

## К вопросу определения уровня подачи заготовки в валки при профилировании\*

*Превышение ширины заготовки соответствующих ширин в рабочих ручьях и калибре валков, одновременная её контактная встреча с обоими сопряжёнными по калибру формующими валками в двухвалковой клети стана и возникающие препятствия движению заготовки на уровне формовки при образовании участка плавного перехода и наполнении его металлом приводят к пробуксовке и торможению движения, продольному изгибу и скручиванию профиля, короблению и волнистости плоских его участков. Предложено устранять эти недостатки, в том числе смещением уровня подачи заготовки на уровень, при котором во время её подачи в клетку она будет взаимодействовать одновременно с двумя формующими валками. Показаны возможности улучшения условий формообразования профилей и их качества.*

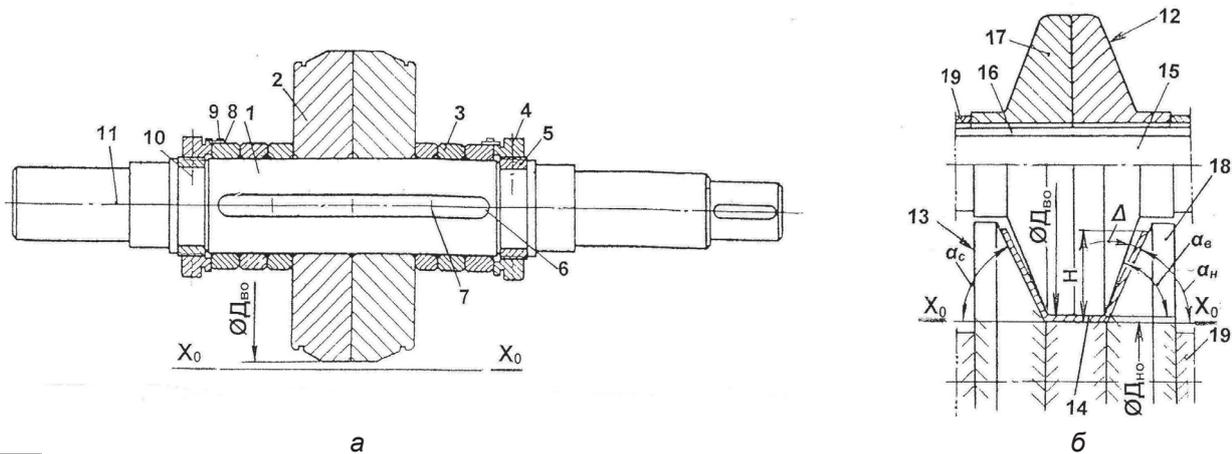
**Ключевые слова:** гнутый профиль проката, листовая заготовка, формующие валки, профилирование, уровень формовки, уровень подачи заготовки, калибр валков, одновременность встречи с валками в формующей клети, качество профиля, волнистость плоских участков

Профилирование относится к весьма прогрессивному, непрерывно интенсивно развивающемуся технологическому процессу механической обработки металлов давлением, в котором предусматривается поперечное последовательное и ступенчатое по технологическим переходам постепенное формоизменение по длине листовой заготовки, продольно перемещаемой во встречно вращающихся сопряжённых по калибру клетях профилегибочного стана формующих валках, путём продольного перемещения и деформирования её участков в элементы гнутого профиля. Развитие и интенсивное расширение производства гнутых профилей проката на профилегибочных станах и агрегатах объясняются технологическими и экономическими преимуществами этого способа перед другими способами получения профилей, в том числе штамповкой, прокаткой и протяжкой [1-7]. Достоинством процесса профилирования является также возможность его совмещения, при необходимости, в одном технологическом потоке с такими сопутствующими производственными операциями, как подготовка исходной листовой заготовки к профилированию, размотка рулонной заготовки и её правка, сварка встык концов заготовки, удаление припуска, её перфорация, поперечная резка на мерные длины, обрезка продольных и поперечных кромок, продольная сварка кромок замкнутых гнутых профилей, резка готовых профилей на заданные длины, клеймение, рифление, штамповка, продольная гибка, термообработка, нанесение и удаление эмульсии, формообразование замковых элементов и соединение с их помощью простых профилей воедино в сборно-разборные, изготовление профилей повышенной заводской готовности, в том числе с наполнителями, разнотолщинных, расставленного сечения, с продольными и поперечными периодически повторяющимися гофрами, с элементами двойной и

большей толщины, промасливание профилей и удаление смазки, нанесение защитных антикоррозионных и декоративных покрытий, обвязка, взвешивание, пакетирование и др.

Рабочие валки формующих клеток профилегибочных станов промышленного назначения для массового производства профилей (рис. 1, а) обычно изготавливают сборно-разборными: из рабочего вала и закреплённых на нём воедино сменных формующих дисковых элементов вала (профильных шайб) с помощью шпонки, дистанционных втулок, закладных в проточки вала составных резьбовых втулок и гаек к ним. Преимуществом таких валков является простота изготовления их отдельных элементов в сравнении с цельными валками; возможность изготовления и применения меньшего количества комплектов рабочих валов, чем комплектов валков; унификация рабочих валов, дисковых формующих и дистанционных элементов валков и сокращение их запаса на стане; уменьшение металлоёмкости комплектов валков; меньшая трудоёмкость изготовления рабочего инструмента для профилирования (дисковых формующих элементов валков) в сравнении с инструментом для штамповки или горячей прокатки (крупногабаритными штампами или валками для прокатки); в связи с изготовлением валков для профилирования в основном на типовом станочном оборудовании с меньшими затратами; возможность сравнительно лёгкой замены на стане быстро изнашиваемых элементов валков и корректировки зазора в калибре. Достоинством таких валков является также возможность изготавливать быстро изнашиваемые их участки из наиболее прочных и износостойких материалов, создавать сборно-разборные конструкции со свободно вращающимися относительно вала дисковыми формующими элементами и валки для изготовления профилей с периодически повторяющимися продольными и

\* В работе принимали участие Т. М. Докторова и С. Мицкевич



**Рис. 1.** Составной валок профилигибочного стана (а): 1 – рабочий вал; 2 – рабочий формирующий дисковый элемент валка; 3 – дистанционный элемент (втулка); 4 – гайка; 5 – составная резьбовая втулка; 6 – шпонка; 7 – винт; 8 – стопорная планка; 9 – винт стопорной планки; 10 – штифт; 11 – ось вращения валка;  $X_0$ - $X_0$  – уровень формовки и схема сопряжённых по калибру валков для изготовления швеллера в промежуточном проходе (б): 12 – верхний охватываемый валок; 13 – нижний охватываемый валок; 14 – формируемый профиль; 15 – рабочий вал валка; 16 – шпонка; 17 и 18 – формирующие дисковые элементы соответственно верхнего и нижнего валков; 19 – дистанционные цилиндрические элементы (втулки)

поперечными гофрами. Обычно основные размеры рабочих валов и дистанционных втулок для верхних и нижних валков стана одинаковы. Это позволяет широко применять упомянутые валы и втулки из одного унифицированного комплекта практически для всех составных формирующих валков стана.

