

УДК 621.771.06-589.4.014

Ю.Б. КРЮКОВ, НИИ «УкрНИИМет» УкрГНТЦ «Энергосталь»

**ВАРЬИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПРОКАТКИ С
УЧЕТОМ ИСТИННЫХ ГРАНИЦ ВЫХОДА И ПОПЕРЕЧНОГО
ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА В НЕСТАЦИОНАРНОМ ОЧАГЕ
ДЕФОРМАЦИИ**

Виконано аналіз кінематики нестационарного осередка деформації з використанням методу, заснованого на законі збереження енергії. Межі нестационарного осередка деформації визначалися за законом збереження мас із урахуванням потоку зсуву металу, викликаного переміщенням границь у часі. При цьому положення перетину виходу визначалося варіюванням рівняння, що зв'язує координату положення перетину виходу з поздовжньою швидкістю металу в цьому перетині.

Analyzing kinematics of nonstationary deformation zone with using a method based on energy conservation law. Borders of nonstationary deformation zone were determined from mass conservation law in view of displacement flux of metal caused by moving of borders in time. Thus, position of exit section was determined by variation of the equation, which connects the coordinate of exit section position with longitudinal speed of metal in this section.

Нестационарный очаг деформации характеризуется подвижностью во времени своих границ как продольных, так и боковых, не контролируемых стенками калибра. Для решения вариационного уравнения истинного пластического течения [1] необходимо установить функциональную связь между положением границ и варьируемыми параметрами. Рассмотрим функцию положения границы выхода в зависимости от изменения технологических параметров.

Из условия необходимости равенства нормальных скоростей в точке отрыва положения сечения выхода из очага деформации определяется центральным углом, тангенс которого равен

$$\operatorname{tg}K = \frac{V_0}{V_1}, \quad (1)$$

где V_0 – скорость вертикального перемещения вала (знак плюс соответствует увеличению обжатия); V_1 – скорость металла в сечении выхода. С другой стороны, угол наклона касательной к поверхности вала в этой точке отрыва определяется величиной производной в этой точке:

$$\operatorname{tg}K = \frac{\partial Y}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{x^2}{2R} + h_0 - \int_0^t V_0 dt \right) = \frac{x}{R} = \frac{l_2}{R}. \quad (2)$$

Из (1) и (2) следует

$$\frac{l_2}{R} = \frac{V_0}{V_1} \quad \text{или} \quad V_1 = \frac{V_0 R}{l_2}. \quad (3)$$

Скорость в сечении выхода с учетом потока скорости смещения в общем виде

$$V_1 = \frac{Q_\gamma + Q_{\gamma k}}{F_k}, \quad (4)$$

где Q_γ – поток в нейтральном сечении

$Q_{\gamma k}$ – поток скорости смещения между сечениями нейтральным и выхода

F_k – площадь сечения выхода.

Тогда из (3) и (4) положение сечения выхода в общем виде

$$l_2 = \frac{RV_0 F_k}{Q_\gamma + Q_{\gamma k}}, \quad (5)$$

откуда после преобразований получим выражение для определения положения сечения выхода при нестационарной прокатке без уширения для плоского случая

$$l_2 = \frac{1}{V_0} \left[- (V_\gamma Y_\gamma - V_0 x_\gamma) + \sqrt{(V_\gamma Y_\gamma - V_0 x_\gamma)^2 + 2RV_0^2 \left(h_0 - \int_0^t V_0 dt \right)} \right]. \quad (6)$$

Выражение (6) отражает динамическую зависимость положения сечения l_2 от скорости вертикального перемещения валка. Так, с увеличением обжатия $V_0 > 0$ сечение выхода находится за осевым сечением валков $l_2 > 0$ с уменьшением $V_0 < 0$ – до осевого сечения валков $l_2 < 0$.

Определение положения сечения выхода усложняется при наличии уширения [2]. Чтобы найти l_2 по формуле (5), необходимо применить закон изменения ширины по длине очага деформации. Характер формоизменения нестационарного очага деформации определяется путем экспериментального исследования.

Рассмотрим изменения боковой границы нестационарного очага деформации с позиций кинематики течения металла. Известно, что за пределами геометрического очага деформации взаимные перемещения, относительное течение частиц металла пренебрежимо малы. Движение внешних зон представляет собой движение твердого тела, поскольку векторы скорости всех точек движущейся зоны в любой момент времени равны по величине и направлению. Отсюда следует, что в сечении выхода скорости частиц металла могут иметь только одно направление, параллельное OX .

