

Described problems of building an integrated computer network for remote monitoring of parameters of technological processes of casting production with the use of SCADA-systems and wireless local area networks, the approaches proposed networking of monitoring data collection and transmission, processing, visualization.

Поступила 16.11.09.

УДК 621.771: 621.74.04

М. Е. Докторов

## Улучшение качества гнутых профилей проката

Определено, что основными причинами продольного изгиба, разноположности винтообразного скручивания и других дефектов гнутых профилей являются одновременная встреча с валками контактируемых участков заготовки и начало их подгибки. Для устранения этих недостатков, в том числе применительно к сложному поштучному процессу профилирования несимметричных профилей и с гофрами на стенках, предложены конструкции валков, в рабочих ручьях которых выполнены дополнительные конусные элементы.

**Ключевые слова:** гнутый профиль проката, заготовка, профилирование, валки, калибр, ручей, конусный элемент валка, качество, дефекты, винтообразное скручивание, центрирование, одновременность формообразования

При изготовлении гнутых профилей в валках на многоклетевых станах, в большей степени при поштучном процессе, наблюдается поперечное смещение формуемой заготовки в валках с оси профилирования, винтообразное кручение, продольный изгиб, забоины, переформовка и нестабильность основных размеров профиля по длине. Это обуславливается, главным образом, неодновременностью начала контакта заготовки с валками, неуравновешенностью прикладываемых для подгибки периферийных и формообразуемых на центральном участке элементов профиля сил и ненадежной фиксации движущейся заготовки от поперечного смещения в рабочем ручье валка. Технологические приемы и способы формовки, в которых уравнивают изгибающие моменты, создаваемые для подгибки периферийных участков, и применяют цилиндрические направляющие бурты для закрытия рабочих ручьев по ширине, как правило, лишь частично обеспечивают положительные результаты при непрерывном профилировании из рулонной заготовки. При поштучном процессе, который в начале и конце формовки каждой заготовки протекает неустойчиво, их применение не обеспечивает требуемого качества и устранения названных дефектов. Наблюдается также поперечное смещение профилей в 4-валковых калибрах и направляющих вертикальных роликах [1].

Установлено, что возможность поперечного смещения формуемой заготовки при ее задаче в валки обусловлена удалением кромок подгибаемых полок

от направляющих торцевых плоскостей цилиндрических буртов и зазором  $\delta$  между ними в плоскости калибра. В соответствии со схемой (рис. 1, а) расстояние от осевой плоскости валков (плоскости калибра) до точки А (встречи кромки заготовки с конусной рабочей поверхностью охватывающего валка) рассчитывается по формуле

$$z = \{(0,5D_{кр})^2 - [0,5D_{он} + b \sin \alpha_{c(n-1)}]^2\}^{1/2}, \quad (1)$$

где  $D_{кр}$  – диаметр окружности большего основания конусного участка валка, содержащей точку А встречи с кромкой полки профиля;  $D_{он}$  – основной диаметр валка;  $b = b_n + R_n \operatorname{tg} 0,5\alpha_{c(n-1)}$  – ширина полки;  $b_n$  – ширина прямолинейного участка полки;  $R_n$  – наружный радиус кривизны места изгиба;  $\alpha_{c(n-1)}$  – суммарный угол подгибки полки в предшествующем  $(n-1)$  переходе.

В свою очередь, из очевидных геометрических соотношений

$$D_{кр} = D_{он} + 2b \cos \alpha_{c(n-1)} \operatorname{tg} \alpha_{cn}; \quad h_{(n-1)} = b \sin \alpha_{c(n-1)}. \quad (2)$$

Здесь  $\alpha_{cn} = \alpha_{c(n-1)} + \Delta\alpha_n$  – суммарный угол подгибки в калибре  $n$ -го рассматриваемого перехода;  $\Delta\alpha_n$  – угол подгибки за проход;  $h_{(n-1)}$  – высота профиля после предшествующего перехода.

После внесения (2) в (1), учета, что  $b \cos \alpha_{c(n-1)} = b \sin \alpha_{c(n-1)} / \operatorname{tg} \alpha_{c(n-1)} = h_{(n-1)} / \operatorname{tg} \alpha_{c(n-1)}$ , и несложных преобразований получим

$$z = \{D_{он} + h_{(n-1)} [(\operatorname{tg} \alpha_{cn} / \operatorname{tg} \alpha_{c(n-1)}) + 1]\} \times \\ \times h_{(n-1)} [(\operatorname{tg} \alpha_{cn} / \operatorname{tg} \alpha_{c(n-1)}) - 1]^{1/2}. \quad (3)$$

Из (1) и (3) видно, что с увеличением ширины под-

гибаемого элемента (полки) профиля, угла подгибки и основного диаметра охватывающего (нижнего) валка расстояние  $z$  возрастает.

Расчеты, выполненные применительно к стану (2-8) × (100-600) ( $D_{\text{он}} = 280$  мм), показали, что для профилей с шириной полки  $b > 20$  мм и углом  $\Delta\alpha_n$  от 5 до 20° расстояние  $z$  возрастает практически пропорционально увеличению  $b$ . Номограммы (рис. 1, б), построенные по зависимости (3), позволяя определять и учитывать расстояние  $z$  при разработке технологических приемов и способов формовки, направленных на устранение поперечного смещения, винтообразного скручивания и продольного искривления профилей.

Горизонтальная составляющая поперечного перемещения  $\delta$  кромки определяется разностью проекций кромки полки в калибре на ось вращения валка до и после подгибки, то есть

$$\delta = b_n (\cos \alpha_{c(n-1)} - \cos \alpha_{cn}) + R_{n(n-1)} \times (1 + \cos \alpha_{c(n-1)}) \operatorname{tg} 0,5\alpha_{c(n-1)} - R_{n,n} \times (1 + \cos \alpha_{cn}) \operatorname{tg} 0,5\alpha_{cn} \approx b (\cos \alpha_{c(n-1)} - \cos \alpha_{cn}). \quad (4)$$

На основании результатов расчета по зависимости (4) построена номограмма для определения величины поперечного перемещения  $\delta$  кромки (рис. 1, в).

Интересно отметить, что при изготовлении симметричных равнополочных профилей, когда практически обеспечивается одновременное симметричное касание обеих полок профиля конусных участков рабочего ручья охватывающего валка, становится возможным одновременное начало их подгибки. С целью предупреждения поперечного смещения профиля в калибре, в рабочем ручье валка выполняются дополнительные переходные конусные участки шириной  $\delta$ , примыкающие к соответствующим рабочим конусным участкам для подгибки полок (рис. 1, з, д) [1, 2]. При этом ширина дополнительного переходного конусного участка определяется по зависимости (4), а больший диаметр  $D$  для схемы з – из неравенства

$$[(D - d) / 2 \delta] > \operatorname{tg} \alpha_{cn}, \quad (5)$$

где  $D$  и  $d$  – больший и меньший диаметры соответствующих оснований дополнительного конусного участка в рабочем ручье валка.