Рабочие ручки и калибры формирующих валков профилигибочных станов могут выполняться с углами ( $\Delta = \alpha_{\text{в}} - \alpha_{\text{н}}$ ) и участками освобождения (рис. 1, б) или без них. В конструкции ручьев без углов освобождения ( $\alpha_{\text{в}} = \alpha_{\text{н}}$ ) обеспечивается равномерный зазор по всей ширине калибра валков как на прямолинейных участках, так и на криволинейных (в том числе тороидальных); как на горизонтальных цилиндрических участках ручьев, так и на наклонных – прямолинейных конических. При этом с увеличением высоты формовки  $H$  профилируемой заготовки увеличиваются её относительное скольжение в валках, энергетические потери на трение, износ валков, ухудшается качество профиля и т. д. Ввиду этого данная конструкция калибров не получила широкого распространения и применяется в отдельных случаях для производства профилей небольшой высоты или когда необходимо локально создать объёмное напряжённо-деформированное состояние металла, повысить пластические свойства металла и качественно отформовать определённые элементы переходных форм профиля, в том числе для качественной отформовки мест изгиба, изменения направления остаточных напряжений, увеличения тягового усилия со стороны валков, поперечного перемещения металла в калибре валков, предупреждения возможного хрупкого разрушения профиля, уменьшения пружинения и в некоторых других случаях.

Выполнение калибров валков с участками или углами освобождения ( $\alpha_{\text{в}} > \alpha_{\text{н}} = \alpha_{\text{с}}$ , здесь  $\alpha_{\text{с}}$  – угол подгибки полки профиля) заметно уменьшают указанные недостатки вследствие увеличения зазора в местах с большим относительным скольжением между профилируемой заготовкой и формирующими валками. Следует отметить, что горизонтальные участки

калибра на уровне основных диаметров верхнего  $D_{\text{вo}}$  и нижнего  $D_{\text{нo}}$  валков в отдельных случаях выполняются с уменьшенными или увеличенными зазорами, участками освобождения, с применением свободно вращающихся относительно рабочего вала дисковых формирующих элементов валка или отключением валка от привода.

Обычно каждый формирующий валок устанавливается в станинах двухвалковых клетей стана на двух опорах в подшипниках с расположением осей их вращения горизонтально, параллельно друг другу, уровню формовки  $X_0$ - $X_0$  и осям валков в других аналогичных клетях. При этом в осевой плоскости валков  $G$ - $G$ , расположенной перпендикулярно направлению движения заготовки в стане, рабочие ручки валков каждой формирующей клетки образуют калибр. Приводные валки каждой формирующей клетки стана соединяются шпindelными устройствами с приводными выходными валами шестерённых клетей. Основные (катающие) диаметры нижних валков  $D_{\text{нo}}$  принимаются минимальными, с учётом или без учёта их увеличения по переходам для создания натяжения заготовки в стане, из условий достаточной прочности и жёсткости рабочего вала и надетых на него дисковых формирующих элементов и дистанционных втулок. Основные диаметры верхних валков  $D_{\text{вo}}$  и максимальные нижних дополнительно проверяются на соответствие заданному сортаменту формируемых профилей, с тем чтобы разместить в теле каждого валка переходные формы профилируемых заготовок максимальной высоты, выполнить рабочие ручки соответствующей глубины с учётом закрытия калибров направляющими буртами (при необходимости) и обеспечить оптимальную прочность и жёсткость рабочего вала и других элементов сборного валка с учётом их износа и последующего восстановления. Окончательно размеры основных диаметров валков и их отношение  $i$  в формирующей клетке принимаются при проектировании профилигибочного стана и выборе скоростей вращения выходных валов в шестерённой клетке. Полученные таким образом размеры

основных диаметров валков и их отношение  $i$  в дальнейшем сохраняют постоянными для одной клетки, группы или всех клеток стана независимо от формы и размеров конкретного профиля:

$$i = D_{\text{вo}} / D_{\text{нo}} = (\text{constant}). \quad (1)$$

Важно отметить, что обычно для станков с валками вышеприведённой составной конструкции нижние охватывающие валки устанавливаются в станинах формирующих клеток таким образом, что образующие цилиндрических поверхностей их основных диаметров во всех клетях со стороны верхних охватываемых валков условно касаются одной горизонтальной плоскости, являющейся уровнем формовки  $X_0-X_0$ , а врез калибра валков производится вертикально от упомянутого уровня формовки в сторону оси вращения верхнего валка. С увеличением высоты формовки профиля и глубины рабочих ручьев диаметральный размер нижних валков возрастает, в то время как ответные им диаметральный размер на верхнем валке соответственно уменьшаются, фактически без существенного изменения величины основных диаметров верхнего  $D_{\text{вo}}$  и нижнего  $D_{\text{нo}}$  валков. Следует отметить, что преимущественно в первом формирующем технологическом проходе исходную плоскую заготовку, сравнительно не жёсткую, формоизменяют в промежуточный профиль, меньшей габаритной ширины и большей высоты, чем соответствующие размеры заготовки, с большей жёсткостью сечения. При этом доля составляющей вертикального полезного перемещения  $\Delta V_{\text{в}}$  металла формируемой заготовки (в плоскостях вращения горизонтальных валков) при профилировании в полном его перемещении  $\Delta V_{\text{ф}}$  значительно больше, чем более затратного поперечного  $\Delta V_{\text{г}}$  (горизонтального) перемещения.

