

**«Змінний перетин»**  
(шифр)

**«АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ВИРОБНИЦТВА ПРОФІЛІВ ЗМІННОГО  
ПЕРЕТИНУ ФОРМУВАННЯМ В ВАЛКАХ»**

**Галузь:**  
Обробка матеріалів у машинобудуванні

2017/2018

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ .....	3
1 КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФОРМОВКИ ПРОФИЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ .....	5
2 ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОДГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОФИЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ ФОРМОВКЕ СО СМЕЩЕНИЕМ ВАЛКОВ .....	12
3 ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ВАЛКОВОЙ ФОРМОВКИ ПРОФИЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ В ВИНТОВЫХ КАЛИБРАХ .....	18
ВЫВОДЫ .....	26
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	28

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Потребность автомобилестроения в гнутых профилях переменного сечения в настоящее время обеспечивается технологиями листовой штамповки, поскольку их отличительной особенностью является наличие участков, на которых кромки профиля не параллельны его продольной оси. Использование профилей переменного сечения позволяет получать конструкции требуемой равнопрочности применительно к конкретным условиям работы при наименьшей металлоёмкости.

В ряде отраслей экономики Украины (автомобилестроении, сельскохозяйственном машиностроении, строительстве и др.) в настоящее время широко применяются профили переменного сечения типа швеллеров, изготовленных листовой штамповкой. Так, например, большую часть потребности компании «АвтоКрАЗ» и предприятий, выпускающих автоприцепы, составляют профили типа швеллеров, в которых участки постоянной ширины с узкой и широкой стенкой соединены между собой участком с переменной шириной стенки по длине. Основным их преимуществом является возможность получения равнопрочных конструкций применительно к конкретным условиям работы при наименьшем расходе металла. Расширение области применения профилей переменного сечения сдерживается в основном из-за отсутствия эффективного и производительного способа их изготовления, который мог бы быть применен взамен используемых технологических процессов (штамповка или вырезка части стенки горячекатаного швеллера с последующей сваркой).

Наиболее перспективным способом получения профилей переменного сечения представляется профилирование в валках профилегибочного стана, так как этот процесс является наименее трудоемким и наиболее производительным из всех перечисленных.

Для удовлетворения существующей потребности в профилях переменного сечения выполнен анализ технологической возможности их производства формовкой в валках, что позволит существенно повысить

производительность производства и снизить затраты на технологический передел.

**Методика выполнения исследований.** Теоретический анализ выполнен с использованием уравнений течения вязких жидкостей механики сплошных сред [1-4] (получено поле скоростей перемещений металла в очаге деформации), а также зависимостей для расчета кулачковых механизмов [5].

**Цель и задачи работы.** Цель работы – анализ и обоснование возможности производства профилей переменного сечения формовкой в валках.

В соответствии с поставленной целью в работе поставлены и решены следующие задачи:

- получены теоретические зависимости, обеспечивающие расчет и проектирование технологического процесса производства гнутых профилей;
- получено поле скоростей перемещений, обеспечивающее определение напряженно-деформированного состояния металла и энергосиловых параметров процесса валковой формовки профилей переменного сечения в винтовых калибрах.

## 1 КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФОРМОВКИ ПРОФИЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для опробования возможности производства профилей переменного сечения формовкой в валках выбран профилегибочный стан 2-5x50-670, который был дооборудован специально сконструированными валками, элементы которых могут смещаться в осевом направлении при профилировании, а также механизмами их смещения [6-8]. Исследования, выполненные на заготовке толщиной 3 мм, показали принципиальную возможность промышленного производства таких профилей.

Вместе с тем, исследования позволили также выявить ряд особенностей процесса формообразования, которые могут затруднить промышленное освоение разработанной технологии:

- при толщине заготовки более 3 мм смещение формирующих элементов валков было затруднено, происходило несвоевременно, что вызвало переформовку профиля и в ряде случаев – заклинивание валков;

- по мере увеличения суммарного угла подгибки полок  $\alpha_c$  сопротивление смещению формирующих элементов резко возрастало, валки заклинило, и их смещение не происходило.

