

Д. И. СУЯРОВ, М. И. СИРОТИН, Л. Г. ЧУБРИКОВ

### ОСНОВЫ РАСЧЕТА ПРОКАТКИ НА УГОЛ

Увеличение ширины заготовок до требуемой ширины листов на многих толстолистовых станах выполняется путем прокатки «на угол», которая состоит из следующих операций (рис. 1). После проглаживающих пропусков вдоль заготовку поворачивают на угол  $90^\circ - \varphi$  и подвергают в этом положении прокатке, в результате чего она превращается в параллело-

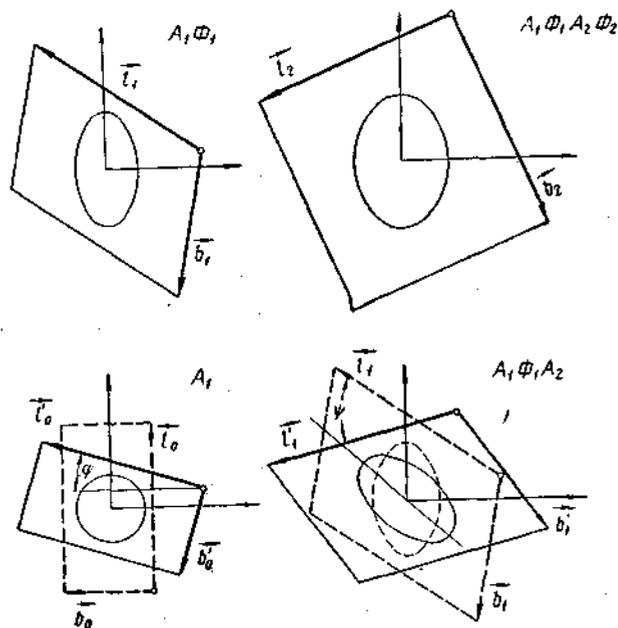


Рис. 1. Формоизменение заготовки при прокатке «на угол».

грамм. Затем заготовку поворачивают на угол  $\psi$  и прокатывают в новом положении до тех пор, пока она не станет прямоугольником требуемой ширины. При выполнении этих операций необходимо заранее рассчитать углы  $\varphi$  и  $\psi$  и обжатия при прокатке по первой и второй диагоналям таким образом, чтобы заготовка перед прокаткой на лист имела требуемую

ширину и строго прямоугольную форму. Решение этой задачи, предложенное рядом авторов [1, 2, 6, 3], отличается большой громоздкостью, которой можно избежать путем применения простейших формул тензорной алгебры [4].

Введем следующие предположения, правильность которых достаточно хорошо подтверждена предыдущими исследованиями других авторов [2, 6]:

а) поворот заготовки во время пропуска отсутствует, т. е. углы  $\varphi$  и  $\psi$  остаются постоянными;

б) перемещением металла в направлении оси валков можно пренебречь, т. е. отсутствует уширение.

С учетом этих допущений последовательность операций, изображенных на рис. 1, можно записать в виде следующего произведения тензоров:

$$D = A_1 \cdot \Phi_1 \cdot A_2 \cdot \Phi_2, \quad (1)$$

где  $A_1$  и  $A_2$  — тензоры поворота, без деформации;

$\Phi_1$  и  $\Phi_2$  — тензоры плоской однородной деформации, без поворота.

Каждый из тензоров может быть выражен через свои составляющие в некоторой системе координат, выбранной в плоскости листа. В качестве такой системы выберем: одна ось — по направлению прокатки, вторая — перпендикулярно к первой. В такой системе координат тензор поворота заготовки после проглаживающих пропусков выражается следующим образом:

$$A_1 = \begin{Bmatrix} \cos(90^\circ - \varphi) & -\sin(90^\circ - \varphi) \\ \sin(90^\circ - \varphi) & \cos(90^\circ - \varphi) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sin \varphi & -\cos \varphi \\ \cos \varphi & \sin \varphi \end{Bmatrix},$$

а тензор поворота заготовки перед прокаткой по второй диагонали

$$A_2 = \begin{Bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{Bmatrix}.$$

Тензор плоской однородной деформации при прокатке по первой диагонали имеет следующий вид:

$$\Phi_1 = \begin{Bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & 1 \end{Bmatrix},$$

а при прокатке по второй диагонали

$$\Phi_2 = \begin{Bmatrix} \lambda_2 & 0 \\ 0 & 1 \end{Bmatrix}.$$

Здесь  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  обозначают суммарные вытяжки при прокатке по первой и второй диагоналям соответственно.

