

## Расчетная схема контакта при холодной правке уголков для оценки рабочего диаметра роликовой правильной машины

E. Yu. Beygelzimer /Cand. Sci. (Tech.)/

LLC «OMD-engineering», Dnipro, Ukraine  
e-mail: omd.engineering@gmail.com

### Rated contact scheme in the cold straightening of angles for evaluation of the working diameter of a roller leveling machine

**Цель.** Выявление физических закономерностей влияния основных параметров холодной правки уголков на величину рабочего диаметра роликовой правильной машины.

**Методика.** Деформация уголка представлена как сочетание деформаций упругого смятия и упруго-пластического изгиба.

**Результаты.** Приведены численные примеры, подтверждающие работоспособность предложенной расчетной схемы в части влияния толщины и ширины полки уголка.

**Научная новизна.** Показано, что ключевое значение имеет относительный вклад смятия, при увеличении которого резко снижается рабочий диаметр.

**Практическая значимость.** Разработанная расчетная схема использована для корректировки алгоритма АСУ правильно-режущим блоком при освоении производства уголков с отклонениями по длине в пределах  $\pm 50$  мм. (Ил. 6. Библиогр.: 3 назв.)

**Ключевые слова:** уголок, правка, рабочий диаметр, роликовая правильная машина, моделирование.

**Вводные пояснения.** На современных сортовых станах для получения уголков мерной длины используют высокопроизводительные правильно-режущие блоки, состоящие из роликовой правильной машины (РПМ) и ножниц холодной резки [1]. При порезке прутков на скорости правки ключевое значение имеет определение так называемого «рабочего диаметра РПМ» (далее – рабочий диаметр), под которым понимается диаметр такой окружности в поперечном сечении вала, на которой линейная скорость равна скорости поступательного движения уголка, т. е.:

$$\omega = 2v / D^*, \quad (1)$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения валков РПМ;  $D^*$  – рабочий диаметр;  $v$  – скорость движения профиля (скорость правки).

По величине  $D^*$ , заданной оператором в автоматизированную систему управления (АСУ), на основе формулы (1) устанавливается угловая скорость привода РПМ  $\omega$ , которая должна обеспечить требуемую скорость правки  $v$  и тем самым точность порезки прутков на мерные длины.

Физический смысл рабочего диаметра при правке уголков поясняет рис. 1 (на рисунке и далее по тексту под  $R^*$  понимается рабочий радиус как  $1/2$  рабочего диаметра) в левой части показано поперечное сечение равнополочного уголка плоскостью, в которой контакт металла с верхним (приводным) валком РПМ осуществляется по всей ширине полки. Линейная скорость вала по периметру контакта изменяется, и только в одной точке  $N$  равна скорости уголка. При этом условно показано, что диаметр точки  $N$  и есть рабочий диаметр. На самом деле это не обязательно так, поскольку контакт уголка с валком осуществляется не по периметру одного сечения, а по некоторой площади (схематично изображена справа на рис. 1). Фактическое положение рабочего диаметра зависит от размеров площадки контакта и распределения по ней сил трения.

В настоящее время рабочий диаметр РПМ при холодной правке рассчитывают по формулам среднего катающего диаметра при горячей прокатке уголков, например (по аналогии с [2, с. 19; 3, с. 52]):