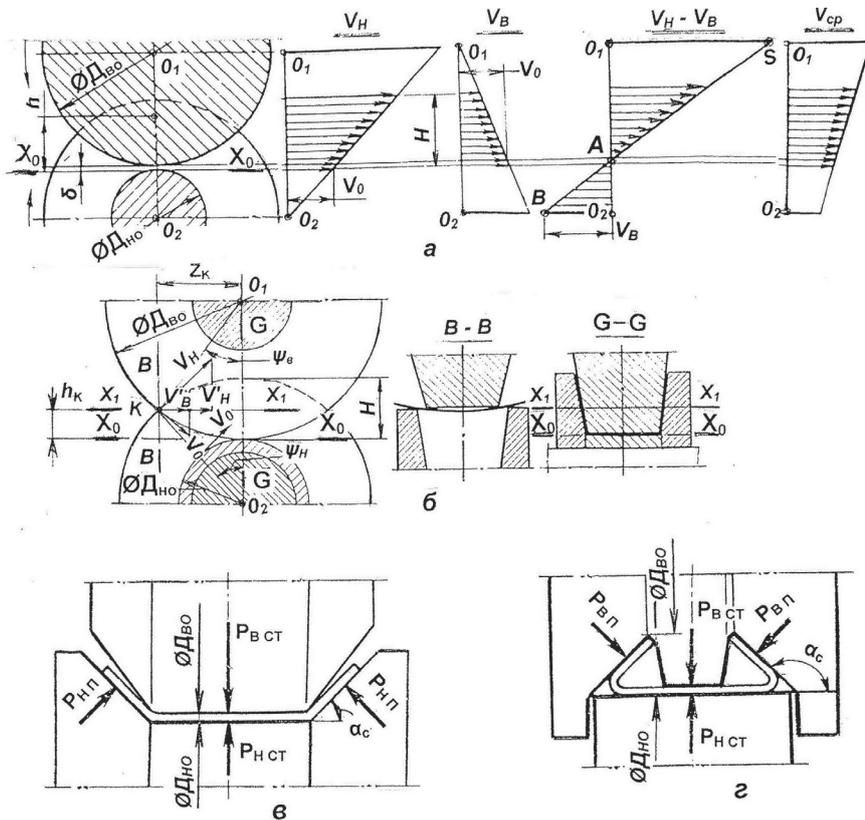
Как правило, оптимальный скоростной режим профилирования разрабатывают с учётом равенства окружных скоростей  $V_0$  сопряжённых по калибру охватываемого и охватывающего валков в местах основных диаметров  $D_{\text{вo}}$  и  $D_{\text{нo}}$ . Это условие обеспечивают специально подобранным передаточным отношением  $i$  зубчатой пары цилиндрической шестерёнчатой клетки или аналогичного устройства, которое определяется при проектировании стана и принимается в соответствии с (1), равным отношению  $i$  основных диаметров валков соответствующих клеток стана. Обычно, это отношение  $i$  принимают в зависимости от назначения стана, то есть от сортамента изготавливаемых профилей и высоты их формовки. Для мелкосортных профилей небольших станков со сравнительно небольшой высотой формовки отношение  $i$  часто принимают близким или равным единице. При этом врез рабочих ручьев и калибра для формообразования профиля производится одновременно в верхний и нижний валки. Для крупногабаритного сортамента высокопроизводительных профилирующих станков  $i$  принимают значительно большим (более двух). Тогда для уменьшения металлоёмкости валков, создания компактной конструкции стана, унификации основных механизмов и узлов оборудования врез калибра и рабочих ручьев для формообразования профиля производится от уровня формовки в

сторону только одного – верхнего валка (рис. 2). Так, для каждого из профилирующих агрегатов, установленных на металлургических заводах, отношение основных диаметров валков во всех формирующих клетях и передаточные отношения приняты одинаковыми и составляют: 2,2 для агрегата  $1 \div 4 \times 400 \div 1500$ ; 2,333 для агрегата  $2 \div 7 \times 80 \div 500$ ; 2,48 для агрегата  $2 \div 6 \times 100 \div 600$ ; 2,5 для агрегата  $1 \div 4 \times 50 \div 300$ . Для профилирующего стана  $0,5 \div 2,5 \times 600 \div 1500$ , предназначенного для изготовления листовых гофрированных профилей, и агрегата  $1 \div 5 \times 300 \div 1650$  для изготовления профилей высокой жёсткости с продольными и поперечными гофрами глубиной до 50 мм  $i = 1$ . Важно отметить, что оси вращения как нижних, так и верхних валков при  $i = 1$  не всегда будут находиться в одной плоскости, параллельной упомянутой горизонтальной плоскости, являющейся уровнем формовки  $X_0-X_0$ , в связи с применением нижних валков с различной величиной основных диаметров, например, для создания натяжения заготовки в стане; при  $i \neq 1$  оси валков будут также на разных уровнях.

При разработке технологии профилирования и калибровки валков переходные промежуточные формы профиля и их последовательное расположение должны быть таковы, чтобы средняя окружная скорость в калибре каждой последующей пары валков была больше, чем в предыдущей. Так как практически трудно произвести такой расчёт скорости, то увеличение окружных скоростей каждой последующей пары валков производят дополнительно последовательным увеличением основных диаметров. Для производства мелких профилей толщиной  $0,3 \div 2,5$  мм увеличивают основные диаметры на 0,4 %, а для профилей толщиной менее 0,3 мм – на 0,25 %. Для крупногабаритных профилей, изготавливаемых на оборудовании, установленном в металлургии, предусмотрено увеличение основных диаметров валков на  $0,1 \div 0,4$  %.

Скоростной режим профилирования для общего случая, когда  $D_{\text{вo}} \geq D_{\text{нo}}$  в каждой паре валков, характеризуется абсолютными и относительными скоростями отдельных точек контакта формируемой заготовки и валков с учётом силового воздействия валков на формируемую заготовку. Окружные скорости приводного валка зависят от угловых скоростей и расстояния его рассматриваемых точек до оси вращения. Так как угловые скорости сопряжённых по калибру приводных валков одной клетки жестко взаимосвязаны через шестерёнчатую клетку, то также взаимосвязаны абсолютные и относительные скорости их точек в калибре и рабочих ручьях. При этом также важно дополнительно учитывать расстояние материальных точек валка от осевой плоскости валков и направление движения формируемой заготовки в стане.