Указанные трудности можно объяснить тем, что по существующей технологии смещение верхнего и нижнего формирующих элементов начинается одновременно - в момент, когда граничное сечение I (рис. 1) между участком с узкой стенкой и участком со стенкой переменной по длине ширины переходит через осевую плоскость валков.

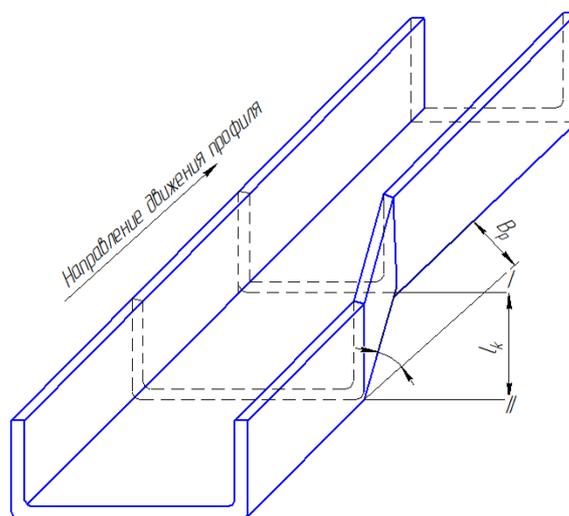


Рис. 1 - Общий вид профиля

Как видно из рис. 2, контакт верхнего вала с местом изгиба продолжается за осевой плоскостью валков на участке длиной:

$$x_1 = \sin \frac{\alpha_c}{2} \sqrt{(D_B - 2r \sin^2 \frac{\alpha_c}{2}) \cdot 2r}, \quad (1)$$

где  $D_B$  – катающий диаметр верхнего вала;

$r$  – внутренний радиус формовки в данном переходе;

$\alpha_c$  – суммарный угол подгибки в данном переходе.

На этом участке место изгиба узкой части профиля препятствует перемещению верхнего вала, что может привести к заклиниванию. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости одновременного смещения верхнего и нижнего формующих валков:

- смещение нижнего вала следует начинать в момент прохождения сечения I через осевую плоскость валков;

- смещение верхнего вала следует начинать в момент, когда внутренняя часть места изгиба профиля в сечении I прекращает контакт с верхним валком.

Тогда, с учетом (1) время смещения верхнего вала по отношению к нижнему можно определить по зависимости:

$$t_1 = \frac{\sin \frac{\alpha_c}{2} \sqrt{(D_B - 2r \sin^2 \frac{\alpha_c}{2}) \cdot 2r}}{V_{пр}}, \quad (2)$$

где  $V_{пр}$  – скорость профилирования.

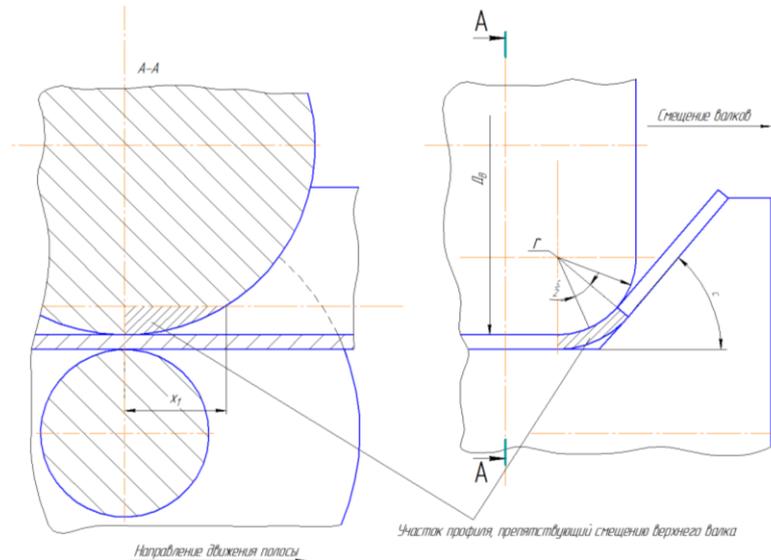


Рис. 2 - Схема для определения длины участка контакта верхнего вала с местом изгиба профиля за осевой плоскостью валков

Выражение (2) не учитывает момент начала контакта участка переменного сечения профиля с нижним валком и справедливо только для случаев, когда выполняется условие

$$\alpha_c < 90^\circ - \gamma$$

и контакт профиля с нижним валком не препятствует смещению верхнего ( $\gamma$  – угол конусности профиля, см. рис. 1).