Представив мысленно границу боковой поверхности полосы как подвижный в направлении OZ и изменяющий свою форму во времени "инструмент" $Z(x, t)$, получаем, что в точке B , где начинается образование свободной боковой поверхности жесткого конца, возможны три варианта распределения скоростей (рис. 1).

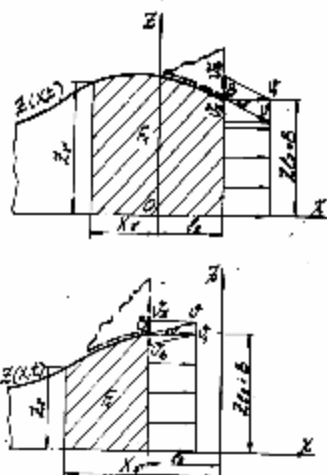


Рисунок 1 – Распределение скоростей в сечении выхода

1. Ширина выходящей полосы возрастает. Отвлекаясь от причин, вызывающих это возрастание, можно считать, что кромка B "инструмента", формирующая боковую поверхность полосы, движется в направлении оси OZ со скоростью V_b . Поскольку результирующая скорость V_1 направлена по оси OX , то, очевидно, скорость течения металла V в точке B должна иметь компоненту V_z , равную по величине и противоположную по направлению скорости V_b .

2. Ширина выходящей полосы убывает. Отвлекаясь от причин, вызывающих это убывание, можно считать, что кромка B "инструмента", формирующая боковую поверхность полосы, движется в направлении, противоположном оси OZ , со скоростью V_b . Поскольку результирующая скорость V_1 направлена по оси OX , то, очевидно, скорость течения металла V в точке B должна иметь компоненту V_z , равную по величине и противоположную по направлению скорости V_b .

3. Ширина выходящей полосы постоянна. Безусловно, этот случай соответствует "неподвижному инструменту", то есть случаю стационарной прокатки, когда неподвижность геометрических границ очага позволяет пластической деформации с известной степенью приближения рассматривать прокатку, как течение металла в канале фиксированной конфигурации. В этом случае в сечении выхода отсутствует уширение.

Во всех трех возможных вариантах результирующая скорости отхода металла в сечении выхода образуется в результате векторного сложения переносной скорости "инструмента" V_b и относительной скорости металла V . Соотношение между величинами переносной и результирующей скоростей определяет направление скорости металла V относительно поверхности "инструмента", то есть направление реальной границы боковой поверхности пластического очага деформаций в точке B .

Из рассмотренного следует:

1) при увеличении обжатия максимум мгновенной ширины полосы находится в пределах очага деформации;

2) при убывании обжатия наибольшее мгновенное значение ширины очага деформации находится в сечении выхода;

3) отсутствие разрыва поперечных скоростей в сечении выхода между жестким концом и пластическим очагом деформации обеспечивается тем, что тангенс мгновенного угла δ наклона касательной к боковой поверхности в точке B определяется отношением скорости изменения ширины полосы к скорости выхода.

Так как скорость изменения ширины $V_b = \frac{dB}{dt}$ всегда противоположна по направлению поперечной составляющей скорости металла V_z , то указанное отношение берется с обратным знаком. Наиболее простая криволинейная форма боковой поверхности очага деформации может быть задана с помощью квадратной параболы:

$$\begin{aligned} x = -l_1 & \quad ; Z = b ; \\ x = l_2 & \quad ; Z = B ; \\ x = l_2 & \quad ; Z'_x = -\frac{dB}{dt} \frac{1}{V_1} \end{aligned} \quad (7)$$

где b и B – ширина полосы в сечениях входа и выхода.