Рассмотрим распределение скоростей в калибре валков промежуточной клетки стана при изготовлении характерных для профилирования швеллерных профилей. Из условия равенства окружных скоростей  $v_0$  в местах основных диаметров верхнего и нижнего валков определено распределение окружных скоростей  $v_{\text{в}}$  и  $v_{\text{н}}$  в калибре для обоих валков (рис. 2, а). Важно отметить, что для станков с увеличивающимися основными диаметрами формирующих валков по



**Рис. 2.** Распределение скоростей в калибре валков промежуточной клетки (а): графики окружных скоростей на нижнем ( $v_H$ ) и верхнем ( $v_B$ ) валках, относительных скоростей точек нижнего и верхнего ( $v_H - v_B$ ) валков и средней скорости противоположных точек верхнего и нижнего валков  $v_{CP} = (v_H + v_B) / 2$ ; действующих скоростей при задаче заготовки в валки первой формирующей клетки (б) стана:  $X_0 - X_0'$  – уровень формовки;  $X_1 - X_1'$  – рекомендуемый уровень задачи заготовки в валки; схемы приложения сил в калибре при подгибке полок на угол  $\alpha_c < 90^\circ$  (в) и угол  $\alpha_c > 90^\circ$  (з)

клетям скорость  $v_0$  будет увеличиваться пропорционально изменению радиуса окружности основного диаметра каждого валка в соответствующей клетке. Установлено, что окружные скорости в калибре валков в радиальном направлении изменяются различно [8, 9]. Для нижнего, например, охватывающего валка интенсивность этого увеличения больше во столько раз, во сколько раз основной его диаметр  $D_{HO}$  меньше основного диаметра  $D_{BO}$  верхнего охватываемого валка. Из анализа относительных скоростей точек нижнего и верхнего валков ( $v_H - v_B$ ) следует, что эти скорости будут равны только в точке А, положение которой по высоте легко определяется из подобия треугольников  $\Delta O_1AS$  и  $\Delta O_2AB$ :

$$O_2A = D_{HO} / 2 + \delta / (i + 1), \quad (2)$$

где  $\delta$  – зазор между валками в калибре;  $i$  – отношение основных диаметров  $D_{BO} / D_{HO}$ .

Зависимости окружных скоростей в калибре от отношения  $i$  основных диаметров валков и расстояния  $h$  рассматриваемых точек от цилиндрической поверхности основного диаметра нижнего валка имеют вид:

$$\begin{aligned} v_B &= v_0 \{1 - [2(h - \delta) / i D_{HO}]\}; \\ v_H &= v_0 [1 + (2h / D_{HO})]. \end{aligned} \quad (3)$$

Из уравнений (3) следует, что с увеличением расстояния  $h$  окружные скорости противоположных точек верх-

него валка уменьшаются, а нижнего возрастают. При этом средняя скорость  $v_{CP}$  в точках калибра валков

$$\begin{aligned} v_{CP} &= 0,5 (v_B + v_H) = \\ &= v_0 \{1 + [h(i - 1) + \delta] / i D_{HO}\}. \end{aligned} \quad (4)$$

Для упрощения анализа принимаем, что зазор между валками одинаков по всему периметру заготовки в калибре и сцепление формируемого профиля с валками одинаково во всех точках их контакта. Тогда, из анализа формулы (4) следует, что при увеличении  $i$  и  $h$  средняя скорость  $v_{CP}$  противоположных точек по высоте калибра возрастает (см. рис. 2). Следовательно, возрастает и скорость профилируемой заготовки. При  $i = 1$  средняя скорость не зависит от  $h$ , так как в этом случае

$$v_{CP} = v_0 (1 + \delta / D_{HO}). \quad (5)$$

Таким образом, при  $i > 1$  валки стремятся перемещать формируемый профиль со скоростью, в общем случае большей, чем окружная скорость в местах основных диаметров. Размещение рабочего ручья в нижнем валке с подгибкой элементов профиля от уровня основного диаметра к оси его вращения приводит к уменьшению  $v_{CP}$ , так как окружные скорости нижнего валка  $v_H$  будут уменьшаться интенсивнее, чем окружные скорости верхнего валка  $v_B$  увеличиваться. Поэтому при разработке технологии профилирования и калибровки валков для создания правильного скоростного режима и оптимальных условий формовки следует учитывать влияние величины  $h$  и направления подгибки, распределение давления металла в рабочих ручьях валков, форму заготовки и профиля в каждом технологическом проходе, уровень задачи формируемой заготовки в валки и распределение перемещения металла на участке плавного перехода в каждой рабочей клетке. При этом следует учитывать, что скорость движения профилируемой заготовки определяется суммарным воздействием на неё всех формирующих валков в местах их одновременного контакта во всех клетках стана.

Важно отметить, что исходная плоская заготовка для профилирования обычно подаётся в стане горизонтально на уровне плоскости, касательной к цилиндрическим поверхностям основных диаметров нижних валков (на уровне формовки  $X_0 - X_0'$ ): вначале с её подъёмом перед валками, а затем постепенным опусканием в рабочих ручьях валков на уровень формовки. При этом задача заготовки в валки первой формирующей клетки затруднена в большей степени, чем задача заготовки в виде промежуточного профиля в валки других клеток. Это связано с препятствием

продольному перемещению плоской заготовки, шириной большей, чем ширина рабочего ручья, в калибр валков и далее по стану обычно со стороны выступающих цилиндрических буртов – участков, охватывающих дисковые элементы валка (здесь нижнего), недостаточной жёсткостью заготовки и сравнительно большими глубиной формующего ручья и калибра в нижнем охватывающем профиле валке и относительно большими вертикальными перемещениями металла торца переднего конца заготовки при её задаче в валки для формовки и центрирования. Сопряжённый по калибру охватываемый валок, в данном случае верхний, начинает контактировать с заготовкой лишь в калибре валков и не способствует в достаточной мере захвату и перемещению заготовки в валках, особенно в первых формующих клетях стана, когда вертикальные перемещения её подгибаемых участков максимальны. Для устранения этого недостатка и обеспечения надёжной подачи металла заготовки в валки применяют различные технологические приёмы, в том числе формовку профиля в первой клетке по менее жёстким режимам; придание переднему концу заготовки трапециевидной-клиновидной формы с последующим его удалением в отход; дополнительное приложение к заготовке продольных, задающих профиль в валки, сил; применение валков увеличенных диаметров; увеличение расстояния между клетями; установку технологических проводок и др. Однако эти приёмы в ряде случаев приводят к ухудшению качества продукции, усложнению конструкции оборудования и инструмента, увеличению металлоотходов, снижению производительности оборудования и другим недостаткам.