Выполнив перемножение соответствующих матриц, получаем выражение тензора

$$D = A_1 \cdot \Phi_1 \cdot A_2 \cdot \Phi_2 = \begin{Bmatrix} \lambda_2 (\lambda_1 \sin \varphi \cos \psi - \sin \psi \cos \varphi) & -\lambda_1 \sin \varphi \sin \psi - \cos \varphi \cos \psi \\ \lambda_2 (\lambda_1 \cos \varphi \cos \psi + \sin \varphi \sin \psi) & -\lambda_1 \cos \varphi \sin \psi + \sin \varphi \cos \psi \end{Bmatrix}. \quad (2)$$

Тензор  $D$  преобразует векторы сторон заготовки до прокатки  $\vec{l}_0 = \{l_0, 0\}$  и  $\vec{b}_0 = \{0, -b_0\}$  в векторы сторон заготовки после прокатки  $\vec{l}_2$  и  $\vec{b}_2$  (см. рис. 1), причем, как указано выше, конечная заготовка должна

а) быть прямоугольной, т. е.  $\vec{l}_2 \cdot \vec{b}_2 = 0$ ; (3)

б) иметь заданную ширину, т. е.  $|\vec{b}_2| = b_2$ . (4)

По правилам тензорной алгебры находим

$$\begin{aligned} \vec{l}_2 &= \vec{l}_0 D = \{l_0, 0\} D = \{l_0 \lambda_2 (\lambda_1 \sin \varphi \cos \psi - \\ & - \sin \psi \cos \varphi); l_0 (-\lambda_1 \sin \varphi \sin \psi - \cos \varphi \cos \psi)\}, \\ \vec{b}_2 &= \vec{b}_0 \cdot D = \{0, -b_0\} D = \{-b_0 \lambda_2 (\lambda_1 \cos \varphi \cos \psi + \\ & + \sin \varphi \sin \psi); -b_0 (-\lambda_1 \cos \varphi \sin \psi + \sin \varphi \cos \psi)\}. \end{aligned}$$

Подставляя эти значения  $\vec{l}_2$  и  $\vec{b}_2$  в уравнение (3), получаем

$$\begin{aligned} \lambda_2^2 (\lambda_1 \operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \psi) (\lambda_1 + \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \psi) + \\ + (-\lambda_1 \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \psi - 1) (-\lambda_1 \operatorname{tg} \psi + \operatorname{tg} \varphi) = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Если принять суммарные вытяжки при прокатке по первой и второй диагоналям равными между собой, то из уравнения (5)

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\operatorname{tg} \varphi (\lambda^2 + 1)}{\lambda (1 - \operatorname{tg}^2 \varphi)}. \quad (6)$$

Подставляя координаты  $\vec{b}_2$  и значение  $\operatorname{tg} \psi$  из уравнения (6) в условие (4), находим, что

$$\lambda b_0 \sqrt{\frac{\lambda^2 + \operatorname{tg}^2 \varphi}{\lambda^2 \operatorname{tg}^2 \varphi + 1}} = b_2,$$

откуда, вводя для требуемого увеличения ширины заготовок обозначение  $\beta = \frac{b_2}{b_0}$ ,

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{\lambda^2 - \beta^2}{\beta^2 - 1}}. \quad (7)$$

Требуемое увеличение ширины заготовок задается заранее, поэтому для определения углов по формулам (6) и (7) необходимо знать вытяжки при прокатке по первой и второй диагоналям. В рассматриваемом случае эти вытяжки приняты равными между собой, но могут быть сделаны и другие предположения о соотношениях между ними.

Очень важное значение при прокатке на угол имеет условие ущемления заготовки на длине бочки валков. Как показано на рис. 2, ущемление заготовки на длине бочки валков при прокатке по второй диагонали гарантирует ее ущемление на длине бочки валков и при прокатке по первой диагонали. Это условие выражается следующим образом:

$$B = d \cdot \cos \delta, \quad (8)$$

где  $B$  — расчетная длина бочки валков, которую берут на 100—150 мм меньше фактической длины, учитывая возможность смещения заготовки в сторону;

$d$  — диагональ заготовки, прокатанной на окончательные размеры;

$\delta$  — угол, образованный диагональю  $d$  с осью валков.

