - \frac{1}{2} \arccos \mu = \pi - \arccos \mu. \quad (7)$$

Согласно сетке линий скольжения, представленной на рис. 3, для области I-I' решается смешанная задача, для области II-II' – вырожденная задача Римана, для области III – задача Римана.

После построения сетки линий скольжения строится математическая модель на основе решения стандартных задач, указанных выше. Для этого определяется напряженное состояние в каждой точке.

Осуществим переход от точки B к точке B_1 вдоль семейства линии скольжения семейства αBB_1 . Согласно уравнению Генки, можно записать [2]:

$$\sigma_B - 2\tau_s \varphi_B = \sigma_{B_1} - 2\tau_s \varphi_{B_1}. \quad (8)$$

В точке B_1 и соответственно во всей области AB_1C_2 среднее нормальное напряжение будет равно:

$$\sigma = -\tau_s (1 + \psi - \arccos \mu). \quad (9)$$

С другой стороны, согласно граничным условиям AC_2 среднее нормальное напряжение в треугольнике AB_1C_2 будет равно:

$$\sigma = f_n + \tau_s \sin(\varphi - \psi). \quad (10)$$

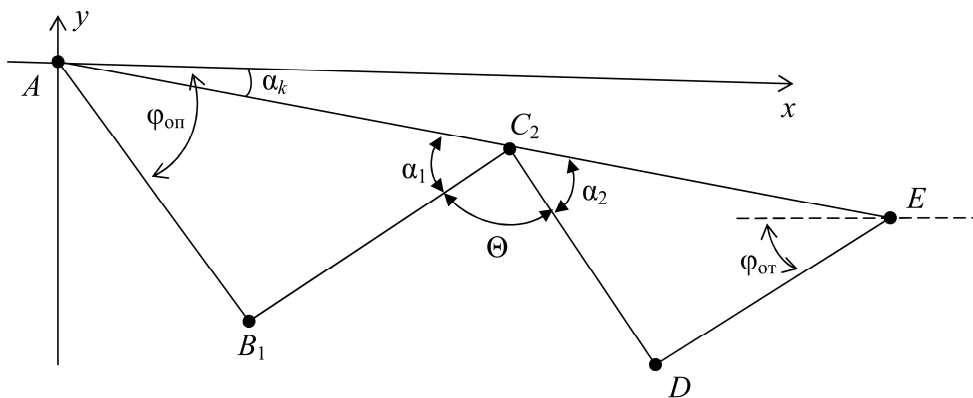


Рис. 4. К определению углов сетки линий скольжения

Решая совместно уравнения (9) и (10), получим нормальное напряжение на границе АС₂, равное

$$f_n = -\tau_s [\sin(\varphi - \psi) + (1 + \psi - \arccos \mu)]. \quad (11)$$

Аналогичным образом осуществляются переходы для других областей (точек).

Касательную составляющую усилия (напряжение трения) предпочтительнее задавать с помощью формулы Зибеля:

$$f_\tau = \mu \tau_s, \quad (12)$$

где μ – коэффициент трения.

На основе всех выкладок модель определения усилия примет вид:

$$P = \left[\left(-0,58\sigma_s \left[\sin \left(-\frac{1}{2} \arccos \mu - \alpha_k \right) + \left(1 + \frac{\pi}{2} - \arctg \left(\frac{\Delta h}{2l_{o,d}} \right) - \arccos \mu \right) \right] \right)^2 + (0,58\sigma_s \mu)^2 \right]^{0,5}. \quad (13)$$

В таблице приведено сравнение результатов расчета по формуле (13) с экспериментальными данными.

Поставленный эксперимент позволил изучить форму, а также изменение формы очага деформации при различных назначенных режимах. Метод линий скольжения позволил теоретически получить модель усилия, которая подтвердилась проведенным экспериментом; сравнение расчетных и экспериментальных значений представлено в таблице и на рис. 5. На рис. 6 показаны экспериментальные значения энергосиловых параметров прокатки I образца при обжатии 2 %.

Выводы

1. Экспериментальные исследования показали, что при степенях обжатия высокой полосы, не превышающих 5 %, пластическая деформация не проникает на всю глубину листа по толщине.

2. Для определения усилий, возникших при прокатке высоких полос с малыми обжатиями, предложено использовать метод линий скольжения. Погрешность расчетов по математической модели, построенной на основе этого метода, не превышает 7 %.

3. Полученные данные могут быть использованы при проектировании технологии и оборудования для обжатия кромок листа в линии станов горячей прокатки.