Исследованиями скоростного режима при поштучном профилировании швеллера установлено, что исходная заготовка в местах будущих полок на входе в валки первой формующей клетки (рис. 2, б) захватывается нижним и верхним валками в месте условного пересечения окружностей их максимальных диаметров ( $D_{\text{НО}} + 2H$ ) и  $D_{\text{ВО}}$  (точке К). При этом расстояние от точки К до осевой плоскости валков  $G-G$  определяется по формулам:

$$Z_{\text{К}} = (0,5 D_{\text{НО}} + H) \sin \psi_{\text{Н}} \text{ или } Z_{\text{К}} = 0,5 D_{\text{ВО}} \sin \psi_{\text{В}}, \quad (6)$$

где  $\psi_{\text{Н}}$  и  $\psi_{\text{В}}$  – углы, определяемые из геометрических соотношений размеров формующих валков, ручьёв в них и калибра;  $H$  – глубина ручья в нижнем охватывающем валке.

Для надёжного захвата заготовки одновременно двумя сопряжёнными по калибру валками торец переднего конца плоской заготовки должен находиться выше уровня формовки  $X_0-X_0$ , на расстоянии  $h_{\text{К}}$  от него, например, в горизонтальной плоскости  $X_1-X_1$  на уровне упомянутых точек К.

$$h_{\text{К}} = H - (0,5 D_{\text{НО}} + H) (1 - \cos \psi_{\text{Н}}), \quad (7)$$

При профилировании, после прохождения переднего торца заготовки точек К, на переднем конце заготовки образуется участок плавного перехода с продольным подъёмом периферийных участков заготовки у кромок, опусканием центрального участка (будущей стенки профиля) на уровень формовки

$X_0-X_0$  и образованием будущих мест поперечного изгиба между будущими стенкой и полками профиля. В осевой плоскости валков (калибре) образуется форма промежуточного профиля, которая после дальнейшего деформирования заготовки и её пружинения подаётся в последующие клетки стана для доформовки профиля. Во вторую и последующие формующие клетки деформируемая заготовка, ставшая более жёсткой после формовки в первой клетке, подаётся с размещением её стенки на уровне формовки  $X_0-X_0$  и приложением к заготовке продольных сил в сторону профилирования, обеспечивая совместно с приводными валками захват и дальнейшее формообразование профиля.

Результаты анализа скоростного режима и опыт производства гнутых профилей проката и электросварных прямошовных труб показал, что при непрерывном процессе профилирования вследствие уменьшения скорости продольного перемещения формуемой заготовки при подгибке периферийных её участков на углы свыше  $90^\circ$  по сравнению со скоростью в первых клетях (при подгибке на углы до  $90^\circ$ ) происходит излом формуемого профиля вследствие «набегания» металла из первых клетей стана. Для устранения «набегания» можно увеличить диаметры верхних валков в клетях, где производят подгибку на углы свыше  $90^\circ$ , или уменьшить диаметры валков в первых клетях; возможна также корректировка скорости профиля за счёт отключения верхних валков от привода стана.

Следует отметить, что при разработке технологии профилирования и определении диаметральных размеров валков необходимо учитывать степень влияния каждого из валков на перемещение формуемой заготовки вдоль стана. Как показал анализ, тяговое усилие, прикладываемое со стороны верхнего и нижнего валков к профилю, неодинаково. При подгибке полок профиля на углы  $\alpha_c$  до  $90^\circ$ . (рис. 2, в) в калибрах с углами освобождения тяговые усилия со стороны верхнего и нижнего валков соответственно равны:

$$T_{\text{В}} = P_{\text{ВСТ}} \mu; T_{\text{Н}} = (P_{\text{НСТ}} + 2 P_{\text{НП}}) \mu, \quad (8)$$

где  $P_{\text{ВСТ}}$  – нормальная вертикальная составляющая давления, прикладываемая со стороны верхнего валка к профилю;  $P_{\text{НСТ}}$  и  $P_{\text{НП}}$  – нормальные составляющие давления, прикладываемые со стороны нижнего валка соответственно к стенке и полкам профиля;  $\mu$  – коэффициент трения формуемого профиля в валках при профилировании.

Из условия равновесия профиля в калибре валков имеем:

$$P_{\text{В}} = P_{\text{Н}} = P_{\text{НСТ}} + 2 P_{\text{НП}} \cos \alpha_c, \quad (9)$$

где  $P_{\text{В}}$  и  $P_{\text{Н}}$  – соответственно нормальная вертикальная составляющая давления, прикладываемая со стороны верхнего и нижнего валков к профилю в калибре.

Сравнительный анализ формул (8) и (9) показывает, что для  $\alpha_c < 90^\circ$  величина  $(P_{\text{НСТ}} + 2 P_{\text{НП}})$  больше вертикальной составляющей нижнего валка  $P_{\text{Н}}$  или верхнего  $P_{\text{В}}$  и, следовательно, тяговое усилие со стороны нижнего охватывающего валка будет большим, чем со стороны верхнего охватываемого, на величину

$\Delta T = T_H - T_B = 2 P_{H\Pi} (1 - \cos \alpha_c) \mu$ . В связи с этим, преимущественно при непрерывном процессе профилирования в первых проходах, когда  $\alpha_c < 90^\circ$ , продольное перемещение профиля в большей степени обеспечивается нижними охватывающими валками. Для предупреждения торможения со стороны верхнего валка его надо отключать от привода или увеличивать окружную скорость в калибрах, например, за счёт увеличения диаметров валков или увеличения их угловой скорости. При поштучном процессе необходимо дополнительно предусматривать надёжный захват заготовки валками в каждой формирующей клети стана.

При подгибке полок на углы  $\alpha_c > 90^\circ$  (рис. 2, *г*) тяговые усилия со стороны верхнего и нижнего валков соответственно равны  $T_B = (P_{BCT} + 2 P_{B\Pi}) \mu$  и  $T_H = P_{HCT} \mu$ . Из условия равновесия профиля в калибре валков имеем:

$$P_B = P_H = P_{BCT} + 2 P_{B\Pi} \cos (180 - \alpha_c). \quad (10)$$

Из сравнительного анализа полученных зависимостей следует, что величина  $P_{BCT} + 2 P_{B\Pi}$  больше величины  $P_{BCT} + 2 P_{B\Pi} \cos (180 - \alpha_c)$  и, следовательно, больше вертикальной составляющей давления верхнего валка  $P_B$  или нижнего  $P_H$ . Тяговое усилие со стороны верхнего охватывающего валка будет большим, чем со стороны нижнего охватываемого, на величину  $\Delta T = T_B - T_H = 2 P_{B\Pi} \mu (1 + \cos \alpha_c)$ . В связи с этим при подгибке полок на углы, превышающие  $90^\circ$ , перемещение профиля в большей степени обеспечивается верхними валками из-за повышенного сцепления профиля с ними.