Тогда для формообразования равнополочного швеллера в промежуточной клетке стана (схема з) охватывающий валок 1, сопряженный с охватываемым валком 2 по калибру 3, содержит цилиндрический 4 и конусные 5 и 6 дисковые элементы. Калибр по ширине ограничен цилиндрическими буртами 7. Ширина рабочего ручья валка  $B_{(n-1)}$  и калибрующего участка  $B_n$  определяются шириной профиля соответственно в предшествующем ( $n - 1$ ) и рассматриваемом  $n$ -м переходах. Верхний валок 2 содержит формирующие дисковые элементы 8, обеспечивающие совместно с элементами 4-6 валка 1 захват заготовки 9, ее перемещение и формоизменение в профиль. С целью устранения поперечного смещения профиля в калибре каждый участок в рабочем ручье для подгибки полки профиля выполнен из двух сопряжен-

ных между собой усеченных конусов с различными углами наклона образующих поверхностей. Конус 5 со стороны центрального участка рабочего ручья выполнен с углом наклона образующей, равным планируемому углу подгибки полки  $\alpha_{cn}$ , а дополнительный конус 6 со стороны цилиндрического бурта 7 – с углом наклона образующей  $\beta$ , большим этого угла. При этом диаметр  $D$  большего основания периферийного усеченного конуса 6 определяется из условия одновременного касания обеих кромок движущегося в стане профиля 9 охватывающего валка в точках К на определенном расстоянии  $Z$  от осевой плоскости валков. Геометрические параметры калибра и местоположение точек встречи профиля с валками определяются размерами профиля, режимом подгибки заготовки в предшествующем и рассматриваемом переходах.

Надо отметить, что в момент входа в валки заготовка касается кромками охватывающего валка и фиксируется по ширине от сдвига торцевыми плоскостями цилиндрических буртов 7 в точках К, лежащих на окружностях большего основания дополнительных конусов 6. В плоскости калибра кромки полок профиля дополнительно фиксируются от поперечного смещения в точках \*К, лежащих на окружностях диаметра  $d$  меньшего основания упомянутых конусов 6. Таким образом, при профилировании заготовка центрируется и надежно фиксируется в валках от поперечного смещения, по меньшей мере, в двух парах точек, размещенных в отстоящих на расстоянии  $Z$  двух параллельных плоскостях. Упомянутое расстояние  $Z$  и длина участка плавного перехода существенно зависят от величины диаметра  $d$  окружности меньшего основания дополнительного конуса, угла наклона  $\beta$  образующей его рабочей поверхности и ширины  $\delta$  переходного конусного участка и с их увеличением возрастают.

Для профилей со сравнительно большой высотой формовки  $h$  и глубиной рабочего ручья в охватываемом валке (рис. 1, д), с целью улучшения качества профилей и снижения металлоемкости валков, дополнительные конусные элементы могут быть выполнены с углом  $\beta$  наклона образующей поверхности, меньшим угла наклона образующей конуса в рабочем ручье  $\alpha_{cn}$  [3]. Из схемы видно, что на входе в валки обе полки профиля 9 (обозначения такие же, как и на схеме з) на расстоянии  $Z$  от плоскости калибра одновременно в точках К и М входят в контакт с дополнительными конусными элементами 6 валка 1. Конус 5 со стороны центрального участка рабочего ручья выполнен с углом наклона образующей поверхности, равным планируемому углу подгибки полки  $\alpha_{cn}$ , а дополнительный конус 6 со стороны цилиндрического бурта 7 – с углом наклона образующей  $\beta$ , меньшим этого угла. При этом диаметры  $D$  и  $d$  большего и меньшего оснований усеченных конусов 6 определяются из условий достаточной глубины рабочего ручья для центрирования профиля и одновременного касания кромок и поверхности обеих полок движущегося в стане профиля 9 в точках К и М валка на одинаковом расстоянии  $Z$  от плоскости калибра. Геометрические параметры калибра и по-