Длина диагонали

$$d = \sqrt{|\vec{b}_2|^2 + |\vec{l}_2|^2} = \sqrt{b_2^2 + \frac{\lambda^4 l_0^2}{\beta^2}}.$$

Угол  $\delta$  находится из разности  $(\Theta + \delta) - \Theta$ , в которой угол  $\Theta$  определяется проекциями  $\vec{l}_2$  на оси координат:

$$\operatorname{tg} \Theta = \frac{\lambda^2 l_0 \sin \varphi \cos \psi - \lambda l_0 \cos \varphi \sin \psi}{\lambda l_0 \sin \varphi \sin \psi + l_0 \cos \varphi \cos \psi} = \frac{\lambda \operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \psi}{\lambda \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \psi + 1},$$

что после подстановки  $\text{tg } \psi$  из формулы (6) дает  $-\text{tg } \varphi$ , а

$$\text{tg } (\Theta + \delta) = \frac{|\vec{b}_2|}{|\vec{l}_2|}$$

Выполняя требуемые подстановки, находим

$$B = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{l_0 \lambda^3 \sqrt{\beta^2 - 1} + b_0 \beta^2 \sqrt{\lambda^4 - \beta^2}}{\sqrt{\lambda^2 \beta^2 - \lambda^2 + \lambda^4 - \beta^2}} \quad (9)$$

Единственной неизвестной величиной, входящей в уравнение (9), является вытяжка  $\lambda$ . Таким образом, уравнение (9) показывает, что величина вытяжки по диагонали в конечном счете определяется условием

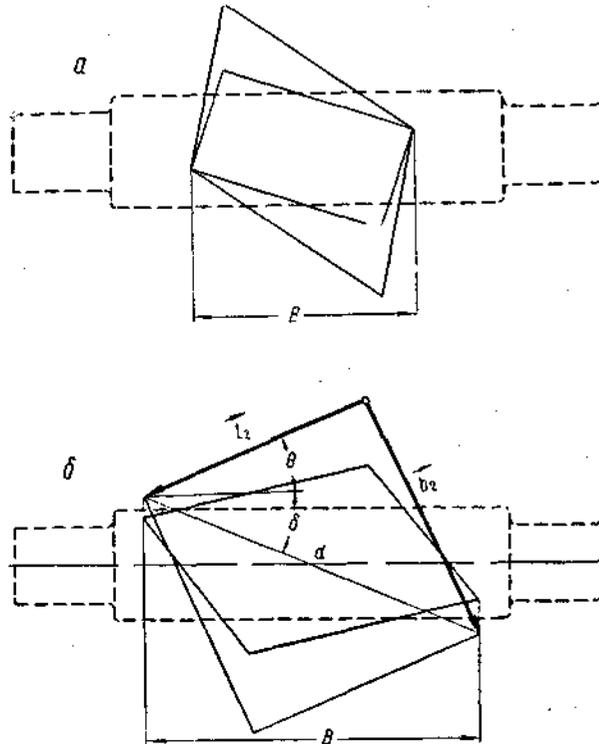


Рис. 2. Геометрическое представление условия уместения заготовки на длине бочки валков:  
 $a$  — при прокатке по первой диагонали;  $b$  — при прокатке по второй диагонали.

умещения заготовки на длине бочки валков и является функцией трех известных величин: степени увеличения ширины заготовок  $\beta$ , коэффициента формы заготовки  $\frac{b_0}{l_0}$  и отношения условной длины бочки валков к начальной длине заготовки  $\frac{B}{l_0}$ . Уравнение (9) относительно  $\lambda$  в явном виде неразрешимо, поэтому на рис. 3 дается его графическое решение.