Если

$$\alpha_c \geq 90^\circ - \gamma,$$

то профиль вступает в контакт с нижним валком своей наружной поверхностью в граничном сечении II между участком со стенкой переменной ширины и участком с широкой стенкой (рис. 1) в то время, когда сечение I ещё не достигло осевой плоскости валков (рис. 3) и размеры калибра соответствуют узкой части профиля. Такой контакт препятствует заходу профиля в калибр и тормозит его движение. В результате смещение валков, момент начала которого запрограммирован заранее из условия непрерывности процесса и не может быть перенесен при его торможении, в действительности начинается не после перехода сечения I через осевую плоскость валков, а ещё до его входа в калибр, что приводит к переформовке профиля, а в ряде случаев к заклиниванию валков.

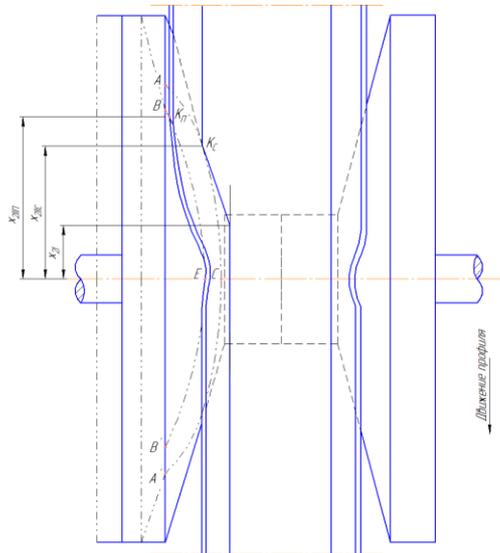


Рис. 3 - Схема для определения соприкосновения сечения II с конической поверхностью нижнего валка:  $D_H$  катающий диаметр нижнего валка;

$B_p$  - перепад ширины стенки

Во избежание указанных выше неблагоприятных факторов необходимо начинать смещение подвижного элемента нижнего валка в момент, когда профиль соприкоснется с ним своей наружной поверхностью в сечении II. Точки касания лежат на гиперболах, образованных (условно) при пересечении конической поверхности нижнего валка горизонтальными плоскостями. Наименее удалена от осевой плоскости валков точка касания  $K_c$  на гиперболе  $ACA'$  - на уровне стенки профиля; наиболее удалена точка  $K_{II}$  на гиперболе  $BEB'$  - на уровне кромки.

С учетом геометрии профиля и конического уравнения гиперболы

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2 - c^2} = 1, \quad (3)$$

где  $a$  - половина расстояния между вершинами;

$c$  - половина расстояния между фокусами гиперболы, положение сечения II по отношению к осевой плоскости валков в момент его соприкосновения на уровне стенки с подвижным элементом нижнего валка (в точке  $K_c$ ) определяется по формуле:

$$x_{2II} = tg\alpha_c \sqrt{B_p(B_p + D_H \cdot ctg\alpha_c)}, \quad (4)$$

где  $D_H$  - катающий диаметр нижнего валка;

$B_p$  – перепад ширины стенки.

При больших суммарных углах подгибки  $\alpha_c$  (более  $80^\circ$ ) расстояние между проекциями точек одного сечения, находящихся на кромке и в месте изгиба, весьма незначительно, поэтому расчёт по формуле (4) с достаточной степенью точности можно применять и для кромки.