После подстановки граничных условий в общее уравнение параболы и разрешения его относительно коэффициентов получено следующее выражение, описывающее боковую границу очага деформации

$$Z = \frac{b - B - \frac{1}{V_1} \frac{dB}{dt} (l_1 + l_2)}{(l_1 + l_2)^2} (x - l_2)^2 - \frac{1}{V_1} \frac{dB}{dt} (x - l_2) + B. \quad (8)$$

Максимум выражения (8) соответствует значению

$$x_{\max} = \frac{V_1 - l_2(B-b) - \frac{1}{2} \frac{dB}{dt} (l_1^2 - l_2^2)}{V_1(B-l) + \frac{dB}{dt} (l_1 + l_2)}. \quad (9)$$

При нарастании обжатия знак x_{\max} определяется числителем выражения (9) и зависит от соотношений геометрических размеров и отношения скоростей $\frac{dB}{dt}$ и V , то есть максимум (8) может быть расположен как до осевого сечения, так и за ним.

Для случая прокатки с уширением условие сохранения масс в объеме очага деформации, заключенном между нейтральным сечением и сечением выхода

$$Q_1 = Q_\gamma + Q_{\gamma k} - Q_{\gamma k}^z, \quad (10)$$

где Q_1 – поток скорости металла в сечении выхода;

$Q_{\gamma k}^z$ – поток скорости металла в направлении ширины полосы через боковую граничную поверхность. В развернутом виде уравнение (10) можно записать

$$V_1 Y_1 B = V_\gamma Y_\gamma Z_\gamma + V_0 \int_{x_\gamma}^{l_2} Z dx - \int_{x_\gamma}^{l_2} \frac{dZ}{dt} Y dx, \quad (11)$$

где $\frac{dZ}{dt}$ – скорость перемещения боковой границы.

Интегрирование выражения (11) в общем виде и последующее аналитическое определение функциональной зависимости l_2 от технологических параметров затруднительно. Однако, выделяя главную линейную часть приращения функций и скорости перемещения боковой границы $\frac{dZ}{dt} = \frac{dB}{dt}$, можно получить ее в первом приближении.

Входящая в правую часть выражения (11) функция Z_γ в первом приближении может быть принята линейной функцией от продольной координаты.

Первый интеграл выражения (11) представляет собой площадь контакта полосы с валком между сечениями нейтральным и выхода (рис.1). В первом приближении эта площадь криволинейной трапеции F_1 может быть заменена площадью прямоугольника, высота которого равна B .

Второй интеграл выражения (11) после вынесения за знак интегрирования $\frac{dZ}{dt} = \frac{dB}{dt}$ представляет собой площадь F_2 (рис.2), через которую происходит течение металла в поперечном направлении при вертикальных перемещениях вала.

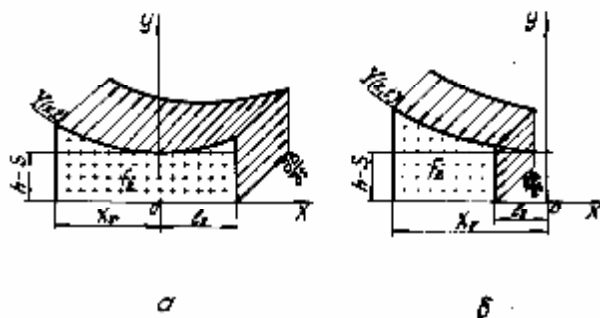


Рисунок 2 – Течение металла в поперечном направлении при вертикальных перемещениях вала

В первом приближении площадь F_2 криволинейной трапеции может быть заменена площадью прямоугольника, высота которого равна $h-S$, где S - величина вертикального смещения валка относительно первоначального положения при стационарной прокатке на толщину h .

Подставляя принятые для подынтегральных функций соотношения в (11), получаем приближенное уравнение сохранения масс в виде

$$V_1 Y_1 B = V_\gamma Y_\gamma Z_\gamma + V_0 B \int_{x_\gamma}^{l_2} dx - \frac{dB}{dt} \int_{x_\gamma}^{l_2} dx \quad (12)$$