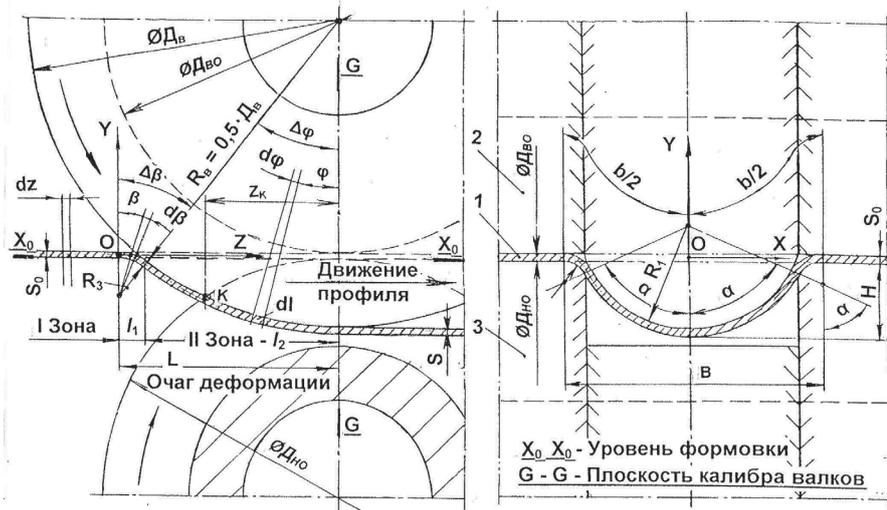
При создании и совершенствовании профилигибочного оборудования, разработке технологического процесса, инструмента и технологической оснастки, с целью повышения эффективности производства, разработчики стремятся одновременно с повышением производительности и улучшением качества продукции к максимальному сокращению числа технологических операций – переходов, уменьшению необходимых для их выполнения формирующих рабочих клетей многоклетевых стана и формообразующих профилей валков и технологической оснастки. Это становится возможным при максимально допустимом формоизменении исходной заготовки в каждом технологическом переходе, оптимальных энергозатратах при профилировании и получении продукции требуемого качества. Обычно формирующие нижние валки на стане устанавливают в рабочих клетях таким образом, чтобы цилиндрические поверхности их основных диаметров со стороны сопряжённых с ними верхних валков касались условно одной горизонтальной плоскости, называемой плоскостью формовки (профилирования), с реализацией такого условного касания установкой упомянутых нижних валков на стане по струне. В этой горизонтальной плоскости и предусматривается подача исходной листовой заготовки, в том числе в валки первой формирующей клети.

Однако в связи с препятствием продольному перемещению плоской заготовки или отдельным её участкам шириной большей, чем соответствующая ширина рабочего ружья или калибра валков на уров-

не задачи, неодновременная первоначальная встреча формируемой заготовки с обоими формирующими валками в клети стана и различная протяжённость формируемых участков заготовки на участке плавного перехода, в ряде случаев приводит к её пробуксовке и торможению в профилигибочном стане, волнистости плоских участков профиля, ухудшению качества его поверхности, забоинам и смятию торцевых участков переднего конца формируемой заготовки, продольной и поперечной кривизне её участков и продольному скручиванию профиля. Для устранения этих недостатков разработан и предлагается способ изготовления гнутых профилей проката, по которому и предусматривается вертикальное смещение уровня задачи заготовки в формирующие валки. При этом по меньшей мере в одной первой формирующей клети стана заготовка во время задачи в клеть будет взаимодействовать одновременно с её формирующими валками (см рис. 2, *б*). Предусматривается также возможность ступенчатого по клетям вертикального смещения уровня задачи формируемой заготовки в валки промежуточных клетей стана, при которой улучшаются условия дальнейшего стабильного формообразования угловых, швеллерных, замкнутых и других сортовых гнутых профилей при профилировании.

Одним из распространённых дефектов тонкостенных гнутых профилей с развитыми по ширине плоскими элементами, в том числе листовых гофрированных и профилей высокой жёсткости, является волнистость их плоских периферийных и межгофровых участков, обусловленная локальным воздействием на них возникающих в процессе локального изгиба с пластическим поперечным растяжением продольных деформаций сжатия (укорочения) заготовки в местах формообразования продольных рёбер жёсткости и сопряжённых с ними участков. Эффективным средством уменьшения упомянутой волнистости может служить применение непрерывного способа профилирования со стабильными параметрами участка плавного перехода [10-12] и надёжная задача заготовки в валки. При этом для получения на плоской заготовке 1 желобчатого гофра в валках 2 и 3 (рис. 3) с максимально возможной глубиной  $H$  и максимально возможным отношением развёртки  $b$  его поперечного сечения к ширине  $B$  гофра ( $b/B$ ) перед формовкой гофров участок заготовки может быть, например, нагрет, предварительно растянут или раскатан путём придания ему волнистой формы с таким расчётом, чтобы максимально деформируемые участки будущего гофра соответствовали малодеформируемым участкам промежуточной заготовки, а периметр участка до формовки был близок периметру этого участка на готовом профиле.

В процессе непрерывного профилирования условно выделенный элемент заготовки шириной  $dx$ , высотой  $S_0$  и длиной  $dz$ , продольно перемещаемый в полосу 1 (рис. 3) и соответствующий в дальнейшем формообразуемому элементу вершины гофра, вначале с помощью валков 2 и 3 продольно искривляется в I зоне ( $l_1$ ) очага деформации выпуклостью в сторону основания гофра (вверх) по внутреннему радиусу  $R_3$  [кривизна  $(1/\rho_b)_z < 0$ ]. Затем в сечении, соответствующем



**Рис. 3.** Схема очага деформации при формообразовании на рулонной заготовке 1 непрерывным способом в валках 2 и 3 желобчатого гофра с его основанием на уровне формовки  $X_0-X_0$  и задачей заготовки на том же уровне