Поскольку момент начала смещения подвижного элемента верхнего вала определяется в зависимости от положения сечения I, необходимо найти положение этого сечения в момент соприкосновения сечения II с подвижным элементом нижнего вала. Расстояние между сечениями I и II равно  $B_p \operatorname{ctg} \gamma$ . С учетом (4) расстояние от сечения I до осевой плоскости валков:

$$x_{2I} = \operatorname{tg} \alpha_c \sqrt{B_p (B_p + D_H \cdot \operatorname{ctg} \alpha_c)} - B_p \cdot \operatorname{ctg} \gamma. \quad (5)$$

На основании (1) и (5) время запаздывания начала смещения подвижного элемента верхнего вала по отношению к нижнему в клетях, где  $\alpha_c \geq 90^\circ - \gamma$  определяется по зависимости

$$t_2 = \frac{1}{V_{\text{пр}}} \left[ \sin \frac{\alpha_c}{2} \sqrt{(D_B - 2r \sin^2 \frac{\alpha_c}{2}) \cdot 2r} + \operatorname{tg} \alpha_c \sqrt{B_p (B_p + D_H \cdot \operatorname{ctg} \alpha_c)} - B_p \operatorname{ctg} \gamma \right]. \quad (6)$$

Отдельного рассматривания требует взаимодействие профиля с подвижными элементами в последней клетке, где полки швеллера окончательно подгибаются до суммарного угла  $\alpha_c = 90^\circ$ . Как видно из рис. 4, смещению элемента верхнего вала в последней клетке препятствует вся внутренняя поверхность, как места изгиба, так и полки профиля. Из геометрических соотношений длина этой поверхности:

$$x'_1 = \sqrt{(b - c)(D_B - b + S)}, \quad (7)$$

где  $b$  – высота полки;

$S$  – толщина заготовки.

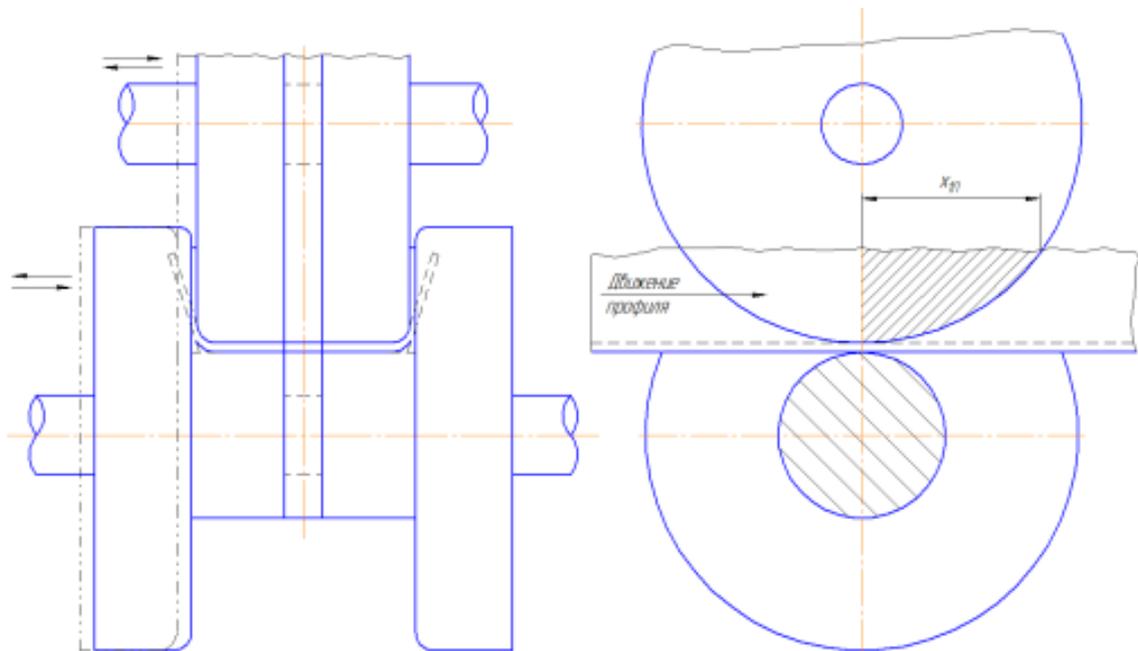


Рис. 4 - Схема для определения длины участка профиля, препятствующего смещению верхнего валка в последней клетке