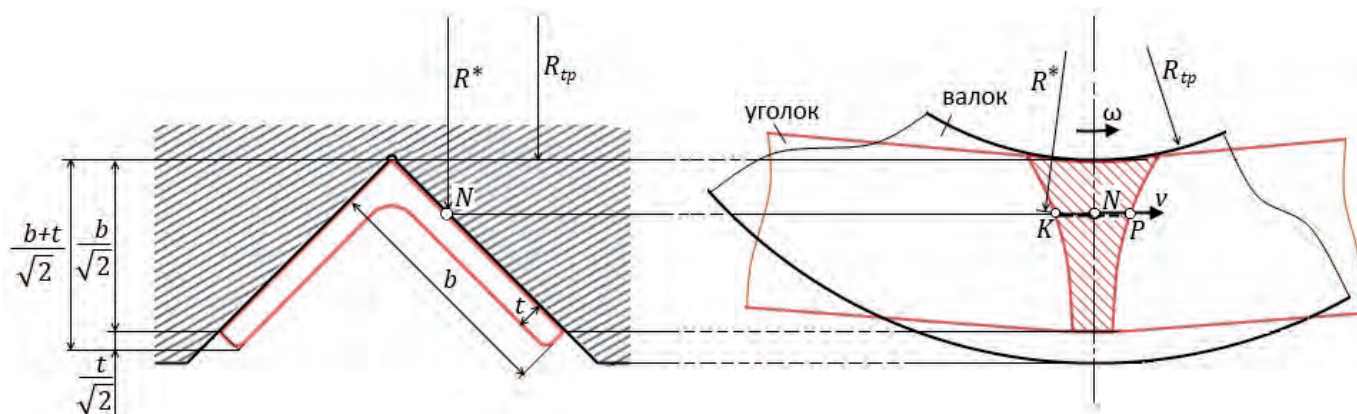


Рис. 1. Схема площадки контакта уголка с валком роликовой правильной машины

$$D^* = D_{tp} + \frac{2(b+t)}{3\sqrt{2}}, \quad (2)$$

где  $D_{tp}$  – диаметр вершины ручья верхнего (приводного) вала (от англ. *top pit*);  $b$  и  $t$  – соответственно ширина и толщина полки уголка (рис. 1).

На практике формула (2) и подобные ей формулы, заимствованные из горячей прокатки, неверно отражают влияние параметров на рабочий диаметр РПМ. Например, с ростом толщины полки на 1 мм рабочий диаметр увеличивается на 5–10 мм, тогда как формула (2) предсказывает всего 0,5 мм. И наоборот, ширина полки фактически изменяет рабочий диаметр значительно менее интенсивно, чем это следует из формулы (2).

С тем, чтобы получить адекватную модель рабочего диаметра, автором предложена новая расчетная схема контакта уголка с валком при холодной правке. При этом речь не идет об аналитической модели, построение которой, по мнению автора, не имеет практического смысла ввиду большого числа неизбежных допущений. Описанная ниже расчетная схема создана с целью понимания физических закономерностей формирования величины рабочего диаметра, и обоснования структуры будущей статистической модели.

Предварительно уточним необходимые понятия. Совокупность всех точек площадки контакта (рис. 1), на которых горизонтальная проекция скорости вала равна скорости металла, назовем *нейтральной линией* ( $KP$  на рис. 1). Можно показать, что в рамках допущения об однородности напряжений трения по площадке контакта и при отсутствии натяжения или подпора нейтральной линией является горизонтальный отрезок, который делит площадь контакта пополам (такой отрезок будем называть *срединным*). Поэтому, чтобы найти значение  $D^*$ , нужно определить площадку контакта и ее срединный отрезок.

Для решения этой задачи рассмотрим элементарную тройку валков РПМ: один верхний приводной и два нижних не приводных. Нижние валки представим в виде шарнирных опор, имеющих возможность вертикального перемещения. Пусть в начальном положении опоры занимают такое положение, при котором ручей верхнего вала касается без нагрузки полок уголка по линии наружного контура поперечного сечения. Мысленно переместим опоры вверх. Возникающую деформацию уголка под верхним валком удобно представить в виде сочетания двух идеальных схем: 1) упругого смятия и 2) упруго-пластического изгиба.

«Идеальность» схем состоит в том, что каждая из них в чистом виде не реализуется, и общую деформацию обуславливает совокупность смятия и изгиба. Тем не менее, для поиска физически содержательной модели рабочего диаметра и объяснения влияющих факторов целесообразно отдельно рассмотреть идеализированные случаи, отвечающие каждой из этих схем в чистом виде.