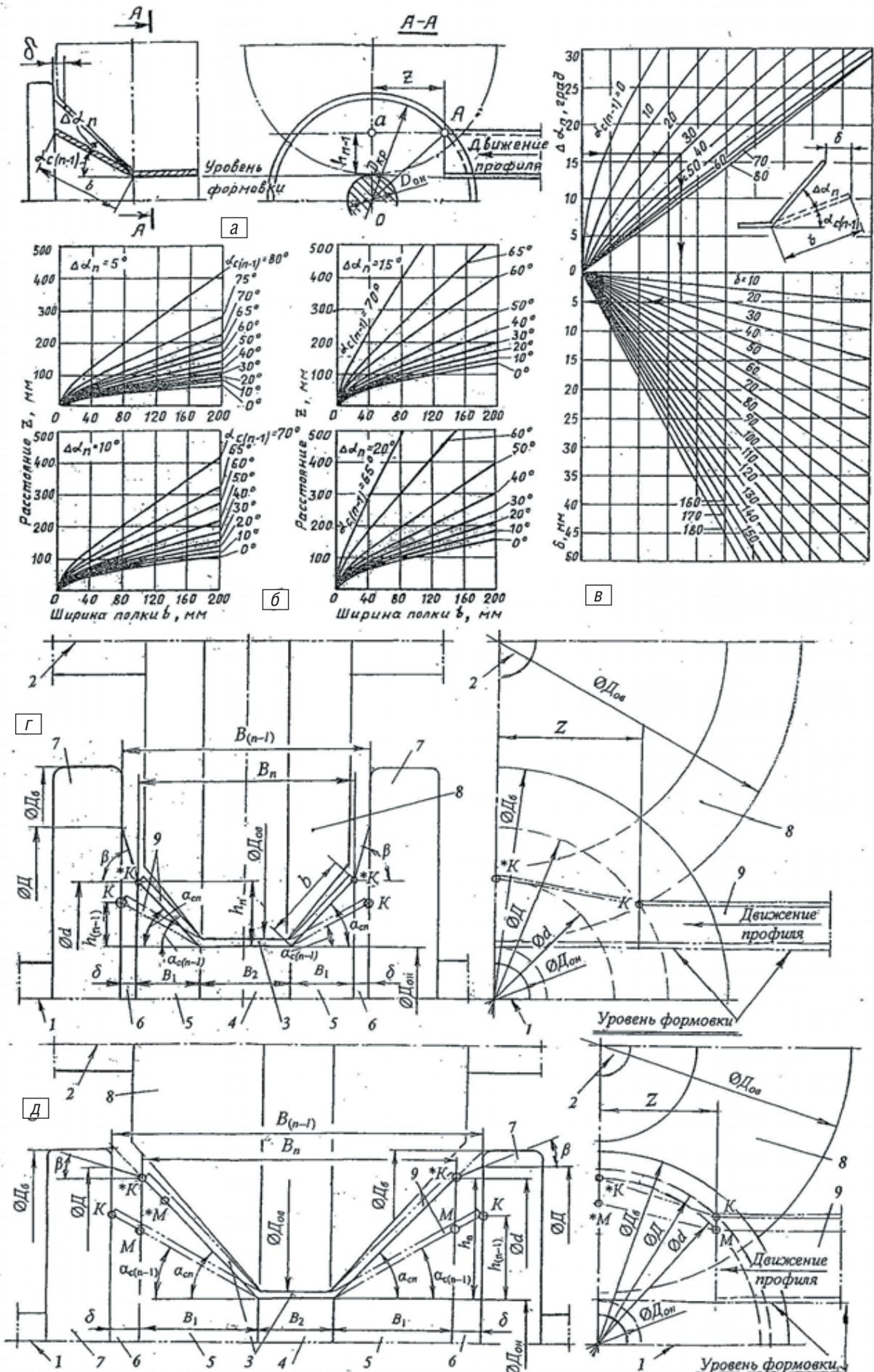


Рис. 1. Расчетная схема (а) и номограммы для определения расстояния  $z$  (б) и перемещения  $\delta$  кромки полки (в); примеры выполнения в охватывающем валке дополнительных конусных элементов с углом наклона образующей поверхности  $\beta > \alpha_{cn}$  (г) и  $\beta < \alpha_{cn}$  (д)

ложение точек встречи профиля с валками определяются на основании принятого режима формовки, размеров профиля и валков.

Калибр по ширине ограничен цилиндрическими буртами 7. Ширины ручья охватывающего валка  $B_{(n-1)}$  и калибрующего участка  $B_n$  определяются шириной профиля соответственно в предшествующем и рассматриваемом переходах. Ширины калибрующего участка  $B_n$  и конусных участков  $B_1$  и  $\delta$  могут быть скорректированы за счет соответствующего изменения ширины  $\delta$ ,  $B_n$  и  $B_1$ . Верхний охватываемый валок содержит формирующие дисковые элементы 8, обеспечивающие подгибку полок профиля 9. Кроме того, его тороидальные участки для отформовки мест изгиба центрируют и предупреждают поперечное смещение профиля в плоскости калибра валков. Применение в рабочих ручьях дополнительных направляющих конусов с углом  $\beta < \alpha_{сн}$  уменьшает расстояние  $Z$  и длину участка плавного перехода, а конусов с углом  $\beta > \alpha_{сн}$  – увеличивает.

Обычно, при изготовлении неравнополочного профиля, вследствие неодновременной встречи подгибаемых полок его переднего конца с валками и, соответственно, приложения формирующих усилий вначале к большей полке, а затем к меньшей, наблюдается поперечное смещение профиля в рабочих ручьях валков и его винтообразное скручивание. Устранение этого недостатка возможно за счет одновременного контакта с охватывающим валком, по крайней мере, двух участков профиля, размещенных по разные стороны от центра тяжести его поперечного сечения, преимущественно вблизи продольных кромок. Для этого рабочий ручей валка по ширине ограничивается цилиндрическими буртами, расстояние между внутренними торцевыми поверхностями которых принимается равным ширине  $B_{(n-1)}$  исходного профиля (рис. 2, а); в рабочем ручье выполняется дополнительный конусный участок, примыкающий к конусному участку для подгибки меньшей полки профиля [4], а ширина дополнительного участка  $\delta_{м2}$  и его больший диаметр  $D_{2м}$  определяются соответственно по следующим зависимостям:

$$\delta_{м2} = h_{(n-1)м} / \operatorname{tg} \alpha_{с(n-1)м} - h_{нм} / \operatorname{tg} \alpha_{снм} + R_{н(n-1)м} \operatorname{tg} 0,5\alpha_{с(n-1)м} - R_{н.нм} \operatorname{tg} 0,5\alpha_{снм}; \quad (6)$$

$$D_{2м} = 2\{h_{(n-1)б} (\operatorname{tg} \alpha_{снб} - \operatorname{tg} \alpha_{с(n-1)б}) \times [\Delta_{он} + h_{(n-1)б} (\operatorname{tg} \alpha_{снб} + \operatorname{tg} \alpha_{с(n-1)б}) / \operatorname{tg} \alpha_{с(n-1)б}] / \operatorname{tg} \alpha_{с(n-1)б} + (0,5\Delta_{он} + h_{(n-1)м})^2\}^{1/2}, \quad (7)$$

где  $\Delta_{он}$  – основной диаметр валка;  $h_{(n-1)б}$  и  $h_{(n-1)м}$  – высота исходного профиля соответственно со стороны большей и меньшей полок профиля;  $\alpha_{с(n-1)б}$ ,  $\alpha_{снб}$  и  $\alpha_{с(n-1)м}$ ,  $\alpha_{снм}$  – углы подгибки большей и меньшей полок профиля соответственно до и после подгибки;  $R_{н(n-1)м}$  и  $R_{н.нм}$  – наружный радиус кривизны места изгиба у меньшей полки соответственно до и после подгибки.

При подгибке краевых участков плоской заготовки на одинаковые углы  $\Delta\alpha_б = \Delta\alpha_м$  (рис. 2, б) одновременное начало подгибки полок шириной  $b_б$  и  $b_м$ , а также предупреждение поперечного смещения профиля

могут обеспечиваться дополнительными конусами шириной  $\delta_б$  и  $\delta_м$  по обе стороны от калибрующего участка рабочего ручья охватывающего валка. Соотношения между диаметрами оснований упомянутых конусов  $D_б$ ,  $d_б$  и  $D_м$ ,  $d_м$  со стороны большей и меньшей полок профиля должны удовлетворять условие (5). Дополнительные конусы позволяют создавать условия для центрирования профиля в калибре, одновременной для встречи точек К и М кромок переднего торца заготовки с валком на расстоянии  $z_б = z_м$  от осевой плоскости клетки и их перемещения в соответствующие точки \*К и \*М рабочего калибра валков без поперечного смещения за пределы калибра и продольного винтообразного скручивания формируемой заготовки. При этом точки К и М перемещаются по поверхностям конусов с окружностей большего диаметра ( $D_б$  и  $D_м$ ) на окружности меньшего диаметра ( $d_б$  и  $d_м$ ).