Очевидно, что в момент соприкосновения наружной поверхности профиля в сечении II с нижним валком граничное сечение I удалено от осевой плоскости валков на расстояние:

$$x_2' = \sqrt{(0,5D)^2 - (0,5D_H)^2}, \quad (8)$$

где  $D$  – диаметр бокового элемента нижнего валка.

С учетом изложенного, время запаздывания смещения верхнего валка по сравнению со смещением нижнего

$$t_3 = \frac{\sqrt{(b-c)(D_B - b + S) + \sqrt{(0,5D)^2 - (0,5D_H)^2}}}{V_{пр}}. \quad (9)$$

Таким образом, в результате теоретического анализа получены зависимости (2), (6) и (9), по которым могут быть определены моменты начала работы механизмов поперечного смещения формирующих элементов валков при любых соотношениях геометрических размеров профиля и валков, режимах формовки и скоростях профилирования.

По формулам (2), (6), (9) были проведены расчёты, в качестве исходных данных для которых приняты параметры профиля, изготовленного затем на

профилегибочном агрегате (ПГА) 2-5x50-670:  $S=4$  мм,  $b=90$  мм,  $B_p = 50$  мм,  $\gamma=8^\circ$ ,  $r=10$  мм,  $V_{пр.}=30$  мм/сек.

Профили, отформованные на ПГА 2-5x50-670 при разновременном смещении валков, были более высокого качества, чем полученные с применением их одновременного смещения. При смещении подвижные элементы валков не заклинивались, процесс отличается высокой стабильностью. Усилие смещения уменьшилось в среднем на 45%.

По результатам расчётов построены графики зависимости требуемого интервала между начальными моментами смещения нижнего и верхнего валков от суммарного угла подгибки  $\alpha_c$  (рис. 5).



Рис. 5 - Изменение интервала между начальными моментами смещения элементов верхнего и нижнего валков в зависимости от суммарного угла подгибки: 1 -  $D_B=700$  мм; 2 -  $D_B=375$  мм

## 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОДГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОФИЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ ФОРМОВКЕ СО СМЕЩЕНИЕМ ВАЛКОВ

Поскольку наиболее типичным видом профилей переменного сечения являются профили, имеющие три характерных участка по длине: два с постоянной толщиной стенки и параллельными полками, различающиеся лишь шириной стенки, и третий с непараллельными полками и переменной шириной стенки. При теоретическом анализе рассматриваем формообразование профиля от узкого конца к широкому концу. На участке переменного сечения валки смещаются к кромке формирующей полки, при этом обеспечивается параллельность другой полки продольной оси профиля по всей его длине (рис. 6).

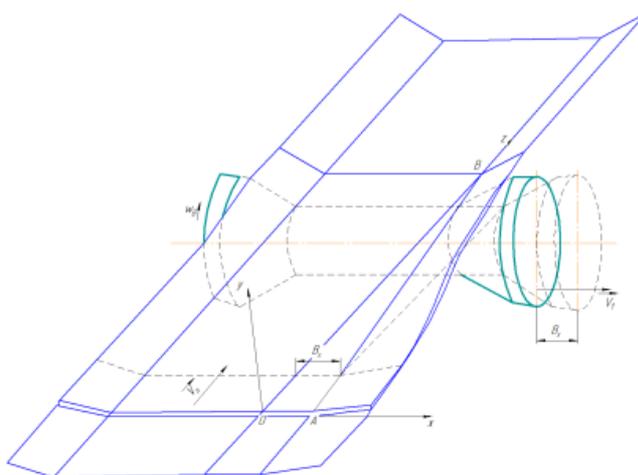


Рис. 6 - Схема очага деформации при формовке участка переменного сечения

Процесс образования места изгиба при подгибке полок профиля не отличается от процесса, подробно исследованного в работах по теории профилирования. Поэтому в данной работе исследовано деформированное состояние металла только подгибаемых элементов. В качестве метода исследования выбран метод механики сплошных сред с использованием поля скоростей перемещений. В качестве допущения принимаем: если совокупность материальных точек первоначально располагается в плоскости, перпендикулярной продольной оси профиля, то в процессе деформирования она остается в этой же плоскости (гипотеза плоских сечений), точки не меняют