Деформация уголка по схеме чистого смятия

Случай деформации уголка по схеме чистого смятия показан на рис. 2 (условно принято, что валок абсолютно жесткий, и смятию подвергается только уголок). На этом рисунке:  $R_{tp}$  – радиус верхнего вала по вершине ручья;  $b$  – ширина полки уголка;  $t$  – толщина полки уголка;  $h$  – высота уголка по вертикали:

$$h = \frac{b}{\sqrt{2}}; \quad (3)$$

$z$  – толщина тела уголка:

$$z = t\sqrt{2}; \quad (4)$$

$s$  – перекрытие валков (разность уровней вершин нижнего и верхнего ручьев; для наглядности величина перекрытия преувеличена; на практике она, как правило, отрицательна, т. е. уровень вершины нижнего ручья ниже, чем верхнего);  $l$  – шаг нижних валков (расстояние

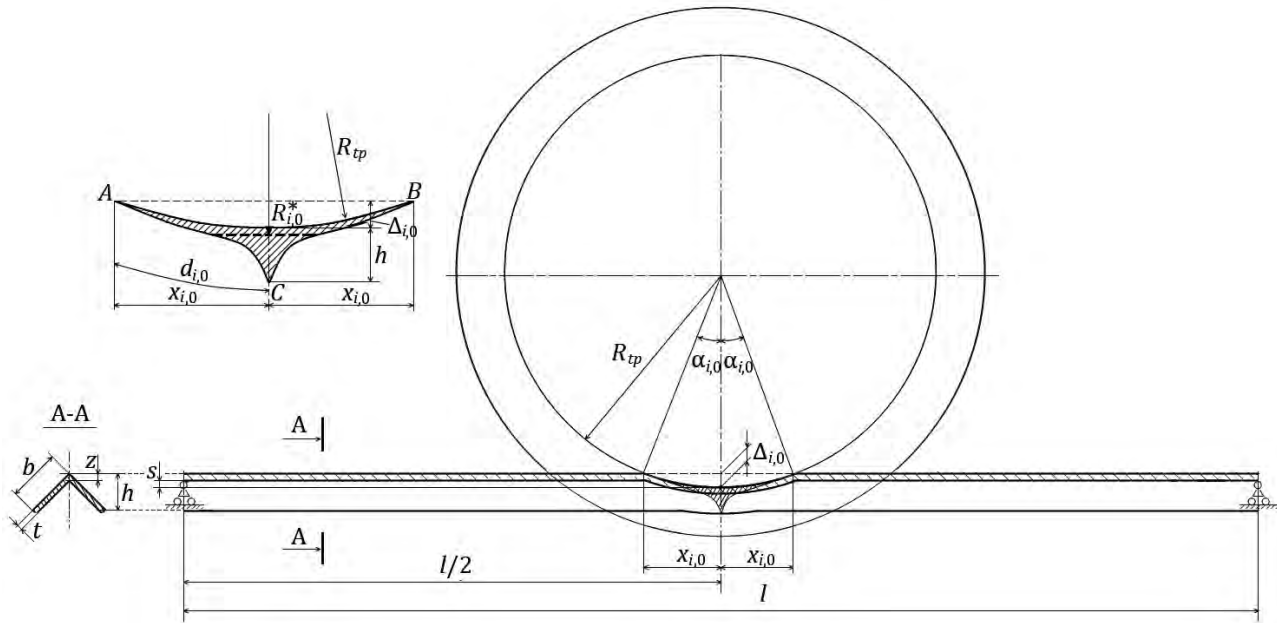


Рис. 2. Случай деформации уголка по схеме чистого смятия (на выноске показана площадка контакта)

между условными опорами);  $\Delta_{i,0}$  – глубина чистого смятия (всем параметрам, относящимся к смятию, присвоен подстрочный индекс «i» от англ. *indent*; второй подстрочный индекс «0» здесь и далее означает, что параметр относится к идеализированному случаю, в данном случае – к чистому смятию);  $\alpha_{i,0}$  – угол контакта при чистом смятии (центральный угол, стягивающий площадку контакта по одну сторону от оси валка);  $d_{i,0}$  – длина дуги чистого смятия (по одну сторону от оси валка):

$$d_{i,0} = R_{tp} \alpha_{i,0}; \tag{5}$$

$x_{i,0}$  – длина площадки контакта при чистом смятии (длина горизонтальной проекции дуги чистого смятия):

$$x_{i,0} = R_{tp} \sin \alpha_{i,0} \approx \sqrt{2R_{tp} \Delta_{i,0}}. \tag{6}$$