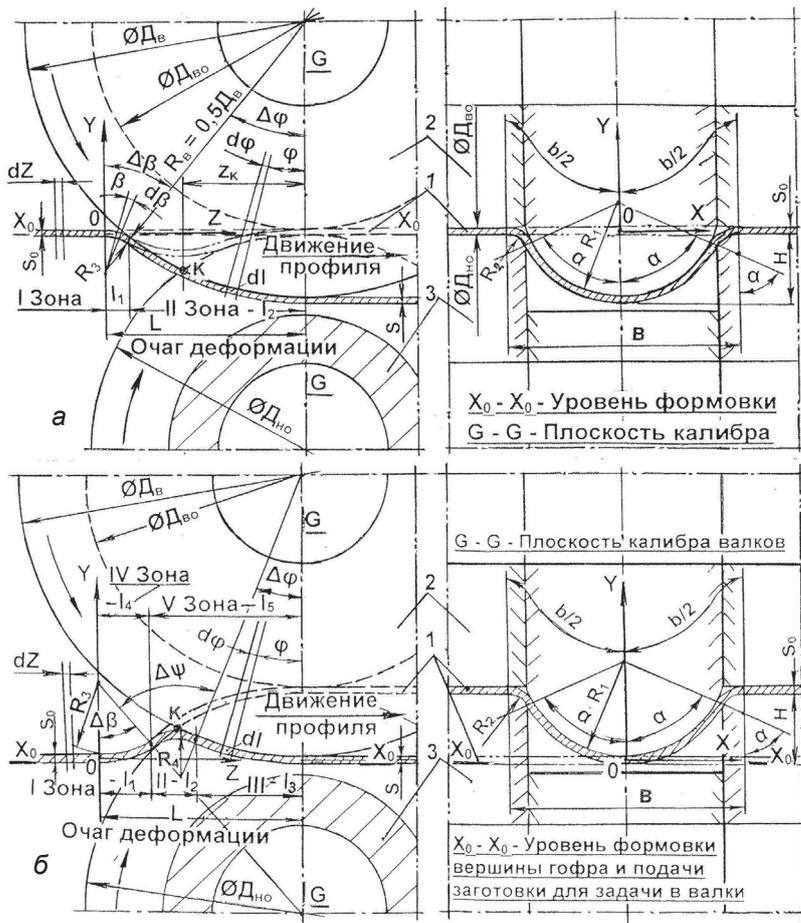
точке перегиба функции кривизны ( $1/\rho_{Bz}$  в конце I зоны, этот элемент, после выпрямления, меняет знак кривизны на противоположный и во II зоне ( $I_2$ ) изгибается по радиусу ( $R_B = 0,5D_B$ ) окружности охватываемого формирующего тороидального дискового элемента верхнего вала выпуклостью в сторону вершины гофра – вниз [ $(1/\rho_{Bz}) > 0$ ]. В дальнейшем за осевой плоскостью валков упомянутый элемент заготовки продольно выпрямляется [ $(1/\rho_{Bz}) = 0$ ] и перемещается в заготовке параллельно горизонтальной плоскости уровня подачи заготовки  $X_0-X_0$ . При этом на срединной поверхности длина  $dz$  этого элемента в процессе перемещения вдоль очага деформации продольно изменяется ( $dl \neq dz$ ). В конце очага деформации длина  $dl$  приближается к длине элементов у основания гофра на уровне  $X_0-X_0$ .

Другой характерный элемент желобчатого гофра ( $dx, S_0, dz$ ), соответствующий месту его сопряжения со смежными участками, при его перемещении в полосу вдоль очага деформации монотонно поперечно искривляется одновременно с поперечным растяжением ( $dl_x \geq dx$ ) и утонением металла ( $S < S_0$ ). Длина  $dz$  этого элемента в ряде случаев, преимущественно при формообразовании гофров с применением поперечной вытяжки заготовки, существенно уменьшается, что вызывает укорочение (сжатие) прилегающих к гофрам плоских участков и образование на них волнистости. Рассматриваемый элемент заготовки, первоначально имеющий плоскую форму (нулевую кривизну), в конце и после очага деформации поперечно изогнут на планируемую кривизну, которая определяется в основном раз-

мерами тороидальных участков нижнего охватывающего вала на участке сопряжения основания гофра радиусом  $R_2$  со смежными участками профиля.

Важно отметить, что при поштучном профилировании первоначально задаваемая в валки заготовка на горизонтальных уровнях  $X_0-X_0$ , соответствующих уровню формовки основания гофра (рис. 4, а) или его вершины (рис. 4, б), дополнительно перед валками продольно искривляется для прохождения между упомянутыми уровнями в калибр валков (через точку К). Такое искривление заготовки создаёт препятствие её прохождению через валки и вызывает дополнительное неравномерное по ширине продольное изменение длины формируемой заготовки, вызывающее упомянутую волнистость её плоских участков. Для устранения этого недостатка и предлагается способ изготовления листовых гофрированных профилей, в том числе профилей высокой жёсткости, с формовкой гофров за счёт местной вытяжки, по которому предусматривается предварительная разрезка

длины формируемой заготовки, вызывающее упомянутую волнистость её плоских участков. Для устранения этого недостатка и предлагается способ изготовления листовых гофрированных профилей, в том числе профилей высокой жёсткости, с формовкой гофров за счёт местной вытяжки, по которому предусматривается предварительная разрезка



**Рис. 4.** Схема очага деформации при формообразовании на листовой заготовке 1 поштучным способом в валках 2 и 3 желобчатого гофра: при задаче заготовки в валки на уровне формовки основания гофра (а); при задаче заготовки в валки на уровне формовки вершины гофра (б)



**Рис. 5.** Схема очага деформации при формообразовании на листовой заготовке 1 в валках 2 и 3 желобчатого гофра с рекомендуемым уровнем задачи заготовки в валки, проходящим через точку К

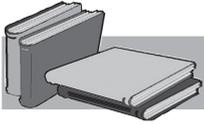
листовой рулонной заготовки на заданные длины, а затем поштучное последовательное многоступенчатое формообразование из неё профиля по технологическим переходам в сопряжённых по калибру горизонтальных формующих валках рабочих клетей стана путём профилирования с горизонтальным уровнем формовки профиля, с расположением калибров валков со стороны верхних формующих валков над упомянутым уровнем формовки с горизонтальной задачей заготовки в формующие валки клетей стана. При этом по меньшей мере в первом технологическом переходе, выполняемом обычно в первой формующей клетке стана, горизонтальный уровень задачи заготовки в валки  $X_0-X_0$  смещён с горизонтального уровня формовки в сторону верхнего формующего валка на новый горизонтальный уровень, содержащий точку К, соответствующий уровню начала одновременного контакта обеих поверхностных сторон исходной заготовки с обоими формующими валками в клетке, на одинаковом расстоянии  $Z_k$  от осевой плоскости G-G упомянутых сопряжённых по калибру формующих валков (рис. 5). Следует отметить, что гофры могут выполняться как вершиной вверх, так и вниз, а формообразование профиля производят одновременно со смещением участков заготовки в обе противоположные стороны от нового горизонтального уровня задачи заготовки в направлении осей вращения обоих сопряжённых по калибру формующих валков.