Внеся в (12) значения (3) и выполнив преобразования, получим уравнение связи l_2 с технологическими параметрами. Решив его относительно l_2 и отбросив значения, не имеющие физического смысла, получим выражение для определения положения сечения выхода при нестационарной прокатке с уширением

$$l_2 = \frac{1}{\frac{V_0}{V_\gamma} B + \frac{1}{V_\gamma} \frac{dB}{dt} \left(\frac{x_\gamma^2}{2R} - h + S \right)} \left\{ \left[- \left(\frac{x_\gamma^2}{2R} + h - S \right) B - \frac{V_0}{V_\gamma} B x_\gamma - \frac{1}{2V_\gamma} \frac{dB}{dt} \left(\frac{x_\gamma^2}{2R} - h + S \right) x_\gamma \right] + \sqrt{\left[\left(\frac{x_\gamma^2}{2R} + h - S \right) B - \frac{V_0}{V_\gamma} B x_\gamma - \frac{1}{2V_\gamma} \frac{dB}{dt} \left(\frac{x_\gamma^2}{2R} - h + S \right) x_\gamma \right]^2 - 2 \left[\frac{V_0}{V_\gamma} B + \frac{1}{V_\gamma} \frac{dB}{dt} \left(\frac{x_\gamma^2}{2R} - h + S \right) \right] \times \frac{V_0 R}{V_\gamma} (h - S) B} \right\} \quad (13)$$

При $B = 1$ и $\frac{dB}{dt} = 0$ выражение (13) совпадает с (6).

Зная функциональную зависимость положения передней и боковой границы нестационарного очага деформации, можно, применяя вариационное уравнение истинного пластического течения, рассчитать все технологические параметры периодической прокатки в валках постоянного радиуса на компьютере [3]. Такое компьютерное моделирование было выполнено для пускового сортамента (профили типа авторессор и вил автопогрузчика) проектируемого стана с переменным межосевым расстоянием [4].

Предварительно было построено поле скоростей и скоростей деформаций.

$$V_x = \frac{1}{YZ} \left(V_\gamma Y_\gamma Z_\gamma + V_0 \int_{x_\gamma}^x Z dx - \int_{x_\gamma}^x \frac{dZ}{dt} Y dx \right),$$

$$V_y = \frac{\partial Y}{\partial t} \frac{y}{Y} + \frac{\partial Y}{\partial x} \frac{y}{Y} V_x,$$

$$V_z = \frac{\partial Z}{\partial t} \frac{z}{Z} + \frac{\partial Z}{\partial x} \frac{z}{Z} V_x,$$

$$E_x = - \frac{\partial Y}{\partial t} \frac{1}{Y} V_x + \frac{V_0}{Y} - \frac{\partial Z}{\partial t} \frac{1}{Z} V_x - \frac{\partial Z}{\partial x} \frac{1}{Z},$$

$$E_y = \frac{\partial Y}{\partial t} \frac{1}{Y} V_x - \frac{V_0}{Y},$$

$$E_z = \frac{\partial Z}{\partial t} \frac{1}{Z} + \frac{\partial Z}{\partial x} \frac{1}{Z} V_x. \quad (14)$$

Величину продольной скорости металла находили из закона сохранения масс. Скорость в вертикальном направлении, представляющую собой, по определению, сумму локальной и конвективных производных по времени, определяли путем исключения конвективной производной от поперечной координаты. Скорости деформаций определяли дифференцированием по соответствующей координате, а в поперечном направлении - из условия неразрывности.

Результаты расчета технологических параметров процесса приведены на рис. 3.