Расчетное и экспериментальное значение усилия

Параметр	Степень деформации			
	2 %	5 %	10 %	16 %
$P_{\text{расч}}$, кН	1,133	1,62	2,112	2,511
$P_{\text{эксп}}$, кН	1,12	1,50	1,79	2,24
Δ , %	1,17	7,4	15,2	10,8

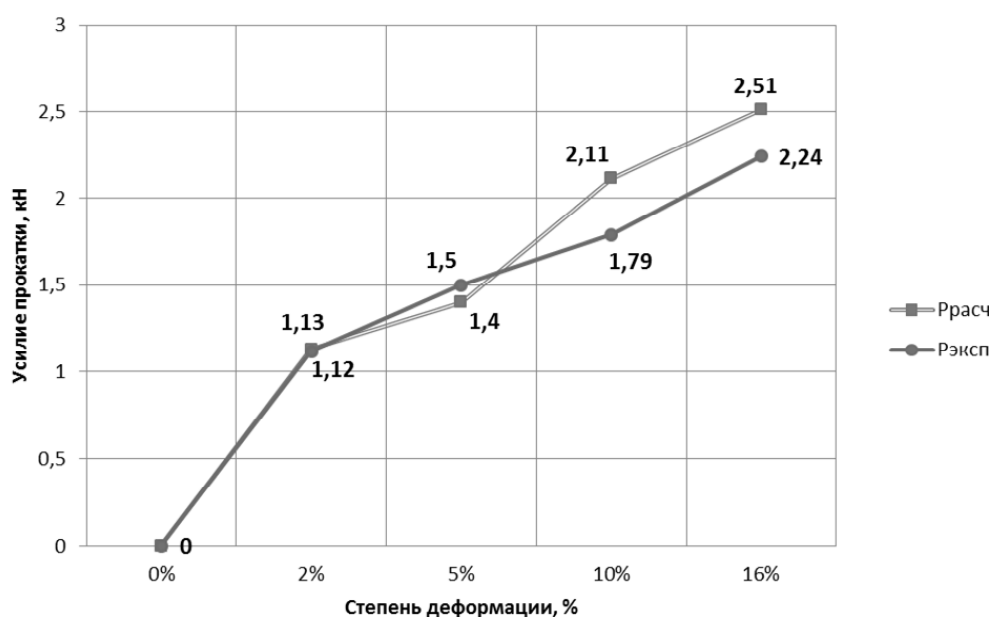


Рис. 5. Расчетное и экспериментальное значение усилия



Рис. 6. Экспериментальное показание усилия прокатки при обжатии 2 %

Литература

1. Колмогоров, В.Л. *Механика обработки металлов давлением: учеб. для вузов / В.Л. Колмогоров.* – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.
 2. Выдрин, А.В. *Алгоритмы решения задач механики сплошных сред методом линий скольже-*

ния: учеб. пособие для самостоят. работы студентов / А.В. Выдрин. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. – 24 с.
 3. Грудев, А.П. *Теория прокатки: учеб. для вузов / А.П. Грудев.* – М.: Металлургия, 1988. – 240 с.

Шкуратов Евгений Александрович, студент кафедры машин и технологий обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск). Тел.: 7(904)9417875. E-mail: shkuratov@rtural.ru.

Выдрин Александр Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры машин и технологий обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск). Тел.: (351) 7347060. E-mail: VydrinAV@rosniti.ru.

INVESTIGATION OF THE PROCESS OF ROLLING THE HIGH-STRIP WITH SMALL DEFORMATION

*E.A. Shkuratov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
shkuratov@rtural.ru,*

*A.V. Vydrin, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
VydrinAV@rosniti.ru*

Theoretical study of the deformation of high-strip is performed and a mathematical model is developed. The model for determining pressure is obtained using the method of slip lines and experimental data. Comparison of calculated and experimental results shows high accuracy of the developed mathematical model of rolling pressure.

Keywords: rolling, high-strip, slip lines.

References

1. Kolmogorov V.L. *Mekhanika obrabotki metallov davleniem* [Mechanics of Metal Forming]. Moscow, Metallurgiya, 1986. 688 p.
2. Vydrin A.V. *Algoritmy resheniya zadach mekhaniki sploshnykh sred metodom liniy skol'zheniya* [Algorithms for Solving Problems in Continuum Mechanics by Slip-Line]. Chelyabinsk, SUSU Publ., 2002. 24 p.
3. Grudev A.P. *Teoriya prokatki* [Theory of Rolling]. Moscow, Metallurgiya, 1988. 240 p.

Поступила в редакцию 22 апреля 2013 г.