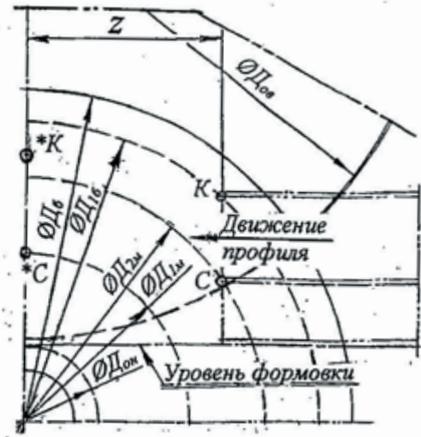
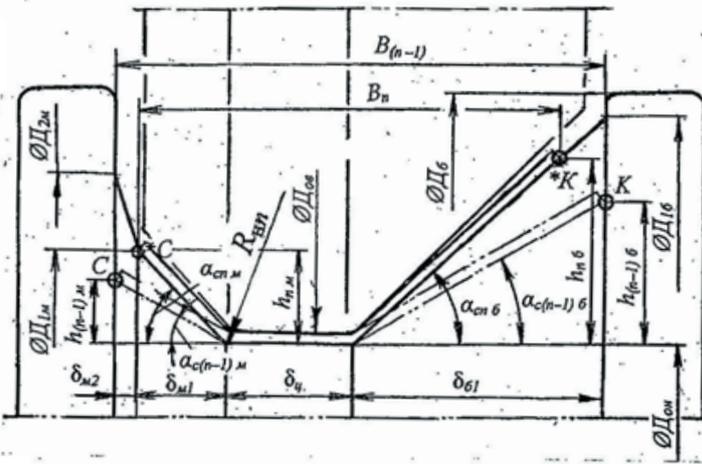
При изготовлении профилей со сравнительно небольшой высотой формовки распространение получил способ подгибки, по которому обе кромки профиля в ряде переходов поднимают в калибре валков на одну и ту же высоту (рис. 2, в). Тогда поперечное смещение и винтообразное скручивание профиля, особенно на входе в валки при поштучном профилировании, могут быть устранены с помощью выполненных в рабочем ручье охватывающего валка двух дополнительных конусных участков. Ширина  $\delta$  каждого из них принимается в соответствии с (4), а диаметр  $d$  меньшего основания – равным диаметру конусного формирующего элемента валка на уровне кромки полки в плоскости калибра.

Рабочий ручей охватывающего валка рекомендуется ограничивать по ширине цилиндрическими буртами, выдерживая расстояние между их торцами, равное ширине  $B_{(n-1)}$  профиля на входе в валки. Этим предупреждается поперечное смещение профиля в валках. Режим подгибки полок следует назначать из условия предотвращения скручивания профиля при стационарном профилировании.

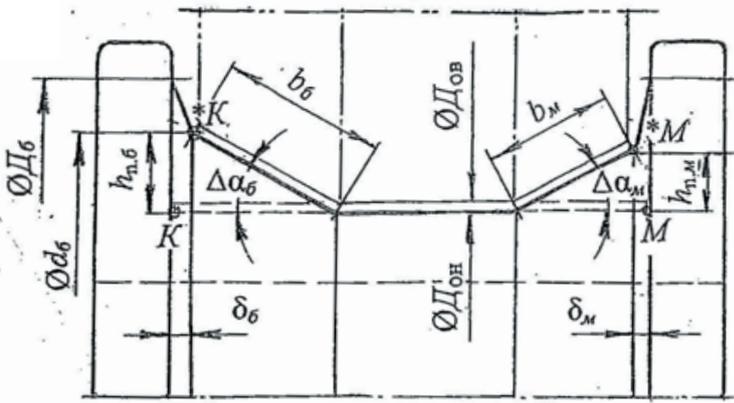
Рассмотренный принцип создания условий для одновременной встречи и контакта с валками, по меньшей мере, двух периферийных мест профиля на одинаковом расстоянии  $Z$  от плоскости калибра возможен и для других участков заготовки широкого сортамента профилей, в том числе открытых и коробчатых, как симметричных, так и несимметричных, с отбортовками на полках, гофрами на стенках и без них, формообразуемых в валках с различной конфигурацией ручьев. Возможно также создание одновременной встречи и контакта заготовки с двумя и более сопряженными по калибру формирующими валками.

С такой же целью улучшения качества профилей разработан охватывающий валок (рис. 2, г), в рабочем ручье которого выполнены рабочие конусные элементы, соответствующие параметрам профиля, и дополнительные конусные элементы: со стороны конуса для подгибки большей полки профиля с углом наклона образующей, меньшим угла  $\alpha_{снб}$ , и со стороны конуса для подгибки меньшей полки – большим угла  $\alpha_{снм}$ . Диаметры оснований дополнительных конусных элементов валка геометрически взаимосвя-

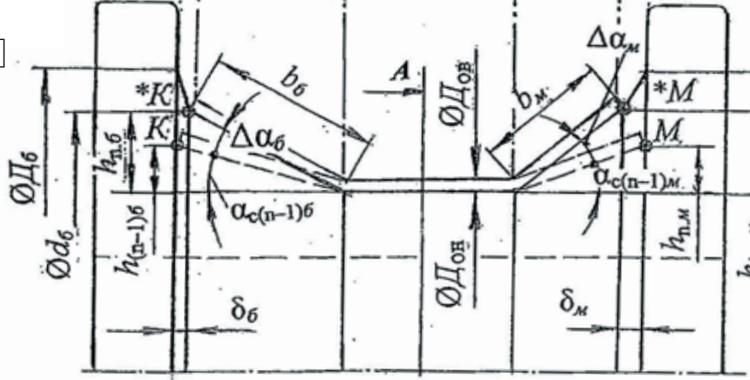
а



б



в



г

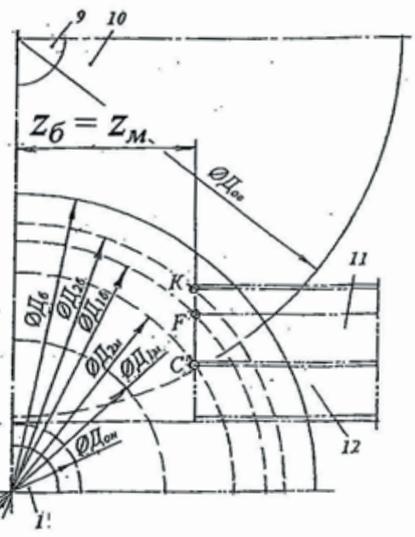
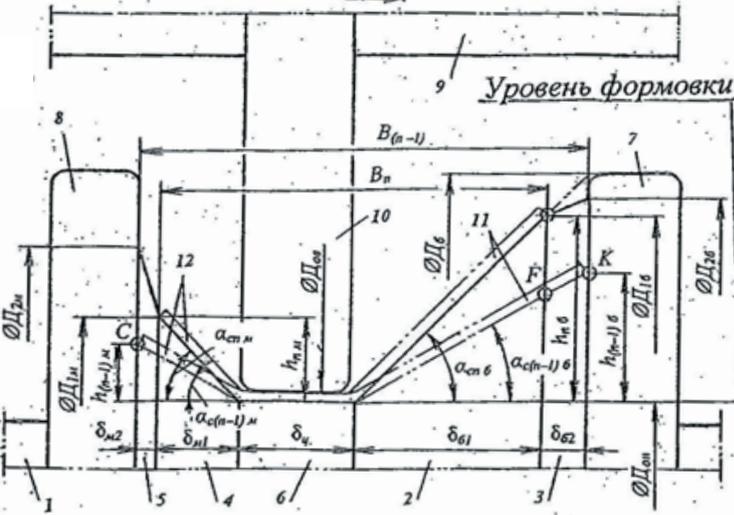


Рис. 2. Примеры выполнения охватывающего вала для неравнополочного швеллера: с одним дополнительным конусом в ручье (а); двумя – в первом (б) и промежуточном (в) переходах; для сравнительно большой высоты формовки (г)

заны с его основным диаметром и размерами профиля в предшествующем ( $n - 1$ ) и рассматриваемом  $n$  переходах.