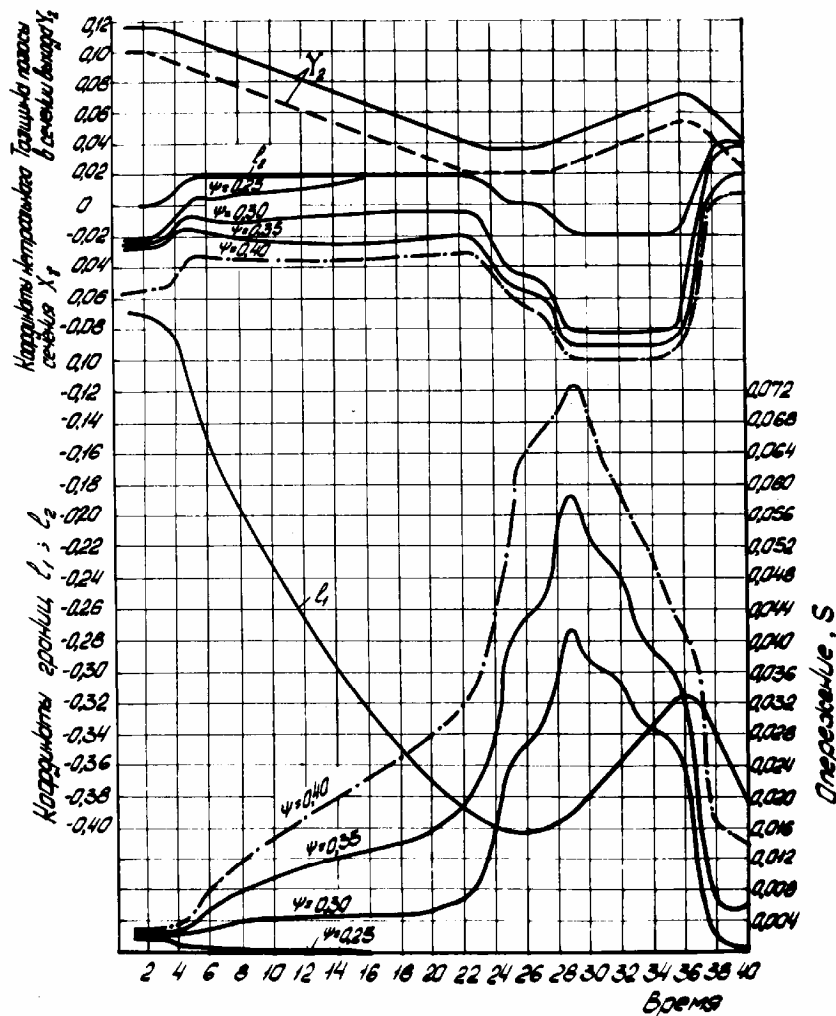


Рисунок 3 – Геометрические параметры очага деформации при периодической прокатке

Здесь в относительных величинах представлено изменение по времени геометрических параметров очага деформации в виде графиков координаты l_1 границы входа в очаг деформации и координаты l_2 границы выхода из очага деформации. Расстояние $l_2 - l_1$ между этими графиками представляет собой переменную величину длины дуги захвата. Следует отметить, что наибольшего значения длина дуги захвата достигает ранее, чем достигается наименьшее значение толщины полосы в сечении выхода Y_2 (максимум обжатия).

Положение сечения выхода из очага деформаций (l_2) вплотную зависит от изменения скорости вертикального смещения валков. При постоянстве скорости вертикального смещения координата сечения выхода для принятой расчетной схемы практически не меняется. При изменении знака скорости вертикального смещения

валка на обратный (при разведении валков) координата сечения выхода меняет знак. В целом для рассмотренного процесса отношение $\frac{|l_2|}{|l_1|}$ находится в пределах $0 \div 12,5 \%$.

Координата положения нейтрального сечения (x_γ) в процессе прокатки - осадки переменна. На рис. 3 представлены графики изменения x_γ по времени при различных значениях показателя трения ψ . Очевидно, что с увеличением показателя трения нейтральное сечение удаляется от сечения выхода. Характерной особенностью функции x_γ является ее сильная зависимость от изменения скорости смещения, тогда как на участках с постоянной скоростью положение сечения изменяется незначительно.

В начальный период процесса с увеличением обжатия нейтральное сечение приближается к осевой плоскости. При этом, если показатель трения мал ($0,15-0,20$), то происходит прекращение процесса прокатки – осадки, начинается буксование. В этот момент расстояние между подвижным сечением выхода и нейтральным сечением ($l_2 - x_\gamma$), которое определяет длину зоны опережения, становится равным нулю.

На протяжении периода постоянства скорости опускания валков имеет место сначала некоторое возрастание, а затем убывание длины зоны опережения. Последнее более четко выражено для меньших значений показателя трения ($0,25-0,30$). При показателе трения $0,25$ имеет место прекращение процесса.

С переменой знака скорости смещения величина зоны опережения увеличивается. Это равносильно переходу к предыдущему состоянию процесса, тогда как уменьшение обжатия в валках переменного радиуса в первую очередь эквивалентно увеличению угла захвата.

Для рассматриваемого процесса графики изменения опережения по времени при различных значениях ψ представлены в нижней части рис. 3. С увеличением обжатия опережение может уменьшаться при малых значениях ψ вплоть до прекращения процесса ($\leq 0,25$) и увеличиваться при больших значениях ψ ($> 0,25$). Наибольшие значения величины мгновенного опережения имеют место при изменении знака вертикальной скорости. Увеличение скорости вертикального смещения валков в 2 раза вызывает прекращение процесса прокатки-осадки при более высоких значениях показателя ψ ($0,25-0,30$).