Усилие при прокатке на угол возрастает и убывает постепенно, что позволяет работать с большими обжатиями, которые нередко сопровождаются перегрузкой деталей стана в тот момент, когда длина участка

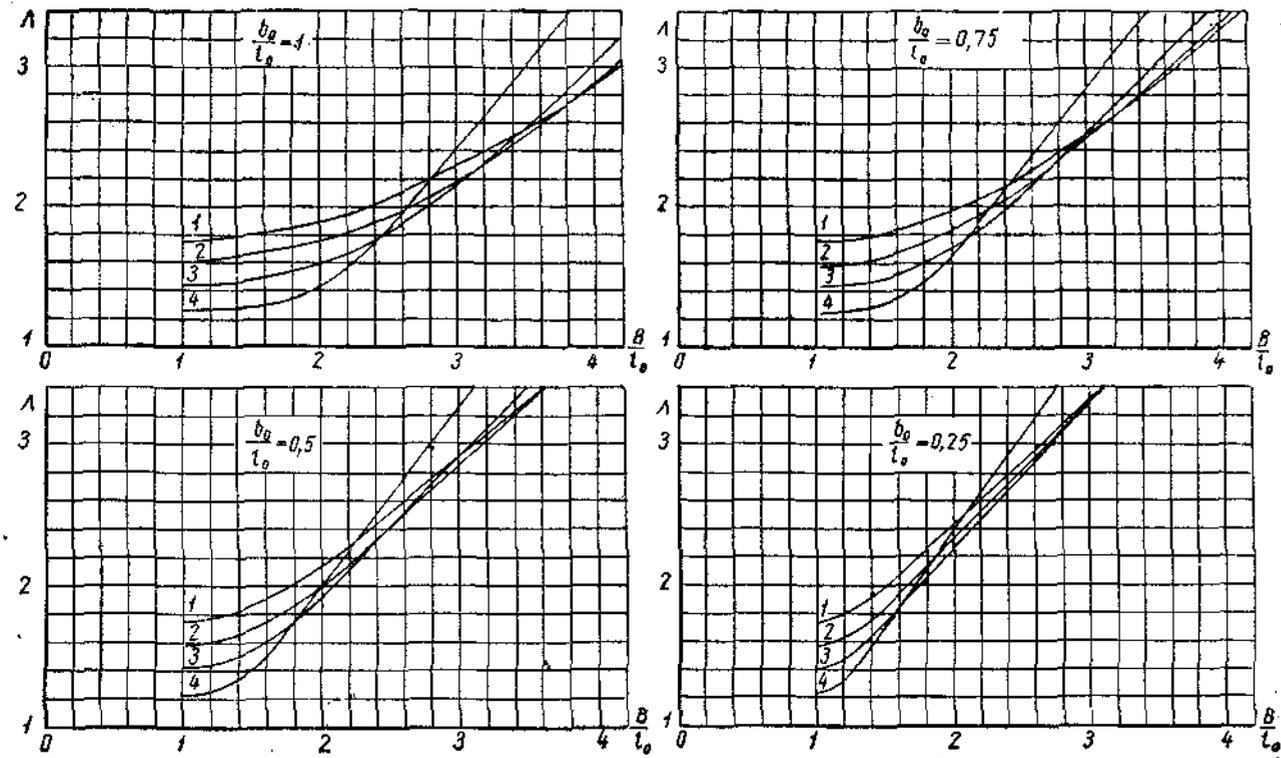


Рис. 3. Графики, показывающие величину суммарной вытяжки по диагонали в зависимости от условной длины бочки валков  $\frac{B}{l_0}$  и степени требуемого увеличения ширины заготовки  $\beta$  для заготовок разной формы, которая характеризуется отношением  $\frac{b_0}{l_0}$

1 —  $\beta = 3,0$ ; 2 —  $\beta = 2,5$ ; 3 —  $\beta = 2,0$ ; 4 —  $\beta = 1,5$ .

соприкосновения прокатываемой заготовки с валками достигает максимальной величины [3, 6]. В связи с этим нужно уметь распределять суммарную вытяжку по пропускам в соответствии с энергосиловыми возможностями стана.

Для расчета величины вытяжки за один пропуск требуется знать длину участка соприкосновения металла с валками.