Из рис. 2 видно, что в рассматриваемом случае глубина чистого смятия равна сумме перекрытия валков и толщины тела уголка:

$$\Delta_{i,0} = s + z = s + t\sqrt{2}. \tag{7}$$

Подставляя (7) в (6), получим формулу для длины площадки чистого смятия

$$x_{i,0} = \sqrt{2R_{tp}(s + t\sqrt{2})}. \tag{8}$$

При упругом смятии площадка контакта уголка с верхним валком представляет собой равнобедренный криволинейный треугольник с основанием, прилегающим к вершине ручья (ABC на рис. 2). В этом случае рабочий радиус не может быть меньше радиуса вершины ручья, но не может превышать радиуса срединного отрезка равнобедренного прямолинейного треугольника, полученного путем «спрямления» сторон треугольника ABC:

$$R_{tp} \leq R_{i,0}^* \leq R_{i,max}^*, \tag{9}$$

где  $R_{i,0}^*$  – рабочий радиус по схеме чистого смятия;  $R_{i,max}^*$  – максимально возможное значение рабочего радиуса по схеме чистого смятия:

$$R_{i,max}^* = R_{tp} \left[ 1 + \beta \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \right]; \tag{10}$$

$\beta$  – относительная ширина полки уголка:

$$\beta = \frac{b}{R_{tp} \sqrt{2}}. \tag{11}$$

Выражение (10) учитывает, что отрезок, который делит равнобедренный треугольник пополам, расположен от его основания на расстоянии:

$$y^* = h \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{2}} \right). \tag{12}$$

Положение рабочего радиуса внутри возможного интервала (9) зависит от глубины чистого смятия  $\Delta_{i,0}$  (или длины площадки контакта  $x_{i,0}$ ). Вполне очевидно, что при увеличении глубины чистого смятия степень искривления сторон треугольника ABC (рис. 2) возрастает и, соответственно, нейтральная линия приближается к вершине ручья. Поэтому следует полагать, что зависимость рабочего радиуса от глубины чистого смятия имеет вид, показанный на рис. 3, т. е. наибольший рабочий радиус отвечает нулевой глубине смятия, и по мере ее увеличения он замедленно приближается к радиусу вершины ручья. Эту зависимость можно описать функцией:

$$R_{i,0}^* = R_{tp} + (R_{i,max}^* - R_{tp}) e^{-m\Delta_{i,0}}, \tag{13}$$

где  $m$  – некоторый положительный параметр, определяющий скорость приближения рабоче-

го радиуса к радиусу вершины ручья. По оценочным расчетам этот параметр имеет порядок единицы, т.е. в первом приближении можно принимать  $m = 1$ .

**Деформация уголка по схеме чистого изгиба**

Случай деформации уголка по схеме чистого изгиба показан на рис. 4. На этом рисунке, кроме описанных выше параметров, обозначено:  $\Delta_{b,0}$  – стрела чистого изгиба (всем параметрам, относящимся к изгибу, присвоен подстрочный индекс «b» от англ. *bending*);  $\alpha_{b,0}$  – угол чистого изгиба (центральный угол, стягивающий площадку контакта по одну сторону от оси валка);  $x_{b,0}$  – длина площадки контакта при чистом изгибе (по одну сторону от оси валка):

$$x_{b,0} = \frac{2\Delta_{b,0}R_{tp}}{l} = R_{tp}\alpha_{b,0}. \tag{14}$$

В рассматриваемом случае стрела изгиба равна:

$$\Delta_{b,0} = s + z = s + t\sqrt{2}. \tag{15}$$

Подставляя (15) в (14), находим:

$$x_{b,0} = \frac{2R_{tp}(s + t\sqrt{2})}{l}. \tag{16}$$

При упругом или упруго-пластическом изгибе площадку контакта можно представить в виде кольцевого сектора (ABCD на рис. 4). Рабочий радиус в этом случае равен (как радиус срединного отрезка, делящего пополам площадь спрямленной трапеции ABCD):

$$R_{b,0}^* = R_{tp}\sqrt{1 + \beta\left(1 + \frac{\beta}{2}\right)}, \tag{17}$$

где  $R_{b,0}^*$  – рабочий радиус по схеме чистого изгиба (т. е. без смятия);  $R_{tp}$  – радиус верхнего валка