В предложенной конструкции валка на валу 1 установлены формирующие элементы 2 и 4 для подгибки большей и меньшей полок профиля и примыкающие к ним дополнительные конусные элементы 3 и 5. Между конусными элементами 2 и 4 установлен цилиндрический элемент 6. Рабочий ручей валка ограничен по ширине направляющими цилиндрическими буртами 7 и 8. Сопряженный по калибру охватывающим валком, охватываемый содержит вал 9 и установленный на нем формирующий элемент 10. Большая 11 и меньшая 12 полки профиля в процессе профилирования одновременно вступают в контакт с конусными элементами охватывающего валка. Размеры конусов 2 и 4 определяются основным диаметром валка, геометрическими параметрами профиля и режимом формовки.

Расстояние от плоскости калибра до точки  $F$  встречи профиля с валком следующее:

$$Z(F) = \{(0,5 D_{1б})^2 - [0,5 D_{он} + h(F)]^2\}^{1/2}. \quad (8)$$

Здесь  $D_{1б} = D_{он} + 2h_{нб}$  – диаметр большего основания конусного элемента 2 охватывающего валка;  $h(F) = h_{(n-1)б} \bar{\delta}_{б1} / (\bar{\delta}_{б1} + \bar{\delta}_{б2})$  – высота профиля после предшествующего прохода на уровне точки  $F$ .

В соответствии с (8) и условием, что расстояние  $Z(K) = Z(C) = Z(F)$

$$D_{2б} = 2\{[0,5 D_{1б}]^2 - [0,5 D_{он} + h_{(n-1)б} \bar{\delta}_{б1} / (\bar{\delta}_{б1} + \bar{\delta}_{б2})]^2\}^{1/2}; \quad (9)$$

$$D_{2м} = 2\{[0,5 D_{1б}]^2 - [0,5 D_{он} + h_{(n-1)б} \bar{\delta}_{б1} / (\bar{\delta}_{б1} + \bar{\delta}_{б2})]^2\}^{1/2}. \quad (10)$$

Здесь  $\bar{\delta}_{б1}$ ,  $\alpha_{снб}$  и  $\bar{\delta}_{м1}$ ,  $\alpha_{снм}$  – ширина и угол наклона образующей поверхности рабочих конусных элементов соответственно для подгибки большей и меньшей полок профиля.

Ширина дополнительных конусных элементов 3 и 5 соответственно для подгибки большей и меньшей полок профиля определяются уравнениями

$$\bar{\delta}_{б2} = h_{(n-1)б} / \operatorname{tg} \alpha_{с(n-1)б} - h_{нб} / \operatorname{tg} \alpha_{снб};$$

$$\bar{\delta}_{м2} = h_{(n-1)м} / \operatorname{tg} \alpha_{с(n-1)м} - h_{нм} / \operatorname{tg} \alpha_{снм}, \quad (11)$$

где  $h_{(n-1)б}$ ,  $h_{(n-1)м}$  и  $h_{нб}$ ,  $h_{нм}$  – высоты профиля в предшествующем ( $n - 1$ ) и рассматриваемом  $n$  переходах соответственно на уровнях кромок большей и меньшей полок;  $\alpha_{с(n-1)б}$ ,  $\alpha_{с(n-1)м}$  и  $\alpha_{снб}$ ,  $\alpha_{снм}$  – суммарные углы подгибки большей и меньшей полок профиля соответственно до и после формовки. Ширина  $B_n$  в рассматриваемом переходе принимается меньше расстояния  $B_{(n-1)}$  между буртами 7 и 8 на суммарную величину ширин  $\bar{\delta}_{б2}$  и  $\bar{\delta}_{м2}$  дополнительных конусных элементов 3 и 5.

Для одновременной встречи обеих полок профиля в точках  $F$ ,  $K$  и  $C$  с рабочей поверхностью формирующего валка на одинаковом расстоянии от плоскости калибра размеры конусных элементов 3 и 5 должны быть геометрически связаны с размерами элемен-

тов 2 и 4, а также размерами профиля в предшествующем переходе. Тогда становится возможными одновременная встречно-направленная подгибка обеих полок, предупреждение поперечного смещения профиля, его продольного изгиба и скручивания, а также уменьшение диаметров  $D_{2б}$  и  $D_{1м}$  конусных элементов,  $D_б$  цилиндрических буртов и межосевого расстояния валков.

Для профилией со сравнительно большой разницей по ширине полок рекомендуется конструкция охватывающего валка (рис. 3, а), в рабочем ручье которого участок для подгибки большей полки выполнен из двух сопряженных между собой усеченных конусов. В таком валке на валу 1 установлены конусные дисковые элементы 2, 3 и 4 и цилиндрический элемент 5. Рабочий ручей по ширине ограничен буртами 6 и 7. Верхний охватываемый валок содержит вал 8 и установленные на нем формирующие дисковые элементы 9, обеспечивающие отформовку стенки 10 профиля и подгибку меньшей 11 и большей 12 полок. Конус 3 для подгибки большей полки выполнен адекватным конусу 2 для подгибки меньшей полки, а периферийный конус 4 выполнен с углом наклона образующей  $\beta$ , меньшим, чем угол  $\alpha_{снм}$  на смежном с ним конусе. При этом диаметр  $D_б$  основания периферийного конуса 4 определяется из условия одновременного касания обеих полок движущегося в стане профиля охватывающего (нижнего) валка.

Важно отметить, что в момент входа заготовки в валки большая полка касается охватывающего валка одновременно в двух местах: в точке  $a_б$  на кромке и точке  $a_ц$  на центральном участке, а меньшая – в точке  $a_м$  на кромке, в соответствии с условием, что расстояние  $z$  от точек  $a_б$ ,  $a_ц$  и  $a_м$  до плоскости калибра одинаково

$$z_б = [(0,5 D_{б})^2 - (0,5 D_{он} + h_{(n-1)б})^2]^{1/2};$$

$$z_м = [(0,5 D_{м})^2 - (0,5 D_{он} + h_{(n-1)м})^2]^{1/2}. \quad (12)$$

$$D_{м} = D_{он} + 2h_{(n-1)м} \operatorname{tg} \alpha_{снм} / \operatorname{tg} \alpha_{с(n-1)м} =$$

$$= D_{он} + 2b_м \cos \alpha_{с(n-1)м} \sin \alpha_{снм}. \quad (13)$$

Из решений уравнений (12) для  $z_б = z_м$

$$D_б = 2[(0,5 D_{он} + h_{(n-1)б})^2 + (0,5 D_{м})^2 -$$

$$- (0,5 D_{он} + h_{(n-1)м})^2]^{1/2}. \quad (14)$$

Диаметр  $d_б$  меньшего основания этого конуса определяется диаметром  $D_м$  основания конуса 2 для подгибки меньшей полки 11. При выполнении условий (12)-(14) обеспечивается одновременное касание обеих полок валка на одинаковом расстоянии  $z$  от плоскости калибра и одновременное начало их подгибки.