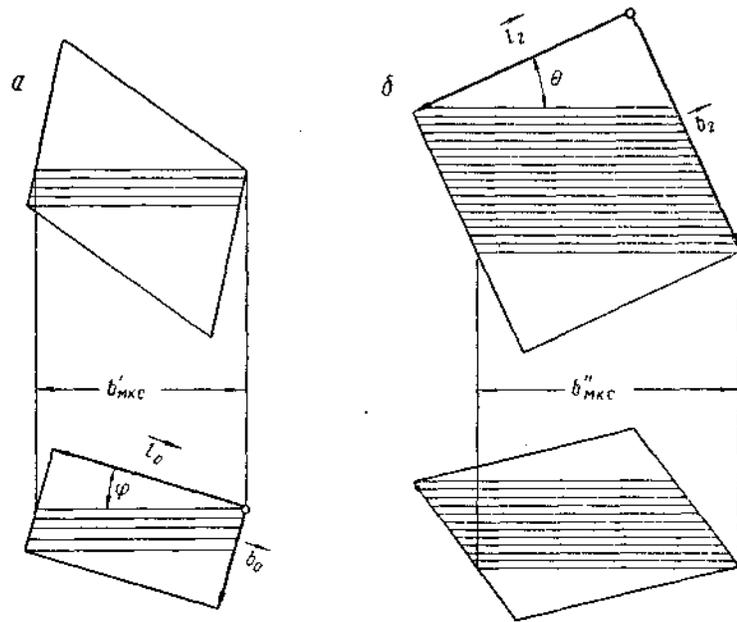


Рис. 4. Геометрические зависимости для определения длины участка соприкосновения металла с валками: а — при прокатке по первой диагонали; б — при прокатке по второй диагонали.

Как показано на рис. 4, длина участка соприкосновения во всех пропусках при прокатке по первой диагонали одна и та же и равна

$$b'_{\max} = \frac{|\vec{l}_0|}{\cos \varphi} = \frac{l_0}{\cos \varphi}. \quad (10)$$

Длина участка соприкосновения металла с валками при прокатке по второй диагонали

$$b''_{\max} = \frac{|\vec{l}_2|}{\cos \theta}.$$

Из условий постоянства объема и отсутствия уширения  $|\vec{l}_2| = \frac{\lambda^2 l_0}{\beta}$ , а угол  $\theta$ , как показано выше, равен  $\varphi$ , поэтому

$$b''_{\max} = \frac{\lambda^2 l_0}{\beta \cos \varphi}. \quad (11)$$

При известных значениях  $b'_{\max}$  и  $b''_{\max}$  определение вытяжки в том или ином пропуске выполняется по любому из существующих методов. Необходимо при этом учитывать, что число пропусков при прокатке по первой или второй диагонали должно быть четным, так как поворот заготовки производится на входной стороне стана, но не обязательно одинаковым.

В тех случаях, когда поворот заготовки на рольгангах выполняется при помощи поворотного стола, формулы (6) и (7) могут быть использованы непосредственно для автоматизации этой операции. Если поворот заготовки осуществляется при помощи пальцев или конических роликов, оператору требуется знать вместо угла  $\varphi$  угол  $\omega$ , так как он определяет положение заготовки относительно оси валков. Из рис. 5 угол  $\omega$  определяется из проекций вектора  $\vec{l}_1$  перед прокаткой по второй диагонали. Этот вектор находим, умножая  $\vec{l}_0$  на произведение тензоров  $A_1 \cdot \Phi_1 \cdot A_2$ ,

$$\vec{l}_1 = \{l_0(\lambda \sin \varphi \cos \psi - \cos \varphi \sin \psi), l_0(-\lambda \sin \varphi \sin \psi - \cos \varphi \cdot \cos \psi)\},$$

а  $\operatorname{tg} \omega$  определяется отношением проекций  $\vec{l}_1$  на оси координат и связан с углом задачи по первой диагонали следующим образом:

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\lambda}.$$

Пример:

Пусть на одноклетьевом листовом стане трио 460/660 с длиной бочки 1870 мм прокатывается лист  $6 \times 1400$  мм из слитка  $\frac{175 \times 610}{210 \times 650} \times 1000$  мм. После

двух пропусков для снятия конусности слитка получен раскат с размерами  $155 \times 650 \times 1200$  мм, вслед за чем прокатку ведут «на угол». Используя приведенные в статье формулы, рассчитаем необходимые параметры процесса прокатки.