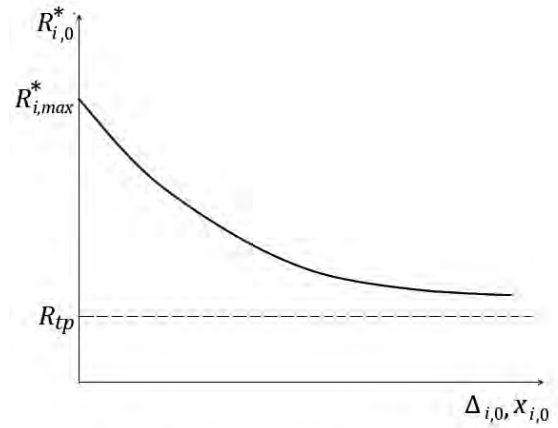


Рис. 3. Характер зависимости рабочего радиуса от величины смятия

ка по вершине ручья;  $\beta$  – относительная ширина полки (см. (11)).

В отличие от чистого смятия, значение рабочего радиуса при чистом изгибе *не зависит от стрелы изгиба* (или длины площадки контакта).

**Деформация уголка при сочетании изгиба и смятия**

Случай сочетания деформации смятия и изгиба, отвечающий реальным условиям правки, показан на рис. 5. На этом рисунке приняты дополнительные обозначения:  $\Delta_m$  – стрела совместной деформации изгиба и смятия (всем параметрам, относящимся к совместной деформации, присвоен подстрочный индекс «m» от англ. *mutual*):

$$\Delta_m = \Delta_b + \Delta_i, \tag{18}$$

где  $D_b$  – стрела изгиба при совместной деформации;  $D_i$  – глубина смятия при совместной деформации;  $\alpha_m$  – угол контакта при совместной