Применение такой конструкции позволяет уменьшить диаметры валков, их межосевое расстояние в рабочей клетке, а также межклетевое расстояние и габариты стана. В ряде случаев имеется возможность формовки профилей с большей шириной полок, применения более жестких режимов формовки, улучшения качества за счет дополнительного ограничения

поперечного смещения профиля в калибре валков с помощью направляющих буртов, которые выполнить в валках известной конструкции затруднительно.

Для качественной отформовки гофров за счет центрирования заготовки и предупреждения ее про-

дольного искривления и скручивания при профилировании, по меньшей мере, в рабочем ручье одного из спаренных по калибру валков применяют дополнительные конусные элементы с углом наклона образующей, определяемым из условия одновремен-

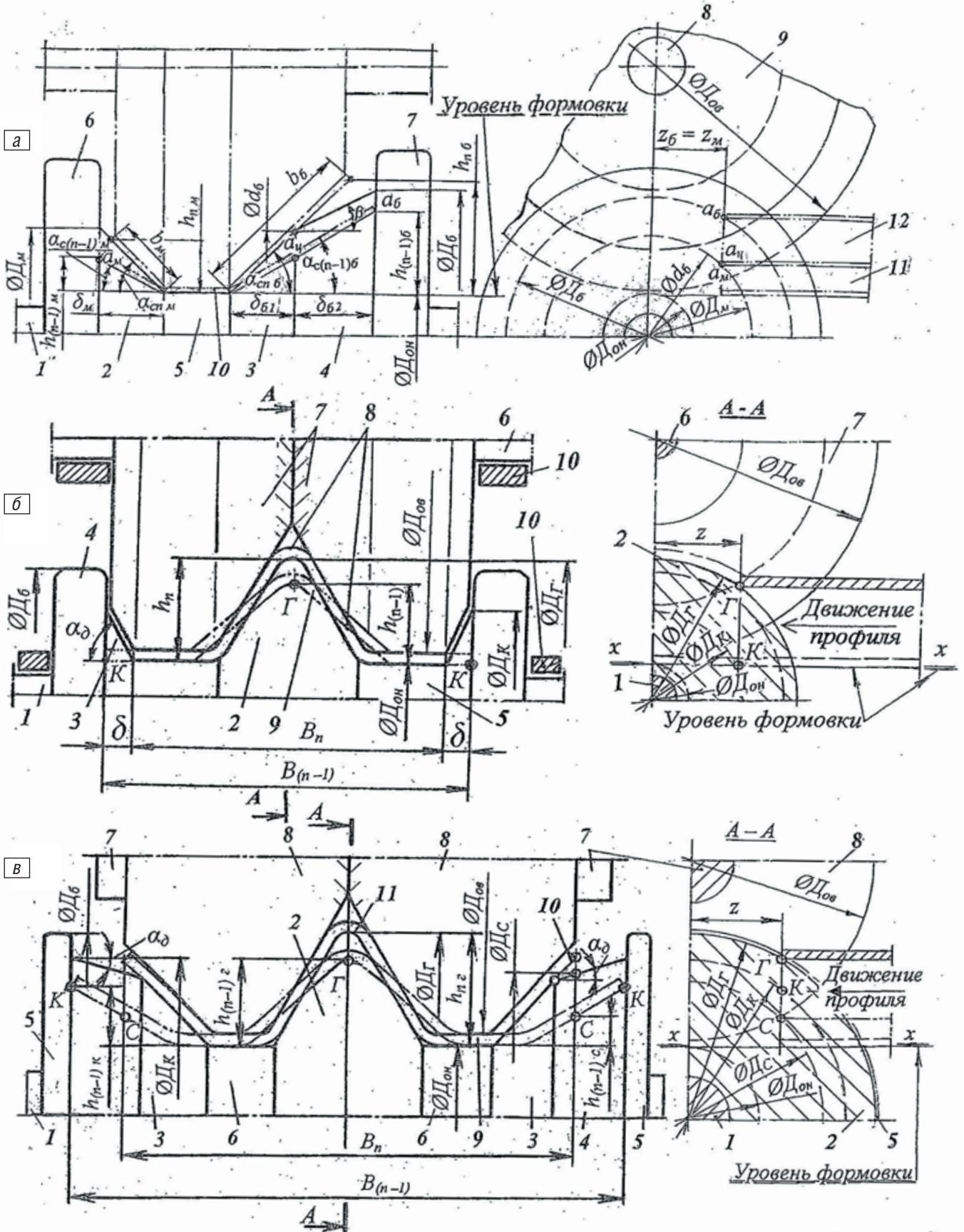


Рис. 3. Валки для формообразования неравнополочного швеллера (а), гофра на плоской заготовке (б) и гофра на стенке формируемого швеллера (в)

ного контакта с валками вершины гофра и кромок профиля. В соответствии с рис. 3, б охватывающий валок содержит вал 1, на котором закреплены дисковые элементы 2-5; сопряженный с ним охватываемый валок содержит вал 6, на котором установлены дисковые элементы 7. Ширина  $\delta$  дополнительного конусного элемента 3 в рабочем ручье охватывающего вала для симметричного профиля определяется полуразностью ширин профилей 8 и 9 в рассматриваемой и предшествующей клетях 10 стана

$$\delta = 0,5 | B_n - B_{(n-1)} |. \quad (15)$$

Рабочий ручей по ширине ограничен направляющими буртами, расстояние между которыми соответствует ширине  $B_{(n-1)}$  калибрующего участка рабочего ручья в предшествующей клетке.