Условная длина бочки валков  $B = 1870 - 200 = 1670$  мм, а отношение этой длины к начальной длине заготовки  $l_0 = 1200$  мм, составляет  $\frac{B}{l_0} = \frac{1670}{1200} = 1,39$ ; степень увеличения ширины заготовки  $\beta = \frac{b_2}{b_0} = \frac{1400}{650} = 2,15$ ;

форма заготовки, характеризуемая отношением ширины к длине ее,  $\frac{b_0}{l_0} = \frac{650}{1200} = 0,54$ .

По графику, изображенному на рис. 3 для случая  $\frac{b_0}{l_0} = 0,54$ , находим  $\lambda = 1,53$ .

Зная суммарную вытяжку, находим по формуле (7) угол, на который должна быть повернута заготовка перед прокаткой по первой диагонали

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{\lambda^4 - \beta^2}{\beta^2 - 1}} = \frac{1}{1,53} \cdot \sqrt{\frac{1,53^4 - 2,15^2}{2,15^2 - 1}} = 0,3185,$$

откуда  $\varphi = 17^\circ 40'$  и  $\cos \varphi = 0,9528$ .

Угол, на который должна быть повернута заготовка перед прокаткой по второй диагонали, находим по формуле (6)

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\operatorname{tg} \varphi (\lambda^2 + 1)}{\lambda (1 - \operatorname{tg}^2 \varphi)} = \frac{0,3185 (1,53^2 + 1)}{1,53 (1 - 0,3185^2)} = 0,7737,$$

откуда  $\psi = 37^\circ 44'$ .

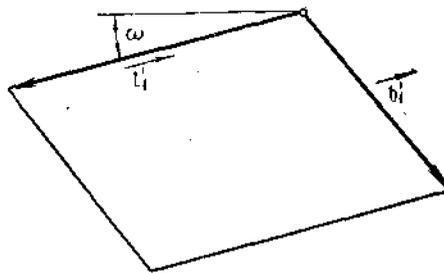


Рис. 5. Определение величины угла, который должна образовывать сторона заготовки с осью валков перед первым пропуском при прокатке по второй диагонали.

Можно найти и угол, который должна образовывать заготовка с осью валков перед прокаткой по второй диагонали, чтобы осуществить поворот на требуемый угол  $\psi$ . По формуле (12) указанный угол

$$\operatorname{tg} \omega = \frac{\operatorname{tg} \psi}{\lambda} = \frac{0,3175}{1,53} = 0,2081,$$

откуда  $\omega = 11^{\circ}48'$ .

Найденная суммарная вытяжка по диагонали  $\lambda = 1,53$  может быть осуществлена в разное число пропусков в зависимости от энергосиловых возможностей стана. Чтобы найти число пропусков (по одной из существующих формул), требуется знать, кроме твердости прокатываемого металла, длину участка соприкосновения металла с валками. Эту длину при прокатке по первой диагонали находим по формуле (10)

$$b'_{\max} = \frac{l_0}{\cos \varphi} = \frac{1200}{0,9528} = 1260 \text{ мм},$$

а при прокатке по второй диагонали по формуле (11)

$$b''_{\max} = \frac{\lambda^2 l_0}{\beta \cdot \cos \varphi} = \frac{1,53^2 \cdot 1200}{2,15 \cdot 0,9528} = 1375 \text{ мм}.$$

#### ЛИТЕРАТУРА

1. М. Л. Зарошинский. Прокатка стали. М., Metallurgizdat, 1948.
2. А. Г. Стукач. Прокатка на угол. Сб. № 2. Обработка металлов давлением, М., Metallurgizdat, 1953.
3. Б. Н. Бухвалов. Прокатка листов с косой задачей в валки. Тр. УПИ им. С. М. Кирова. Сб. 78. Свердловск, 1960.
4. Н. Е. Кочин. Векторное исчисление и начала тензорного исчисления. М., Изд-во АН СССР, 1951.
5. Л. Г. Чубриков, М. И. Сиротин, Д. И. Суяров. Исследование режимов обжатий на толстолистовом стане Ашинского металлургического завода. Статья в наст. сб.
6. O. E m i c k e und K.-H. Lucas. Berechnungsgrundlagen zum Walzen im Winkel bei der Grobblechherstellung. Neue Hütte, 1959, № 2.