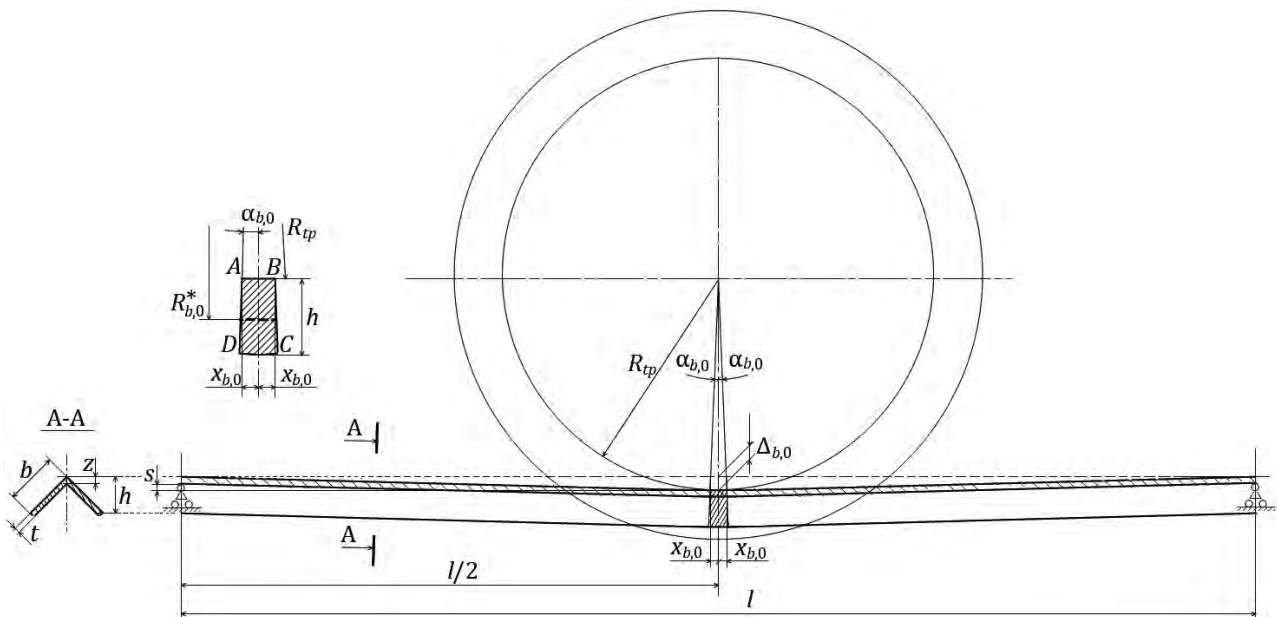


Рис. 4. Случай деформации уголка по схеме чистого изгиба (на выноске показана площадка контакта)

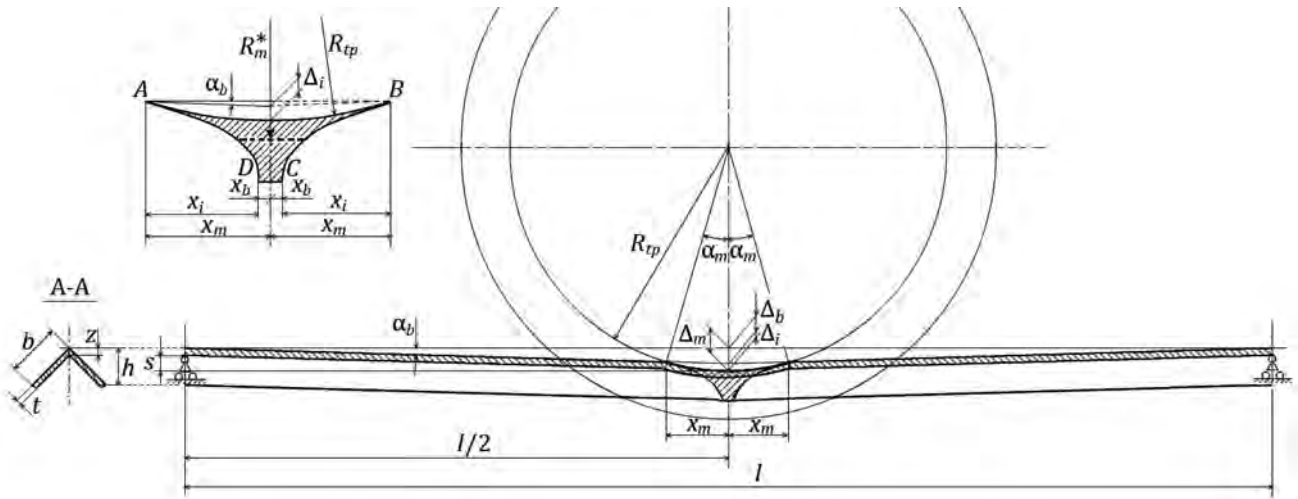


Рис. 5. Случай деформации уголка при сочетании изгиба и смятия (на выноске показана площадка контакта)

деформации (центральный угол, стягивающий площадку контакта по одну сторону от оси валка);  $\alpha_b$  – угол изгиба при совместной деформации;  $x_m$  – длина площадки контакта при совместной деформации (по одну сторону от оси):

$$x_m = R_{tp} \alpha_m. \tag{19}$$

Стрела совместной деформации равна:

$$\Delta_m = s + z = s + t\sqrt{2}. \tag{20}$$

Соответственно, стрела изгиба и длина площадки контакта выражаются так:

$$\Delta_b = \Delta_m - \Delta_i = s + t\sqrt{2} - \Delta_i \tag{21}$$

$$x_m \approx \sqrt{2R_{tp}\Delta_i} + \frac{2R_{tp}\Delta_b}{l} = \sqrt{2R_{tp}\Delta_i} + \frac{2R_{tp}}{l}(s + t\sqrt{2} - \Delta_i). \tag{22}$$