На основании геометрических соотношений размеров валков и профиля установлено, что точки заготовки первоначального контакта с охватывающим валком расположены от осевой плоскости валков (клетки) на расстоянии

– для точки Г встречи вершины гофра с дисковым элементом 2 вала

$$Z_\Gamma = [(0,5D_\Gamma)^2 - (0,5D_{\text{он}} + h_{(n-1)\Gamma})^2]^{1/2}; \quad (16)$$

– для точек К встречи кромок профиля с конусными элементами 3

$$Z_K = [(0,5D_K)^2 - (0,5D_{\text{он}})^2]^{1/2}. \quad (17)$$

Из условия, что первоначальное касание профиля с валком происходит одновременно в трех точках на одинаковом расстоянии  $Z$  от осевой плоскости валков, имеем  $Z = Z_\Gamma = Z_K$ . Диаметр  $D_K$  вала в точках К начала контакта с кромками профиля и угол  $\alpha_d$  наклона образующей конусной поверхности элемента 3 на основе (15)-(17) определяются соответственно из выражений

$$D_K = 2[(0,5D_\Gamma)^2 - (0,5D_{\text{он}} + h_{(n-1)\Gamma})^2 + (0,5D_{\text{он}})^2]^{1/2}; \quad (18)$$

$$\alpha_d = \arctg [(D_K - D_{\text{он}}) / (B_{(n-1)} - B_n)]. \quad (19)$$

Установлено, что если диаметр  $D_K$  и угол  $\alpha_d$  будут выполнены большими, чем расчетные по (18) и (19), то возможны затруднения в формообразовании гофра из-за зажатия заготовки у кромок и повышенного утонения. Если же  $D_K$  и  $\alpha_d$  будут меньшими, то возможны поперечное смещение заготовки в калибре валков, продольный изгиб и скручивание профиля.

При изготовлении профилей, содержащих полки и стенку с гофром (выступом) в сторону кромок, для надежного центрирования заготовки в стане и предупреждения ее продольного искривления и скручивания, по меньшей мере, в рабочем ручье одного из спаренных по калибру валков промежуточной клетки, выполняют конусные элементы для подгибки полок и дополнительные конусные элементы для центрирования профиля. При этом угол наклона образующей рабочей поверхности дополнительных конусных элементов определяется из условия одновременного первоначального контакта с валком гофра и подгибаемых полок профиля. В соответствии с рис. 3, в охватывающий валок содержит

вал 1, на котором установлены дисковые элементы 2-6, а сопряженный с ним по калибру охватываемый – содержит вал 7, на котором установлены дисковые элементы 8. Формуемый на стенке 9 профиля в сторону кромок 10 гофр 11 размещается в центре калибра. Рабочий ручей ограничен направляющими буртами 5, расстояние между которыми соответствует ширине  $B_{(n-1)}$  профиля.

Из условия, что расстояние  $Z$  от осевой плоскости валков до точек Г, К, и С первоначального контакта заготовки с валком одинаково ( $Z = Z_\Gamma = Z_K = Z_C$ ), имеем

$$Z_\Gamma = [(0,5D_\Gamma)^2 - (0,5D_{\text{он}} + h_{(n-1)\Gamma})^2]^{1/2}; \quad (20)$$

$$Z_K = [(0,5D_K)^2 - (0,5D_{\text{он}} + h_{(n-1)K})^2]^{1/2}; \quad (21)$$

$$Z_C = [(0,5D_C)^2 - (0,5D_{\text{он}} + h_{(n-1)C})^2]^{1/2}; \quad (22)$$

$$D_K = 2[(0,5D_{\text{он}} + h_{(n-1)K})^2 + (0,5D_\Gamma)^2 - (0,5D_{\text{он}} + h_{(n-1)\Gamma})^2]^{1/2}; \quad (23)$$

$$D_C = 2[(0,5D_{\text{он}} + h_{(n-1)C})^2 + (0,5D_\Gamma)^2 - (0,5D_{\text{он}} + h_{(n-1)\Gamma})^2]^{1/2}. \quad (24)$$

Угол наклона образующей поверхности дополнительного конусного элемента

$$\alpha_d = \arctg [(D_K - D_C) / (B_{(n-1)} - B_n)]. \quad (25)$$

Следует отметить, что в момент задачи в валки профиль одновременно касается охватывающего вала, по меньшей мере, в пяти точках – двумя кромками, двумя плоскостями полок и вершиной гофра.

В универсальной 4-валковой рабочей клетке стана одновременная встреча кромок большей  $b_6$  и меньшей  $b_m$  полок профиля на одинаковом расстоянии от осевой плоскости валков ( $z_6 = z_m$ ) возможна за счет применения различных технических приемов, в том числе, выполнения валков с неравными основными (максимальными) диаметрами [1], а также выполнения вала для подгибки большей полки, состоящего из двух частей, одна из которых идентична конусной рабочей части для подгибки меньшей полки ( $\alpha_{\text{слб}} = \alpha_{\text{снм}}$ ), а вторая – с меньшим углом наклона образующей конуса ( $\alpha_{\text{допб}} < \alpha_{\text{слб}}$ ); выполнения валков для подгибки большей и меньшей полок профиля с различными углами наклона образующих их рабочей поверхности и других решений.

Например, из очевидных геометрических соотношений (рис. 4, а) диаметр вертикального вала в месте его встречи с кромкой  $D_{\text{кр}}^{(\text{верт})} = D^{(\text{верт})} - 2h_{(n-1)} / \text{tg } \alpha_{\text{сн}}$ ; расстояние от проекции точки начала контакта на осевую плоскость валков до оси вертикального вала  $c = 0,5D^{(\text{верт})} - h_{(n-1)} / \text{tg } \alpha_{\text{с}(n-1)}$ ; расстояние от точки начала контакта заготовки с валком до плоскости калибра  $z = [(0,5D_{\text{кр}}^{(\text{верт})})^2 - c^2]^{1/2}$ .

Основной диаметр  $D_6^{(\text{верт})}$  вала для подгибки большей полки принимается оптимальным с учетом требований к конструкции. Из условия одновременного соприкосновения кромок профиля с валками ( $z_6 = z_m$ ), основной диаметр вертикального вала для подгибки меньшей полки



$$D_M^{(верт)} = [D_6^{(верт)} - h_{(n-1)б} (1 / \operatorname{tg} \alpha_{c(n-1)б} + 1 / \operatorname{tg} \alpha_{cлб})] \times \\ \times (\operatorname{tg} \alpha_{c(n-1)м} \operatorname{tg} \alpha_{cлм} / \operatorname{tg} \alpha_{c(n-1)б} \operatorname{tg} \alpha_{cлб}) \times [( \operatorname{tg} \alpha_{cлб} - \\ - \operatorname{tg} \alpha_{c(n-1)б} ) / (\operatorname{tg} \alpha_{cлм} - \operatorname{tg} \alpha_{c(n-1)м})] \times (h_{(n-1)б} / h_{(n-1)м}) + \\ + h_{(n-1)м} [(1 / \operatorname{tg} \alpha_{c(n-1)м} + 1 / \operatorname{tg} \alpha_{cлм})]. \quad (26)$$

Для качественной отформовки мест изгиба профиля углы наклона образующей рабочей поверхности валков  $\alpha_{cлб}$  и  $\alpha_{cлм}$  для подгибки большей и меньшей полок рекомендуется выполнять одинаковыми.

Для устойчивого прохождения профиля через приводные вертикальные ролики и его направления в валки рабочей клетки необходимо обеспечивать одновременность начала контакта крайних участков его стенки с роликами.