Результаты выполненных исследований являются основой для определения параметров напряжённо-деформированного состояния металла заготовки при формообразовании, в том числе тонкостенных листовых гофрированных профилей, позволяющих с учётом требуемых и фактических пластических свойств металла подбирать материал профиля и технологическую схему его формообразования, определять форму и

размеры гофра, в том числе предельно допустимую глубину и ширину его развёртки, оптимальные радиусы кривизны и утонение изогнутых участков, создавать необходимый запас пластичности, назначать режим деформирования, энергосиловые, скоростные и другие технологические параметры профилирования, предупреждать ухудшение качества профилей, в том числе образование волнистости на плоских участках, примыкающих к гофрам, разрабатывать оборудование, инструмент и технологическую оснастку.

## Выводы

На основе результатов глубокого анализа процесса формообразования широкого сортамента гнутых профилей показано, что в первых технологических переходах при подгибке боковых стенок и полок корытных профилей, формообразовании швеллеров, уголков и труб, выполнении гофров на листовой заготовке эффективно применяют двухвалковые клетки. Однако в ряде случаев неодновременная встреча листовой заготовки с обоими формующими валками и возникающие препятствия движению заготовки на уровне формовки при образовании участка плавного перехода и наполнении его металлом приводят к её пробуксовке и торможению в профилегибочном стане и волнистости плоских участков профиля. Предложено устранять эти недостатки смещением уровня подачи заготовки до уровня, при котором заготовка будет взаимодействовать одновременно с обоими охватывающим и охватываемым валками. Показаны возможности улучшения условий формообразования профилей с улучшением технологических параметров профилирования и качества продукции.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Тришевский И. С. Теоретические основы процесса профилирования / И. С. Тришевский, М. Е. Докторов // М.: Металлургия, 1980. – 288 с.
2. Производство и применение гнутых профилей проката. Справочник / И. С. Тришевский, Г. В. Донец, В. И. Мирошниченко, М. Е. Докторов и др. // М.: Металлургия, 1975. – 536 с.
3. Тришевский И. С. Холодногнутые гофрированные профили проката / И. С. Тришевский, В. В. Клепанда, Я. В. Хижняков. – К.: Техніка, 1973. – 272 с.
4. Калибровка валков для производства гнутых профилей проката / И. С. Тришевский, В. И. Мирошниченко, В. П. Стукалов, Э. С. Дахновский и др. – К.: Там же. – 1980. – 168 с.
5. Докторов М. Е. Формообразование и способы улучшения качества гнутых профилей проката // LAP LAMBERT Academic Publishing. Saarbrücken, Deutschland / М. Е. Докторов, Н. Докторова // Германия, 2014. – 131 с.
6. Росляков В. Ф. Разработка нового сортамента и технологии производства облегченных настилов для строительства / В. Ф. Росляков, В. М. Скульский, В. А. Кулик // Производство гнутых профилей проката. Отрасл. сб. научн. тр. – Харьков: УкрНИИМет, 1986. – С. 76-85.
7. Roll forming handbook / Edited by George T. Halmos. – Boca Ration, London, New York: Taylor & Francis Group, 2006. – 573 с.
8. Тришевский И. С. Особенности скоростного режима при профилировании профилей. Сб. «Высокоэкономичные гнутые профили проката» / И. С. Тришевский, М. Е. Докторов, Р. П. Раздольский. – М.: Металлургия, 1965. – 240 с.
9. Элементы теории профилирования / И. С. Тришевский, Ю. Н. Алексеев, М. Е. Докторов и др. – Харьков: УкрНИИМет, 1970. – 103 с.
10. Докторов М. Е. Особенности формообразования ребер жёсткости при изготовлении гнутых профилей проката / М. Е. Докторов // Металл и литьё Украины. – 2008. – № 3-4. – С. 63-69.
11. Влияние уровня задачи заготовки в валки на величину продольной деформации и энергосиловые параметры формовки профилей высокой жесткости / О. И. Тришевский, Ю. А. Плеснецов, А. Г. Крюк и др. // Производство гнутых профилей проката. Отрасл. сб. научн. тр. – Харьков: УкрНИИМет, 1986. – С. 44-52.
12. www.doktorovrollform.com

### Анотація

Докторов М. Ю., Докторова Н. М., Докторов С. Ю.

До питання визначення рівня подачі заготовки у валки при профілюванні

Неодночасна зустріч листової заготовки з формуючими валками, переважно при виготовленні листових гофрованих профілів, в ряді випадків призводить до її пробуксовки і гальмування руху в профілезгинальному стані і хвилястості плоских ділянок профілю. Запропоновано усувати цей недолік зміщенням рівня завдання заготовки до рівня, при якому заготовка буде одночасно взаємодіяти з охоплюваним і охоплюючим валками. Показано можливість поліпшення умов формоутворення профілів та підвищення рівня їх якості.

### Ключові слова

гнутий профіль прокату, заготовка, валки, профілювання, рівень завдання заготовки у валки, калібр валків, одночасність зустрічі з валками, якість профілю, хвилястість плоских ділянок

### Summary

Doktorov M., Doktorova N., Doktorov S.

On the question of determining the level of workpiece in rolls during profiling

Non-simultaneous slab meeting with the forming rolls, mainly in the manufacture of corrugated sheet metal profiles in some cases leads to its inhibition of slippage and movement in the roll forming mill and flat areas of waviness profile. It is proposed to eliminate this disadvantage level offset problem pre form to a level at which the workpiece will interact simultaneously with the male and female rolls. The possibilities of improving the conditions of formation of profiles and improving their quality are shown.

### Keywords

bent profile steel, blank, rolls, profiling, level of blank delivery in the rolls, caliber of the rolls, the simultaneous of the meeting with the rolls, profile quality, undulation of flat areas

Поступила 02.10.2015