При сочетании смятия и изгиба площадка контакта представляет собой криволинейный четырехугольник ABCD (рис. 5). Его размеры и положение срединного отрезка зависят от относительного вклада смятия, которое можно характеризовать параметром:

$$\lambda_i = \frac{\Delta_i}{\Delta_i + \Delta_b} = \frac{\Delta_i}{s + t\sqrt{2}} \tag{23}$$

Относительный вклад смятия  $\lambda_i$  может варьироваться от нуля до единицы, при этом значение  $\lambda_i = 0$  отвечает чистому изгибу,  $\lambda_i = 1$  – чистому смятию. В первом приближении поведение рабочего радиуса между этими двумя крайними случаями можно описать уравнением прямой:

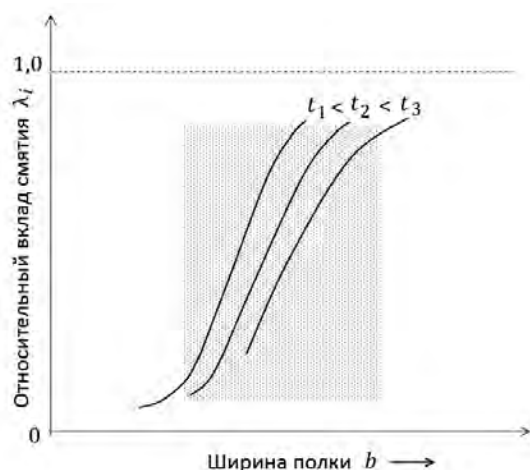
$$R_m^* = R_{b,0}^* - \lambda_i (R_{b,0}^* - R_{i,0}^*). \tag{24}$$

где  $R_m^*$  – рабочий радиус при совместной деформации,  $R_{(b,0)}^*$  – рабочий радиус при чистом изгибе по формуле (17),  $R_{i,0}^*$  – то же, при чистом смятии по формуле (13).

Именно в параметре  $\lambda_i$  содержится суть предложенной расчетной схемы контакта. Значение этого параметра зависит от ширины и толщины полки. С ростом ширины полки растет изгибающий момент, что при фиксированном перекрытии валков приводит к росту контактных напряжений. Это, в свою очередь, должно приводить к увеличению относительной роли смятия, т. е. к росту параметра  $\lambda_i$ . С ростом толщины полки относительный вклад смятия должен уменьшаться. Обусловлено это тем, что смятие верхней поверхности уголка происходит при свободной нижней поверхности. В этих условиях смятие идет по схеме сдвига с выходом деформации на нижнюю поверхность. При большей толщине полки пропорционально увеличивается площадь сдвига, что затрудняет процесс деформации смятия. Другими словами, тонкий уголок легче «продавить», чем толстый (принципиальным отличием от прокатки в валках является то, что это «продавливание» происходит без реакции со стороны нижней поверхности).

Таким образом, зависимость  $\lambda_i$  от ширины и толщины полки должна выглядеть так, как показано на рис. 6. При этом, учитывая, что несоответствия формул для горячей прокатки (вида (2) выявлены на практике для уголков обычного сортамента (от 30×3 до 100×10 мм), следует полагать, что реальная величина вклада смятия  $\lambda_i$  не слишком мала (т. е. не очень близка к нулю). Другими словами, реальные значения параметра  $\lambda_i$  лежат в области средней части кривых, показанных на рис. 6 (эта область на рисунке затемнена).