В соответствии с рис. 4, б расстояния от точек начала контакта стенки профиля с роликами со стороны большей и меньшей полок до их осевой плоскости равны

$$z_б = [(0,5D_б)^2 - (0,5D_{кр} + a_б)^2]^{1/2}; \\ z_м = [(0,5D_м)^2 - (0,5D_{кр} + a_м)^2]^{1/2}. \quad (27)$$

При  $z_б = z_м$  максимальный диаметр ролика равен  $D = 2[(0,5D_{кр} + a)^2 + z^2]^{1/2}$ .

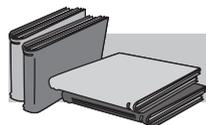
В качестве примера, применительно к стану (2-8) × (100-600) на основании расчета по установленным зависимостям построена номограмма (рис. 4, в) для определения расстояния  $z$  и максимальных диаметров вертикальных роликов в зависимости от ширины подгибаемых элементов профиля при минимальном диаметре  $D_{кр} = 170$  мм. Первоначально определяются размеры вертикального ролика со стороны большей полки, а за-

тем по номограмме – диаметр меньшего ролика.

Приведенные выше технические решения могут быть эффективно использованы при разработке и усовершенствовании технологии и калибровки валков, в том числе для производства несимметричных гнутых профилей проката.

### Выводы

Подтверждено, что одной из причин винтообразного скручивания профилей, продольного изгиба и других дефектов при профилировании является поперечное смещение заготовки в валках из-за неодновременного начала контакта с ними периферийных участков движущейся заготовки. Применительно к поштучному процессу изготовления профилей, в том числе несимметричных, предложены способы формовки и конструкции валков, в рабочих ручьях которых выполнены дополнительные конусные элементы, обеспечивающие центрирование профиля и одновременное начало встречно-направленной подгибки обеих полок, а в плоскости калибра – дополнительное центрирование профиля и догибку полок на заданный угол. Разработаны калибры для двух- и четырехвалковых клетей и вертикальных роликов, обеспечивающие надежное центрирование заготовки в рабочих ручьях и стане. Приведены схемы калибров для изготовления швеллеров, в том числе с гофром на стенке и несимметричных. Показано, что равенство расстояний от точек встречи участков заготовки с валками до плоскости калибра существенно улучшает условия формообразования профилей и их качество. Это достигается за счет подбора режима формовки, диаметральных размеров валков и угла наклона образующей поверхности дополнительных конусов в рабочих ручьях.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Докторов М. Е., Пшеничная Н. В. Оптимизация поштучного процесса производства несимметричных гнутых профилей / Производство гнутых профилей проката. – Харьков: УкрНИИМета, 1986. – С. 63-76.
2. А. с. 1072949 (СССР). Валок рабочей клетки профилегибочного стана / И. С. Тришевский, М. Е. Докторов, Н. В. Пшеничная и др. // Б. И. – 1984. – № 6.
3. А. с. 1303213 (СССР). Валок рабочей клетки профилегибочного стана / М. Е. Докторов // Там же. – 1987. – № 14.
4. А. с. 1077680 (СССР). Валок рабочей клетки профилегибочного стана / И. С. Тришевский, М. Е. Докторов, Н. В. Пшеничная и др. // Там же. – 1984. – № 9.

### Анотація

Докторов М. Ю.

### Покращення якості гнутих профілів прокату

Визначено, що однією з основних причин поздовжнього вигину, різної ширини полиць, гвинтоподібного скручування та інших дефектів гнутих профілів є ненадійне центрування заготовки у формувальних валках і направлених вертикальних роликах. Для усунення цього недоліку запропоновано валки, в робочих ривчакх яких виконано додаткові конусні елементи, що забезпечують одночасний початок зустрічно-спрямованого підгинання полиць профілю.

### Ключові слова

гнутий профіль прокату, заготовка, профілювання, валки, калібр, ривчак, конусний елемент валка, якість, дефект, гвинтоподібне скручування, центрування, одночасність формоутворення

## Summary

*Doktorov M.*

### The problem of improving the quality of rolled formed sections

*Determined, that one of the main reasons of the different width shelves of the profiles, longitudinal twist, corkscrew torsion and other defects is unreliable centering of the roll – formed sections in the forms of the rollers and the vertical guide rollers. With regard to the complex process of the individually fabrication profiles, including asymmetric and corrugated profiles, offered rollers with additional cone-shaped elements in worker passes. These elements allow to deform simultaneous all pieces of the blank in the beginning of the deformation.*

## Keywords

*roll-formed section, blank, method obtained the roll-formed sections, rollers, caliber, pass, cone-shaped element of the rollers, quality, defect, corkscrew torsion, centering, simultaneous deform*

Поступила 01.12.09

УДК 620.178.3:539.388.1:539.389.2

**Г. В. Цыбанев, А. И. Новиков**

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев

## Описание процессов усталостной деградации материалов по параметрам виртуального неупругого деформирования\*

*Описана модель предельного исчерпания пластичности для оценки многоциклового долговечности материалов в условиях блочного нагружения, а также при действии статической составляющей. В модели используются параметры локального неупругого деформирования для определения предельного состояния вследствие критической деградации материала в зоне локализации напряжений.*

**Ключевые слова:** модель, долговечность, деградация, исчерпание пластичности, неупругая деформация, блочное нагружение

### Введение

Существующие в настоящее время модели и методы прогнозирования усталостной долговечности элементов конструкций чаще всего требуют определения каких-либо специальных характеристик материала, которые претендуют на проведение специальных экспериментов, что не всегда доступно для расчетов и затрудняет использование созданных баз данных по усталости [1].

Учитывая сказанное, предлагается метод расчета усталостной долговечности материалов, основанный на модели предельного исчерпания пластичности в зонах локализации напряжений по параметрам виртуального неупругого деформирования, для которой исходными данными являются кривые усталости и характеристики механических свойств металлов.

В процессе многоциклового нагружения у большинства металлов и сплавов наблюдается изменение неупругой деформации [2]. При циклическом нагружении в мягком режиме может наблюдаться как уменьшение, так и увеличение петли гистерезиса с наработкой, что связано с эффектами упрочнения

или разупрочнения материала [2] и отражает усталостную деградацию материалов.

Ранее была рассмотрена модель поведения циклически упрочняющихся материалов [3], основанная на подходе Н. Н. Афанасьева. Эта модель рассматривается в настоящей работе для циклически разупрочняющихся материалов.

### Описание расчетной модели

Рассмотрим модель циклического деформирования некоторой локальной зоны, принадлежащей поверхностному слою. Для ее описания принимаем следующие гипотезы:

- процесс изменения локального циклического предела текучести материала и зарождения усталостной трещины происходит в некотором объеме поверхностного слоя;
- повторное неупругое деформирование приводит к упрочнению-разупрочнению материала в рассматриваемой зоне, выражающемся в изменении предела текучести с каждым полциклом нагружения;

\* По материалам научно-технической конференции «Перспективные материалы, покрытия и технологии. Предельные состояния элементов конструкций», опубликованным в журнале «Металл и литье Украины» № 11-12, 2009 г.