Качественно полученные соотношения технологических параметров отвечают известным экспериментальным и теоретическим исследованиям, но в отличие от них носят более общий характер. Проведенный анализ результатов показал, что составленная математическая модель процесса учитывает все технологические параметры нестационарной прокатки и их изменение в динамическом взаимодействии.

ВЫВОДЫ.

На основании закона сохранения энергии в очаге деформации предложена методика, отражающая динамическое соответствие между геометрическими параметрами очага деформации и течением металла в нем, что делает ее использование предпочтительным при расчете технологических параметров периодической прокатки.

Список литературы: 1. Тарновский И.Я., Поздеев А.А., Ганаго О.А. и др. Теория обработки металлов давлением (Вариационные методы расчёта усилий и деформации). – М.: Metallurgizdat, 1963. – 672 с. 2. Целиков Н.А., Орлов В.К. Определение обжатий при асимметричной прокатке полос периодического профиля // Высокотехнологичное оборудование для металлургической

промышленности: сб. трудов международной научно-практической конференции. – М.: ВНИИМЕТМАШ, 2004. – С. 183–187. 3. Сагитов Г.А., Вавилов Н.Ю. Энергетический баланс и варьирование параметров нестационарного очага деформации при периодической прокатке // Сортопрокатное производство : отрасл. сб. науч. тр. – Харьков: УкрНИИмет, 1978. – С. 52–56. 4. Медведев В.С., Крюков Ю.Б., Осипенко В.В. Сортопрокатные станы // Перспективы развития горно-металлургического комплекса : Материалы международной научно-практической конференции. – Краматорск, 2004. – С. 52–56.

Поступила в редколлегию 11.11.2008

УДК 621.771.073.8:681.3.06

В.С. МЕДВЕДЕВ, канд.техн.наук, НИИ «УкрНИИМет» УкрГНТЦ «Энергосталь»

МЕТОДИКА КОМПЬЮТЕРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ УНИВЕРСАЛЬНЫХ КАЛИБРОВОК ВАЛКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯЩИЧНЫХ КАЛИБРОВ

Розглянута формалізована методика комп'ютерного проектування універсальних калібрів валків з використанням ящичних калібрів у чернових клітках сортових станів, що базується на методі аналізу та відсіву варіантів. Проектування проводиться за допомогою поетапних процедур, рухаючись по кожній гілці “дерева” калібрівки.

Formalized technique of computer designing of universal roll calibrations with using box calibers in roughing stands of section mills based on analysis and sifting of variants is considered. Designing is carried out with the help of step-by-step procedures under moving along each branch of a calibration "tree".

Эффективность работы сортового прокатного стана во многом определяется степенью универсальности калибровки валков. Чем больше используется общих калибров в технологической схеме прокатки, тем меньше переходов необходимо для производства профилей заданного сортамента. В конечном итоге это приводит к сокращению текущих простоев, снижению расхода рабочих валков, повышению среднечасовой производительности стана и улучшению качества продукции.

Общую схему калибровки валков сортового прокатного стана можно представлять в виде «дерева», разветвляющегося к чистовым проходам. При этом универсальность калибровки повышается с уменьшением числа калибров на каждом уровне (проходе) технологического процесса. Разработка общей схемы калибровки валков, обладающей максимальной универсальностью, является сложной технической задачей, решение которой зависит от правильного выбора критериев оптимальности, систем технологических ограничений и стратегий поиска.

В работе [1] на основе использования элементов математического аппарата теории графов, теории множеств и комбинаторной оптимизации реализована пошаговая процедура построения дерева калибровки для прокатки простых сортовых профилей (круг, квадрат, шестигранник) по схеме: равноосное сечение - неравноосное - равноосное. Однако в этой работе не рассмотрен процесс прокатки в ящичных калибрах, характерный для обжимных групп клетей, и возможность увеличения числа общих калибров путем изменения зазора между валками.

Методика, описанная в нашей статье [2], предусматривает построение общих ящичных калибров с учетом регулирования размеров поперечного сечения раскатов путем изменения зазора между валками при переходе с профиля на профиль. Проектирование дерева калибровки осуществляется с помощью пошаговых процедур