Например, если для уголка «средних» размеров 75×6 мм принять «среднюю» величину  $\lambda_i = 0,5$ , то при радиусе вершины ручья  $R_{tp} = 203,75$  мм значение рабочего радиуса по формуле (24) получается равным  $R_m^* = 219,9$  мм,



**Рис. 6.** Характер влияния ширины и толщины полки уголка на относительный вклад смятия (затемнена область реального сортамента уголков;  $t_1, t_2, t_3$  – разные значения толщины полки)

т. е. рабочий диаметр  $D^* = 439,8$  мм. Для уголка той же ширины, но с толщиной полки 5 мм при  $\lambda_i = 0,6$  получается  $D^* = 433,8$  мм. Следовательно, со снижением толщины полки на 1 мм расчетный рабочий диаметр уменьшился на 6 мм, что согласуется с опытом работы на реальном объекте (формула (2) для этих же условий дает результаты: 445,7 и 445,2 мм, т. е. снижение всего на 0,5 мм). Для уголка 63×6 при относительном вкладе смятия  $\lambda_i = 0,4$  по формуле (24)  $D^* = 438,4$  мм, т. е. снижение ширины полки на 12 мм привело к уменьшению расчетного рабочего диаметра на 1,4 мм, что также согласуется с практическими данными (формула (2) в этих условиях дает снижение  $D^*$  на 5,7 мм).

Учитывая сказанное выше относительно цели разработки описанной расчетной схемы, приведенные численные примеры следует рассматривать исключительно как иллюстрацию ее работоспособности в части анализа влияния основных параметров на величину рабочего диаметра. На основе этой расчетной схемы автором построена адекватная и физически содержательная статистическая модель рабочего диаметра, использованная при освоении производства уголков с отклонениями по длине прутков в пределах  $\pm 50$  мм.

**Выводы.** Предложено деформацию уголка при холодной правке в роликовой правильной машине рассматривать в виде сочетания деформаций упругого смятия и упруго-пластического изгиба. Показано, что увеличение относительного вклада смятия приводит к уменьшению рабочего диаметра РПМ. Приведенные чис-

ленные примеры расчетов показывают работоспособность предложенной расчетной схемы в части анализа влияния параметров процесса на рабочий диаметр РПМ. Описанная расчетная схема использована при освоении производства уголков с отклонениями по длине в пределах  $\pm 50$  мм.

**Библиографический список / References**

1. Прокатные станы в проектах ГП «УкрНТЦ «Энергосталь» / Д. В. Сталинский [и др.] // Сталь. – 2015. – № 9. – С. 25-31.  
Stalinskiy D. V., Rudyuk A. S., Medvedev V. S., Pavlenko A. A., Kulak V. Yu. *Prokatnyye stany v proektyakh GP UkrNTC "Energestal"*. Stal. 2015, no. 9, pp. 25-31.
2. Чекмарев А. П. Калибровка фасонных профилей / А. П. Чекмарев, М. С. Мутьев, Р. А. Машковцев. – Днепропетровск: Изд. ДМетИ, 1965. – 169 с.  
Chekmaryov A.P., Mutiyev M.S., Mashkovtsev R.A. *Kalibroovka fasonnykh profiley*. Dnepropetrovsk, DMetI, 1965, 169 p.
3. Чекмарев А. П. Калибровка прокатных валков / А. П. Чекмарев, М. С. Мутьев, Р. А. Машковцев. – М.: Металлургия, 1971. – 509 с.  
Chekmaryov A. P., Mutiyev M. S., Mashkovtsev R. A. *Kalibroovka prokatnykh valkov*. Moscow, Metallurgiya, 1971, 509 p.

**Purpose.** Revealing of the physical regularities in the influence of the main parameters of the cold straightening of angles on the value of the working diameter of a roller leveling machine.

**Methodology.** Deformation of the angle is presented as a combination of deformations of elastic indentation and elasto-plastic bending.

**Findings.** Numerical examples are given that confirm the working capacity of the proposed rated scheme in terms of the influence of the leg thickness and leg width of the angle.

**Originality.** It is shown that the relative contribution of the indentation is of key importance, with an increase in which the working diameter sharply decreases.

**Practical value.** The developed rated scheme is used to correct the ACS algorithm for a leveling-cutting unit when mastering the production of angles with deviations in length within  $\pm 50$  mm.

**Key words:** angle bar, straightening, working diameter, roller leveling machine, simulation

**Рекомендована к публикации  
д. т. н. Я. В. Фроловым**

**Поступила 25.04.2017**