своего взаимного положения, то есть, если до деформации они располагались на перпендикуляре к плоскости, проходящей по середине толщины заготовки, то в процессе деформации они останутся на этой же прямой, которая будет нормальной к середине поверхности деформируемого элемента (гипотеза тонких пластин Кирхгофа-Лява).

Процесс подгибки рассматриваем в декартовой системе координат. Начало координат  $O$  располагаем таким образом, что плоскость  $xOy$  совпадает с плоскостью поперечного сечения профиля на границе участка плавного перехода, ось  $Ox$  проходит посередине поверхности стенки, а ось  $Oz$  – через место изгиба узкой части профиля и направлена в сторону движения полосы (рис. 6). Для упрощения анализа считаем, что произвольные сечения подгибаемого элемента в процессе формовки переходит из начального положения в конечное путем поворота вокруг прямой  $AB$ , проходящей через место изгиба участка переменного сечения и расположенной по отношению к продольной оси  $Oz$  под тем же углом  $\gamma$ , что и кромка исходной заготовки.

При рассмотрении перехода произвольно выбранного сечения подгибаемого элемента из одного положения в другое (рис. 7), согласно принятым гипотезам, скорость произвольной точки  $M(x_0, y_0)$  данного сечения подгибаемого элемента определяется следующим образом:

$$\overrightarrow{[V_M]} = \omega(z) \cdot \overrightarrow{[r_l]}, \quad (10)$$

где  $\omega(z)$  – функция изменения угловой скорости поворота сечения в плоскости  $xOy$ ;

$\overrightarrow{[r_l]}$  – радиус – вектор, определяющий положение рассматриваемой точки в плоскости  $xOy$ .

Поскольку угол поворота сечения подгибаемого элемента в процессе формовки равен углу подгибки  $\alpha$ , который изменяется вдоль очага деформации, можно записать:

$$\omega(z) = \alpha(z). \quad (11)$$

Согласно расчетной схеме (рис. 7) модуль радиуса-вектора определяется по зависимости:

$$[\overline{r_{i0}}] = \sqrt{(x_0 - B_x)^2 + y_0^2}. \quad (12)$$

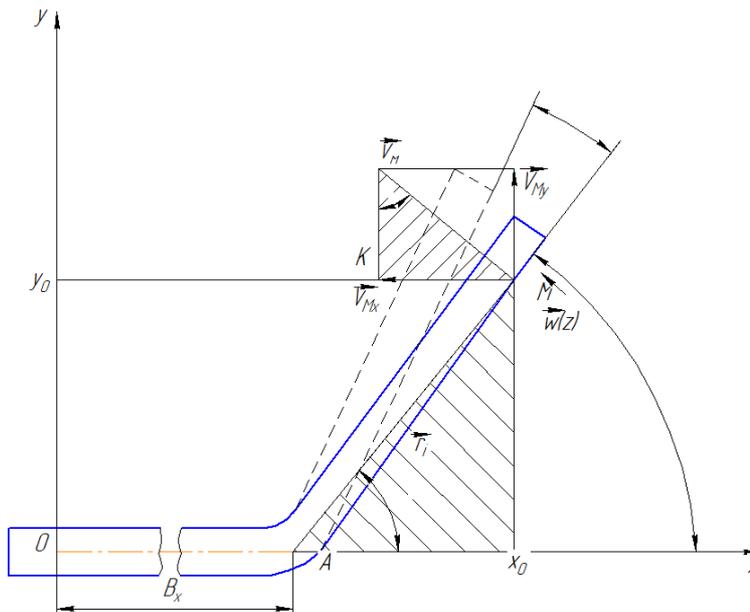


Рис. 7 - Расчетная схема к определению поля скоростей перемещения

Однако следует учитывать, что в процессе формовки происходит дополнительное изменение координат точек подгибаемого элемента и действительная его ширина на участке переменного сечения меньше рассматриваемой по принятой расчетной схеме в силу непараллельности линии изгиба и продольной оси профиля (рис. 8). Поэтому реальная величина радиуса-вектора произвольной точки подгибаемого элемента

$$[\overline{r_i}] = [\overline{r_{i0}}] + \Delta r_i \quad (13)$$

где  $\Delta r_i$  – изменение модуля радиуса-вектора в процессе подгибки, мм.

Для перехода любой точки подгибаемого элемента из начального положения  $(x_0, y_0)$  в конечное  $(x_k, y_k)$ , приняв линейную зависимость изменения величины радиуса-вектора от угла подгибки, можно записать (рис. 8):

$$\Delta r_i = \left[ \frac{2}{\pi} (1 - \cos \gamma) \sqrt{(x_0 - B_x)^2 + y_0^2} \right] \alpha(z). \quad (14)$$

Определим проекции скорости  $\vec{V}$  на координатные оси  $X, Y$  в общем виде:

$$V_{Mx} = \omega(z) [\overline{r_i}] \sin \beta; \quad V_{My} = \omega(z) [\overline{r_i}] \cos \beta, \quad (15)$$

где  $\beta$  – угол между радиусом – вектором и осью  $Ox$ , определяемый через координаты начального положения точки  $M$ .

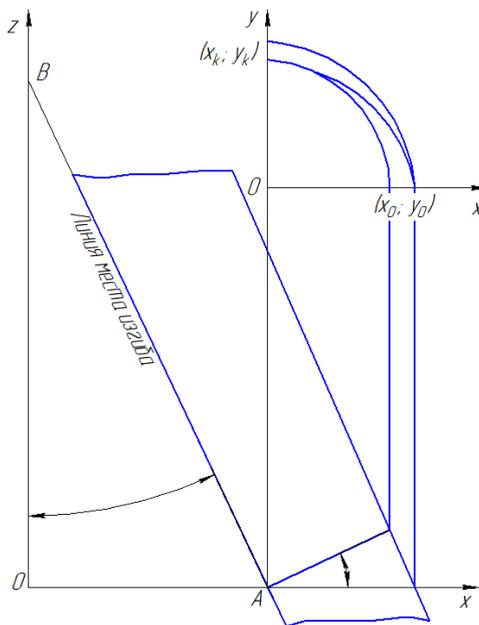


Рис. 8 - Схема для определения изменения  $[\overline{r}_l]$  в процессе подгибки  
Подставляя (11) и (13) в (15), с учетом (12) и (14), получим:

$$V_{Mx} = -[\alpha(z)] \left[ 1 - \frac{2(1 - \cos\gamma)}{\pi} \right] y_0;$$

$$V_{My} = -[\alpha(z)] \left[ 1 - \frac{2(1 - \cos\gamma)}{\pi} \right] (x_0 - B_x). \quad (16)$$

В первом приближении зависимость  $\alpha(z)$  является линейной, то есть все точки подгибаемого элемента перемещаются в процессе формовки по прямой. При этом текущее значение угла подгибки:

$$\alpha = \alpha_1 + \frac{z}{L} (\alpha_1 - \alpha_2), \quad (17)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  – угол подгибки в начале и в конце участка деформирования, град;

$L$  – длина очага деформации, мм.

Учитывая соответствие между исходными и текущими координатами  $x \leftrightarrow x_0, y \leftrightarrow y_0, z \leftrightarrow z_0$ , определяемое известным уравнением (13), условие отсутствия скорости в направлении оси  $Oz$  (решается плоская задача), а также выражение (17), поле скоростей материальных точек в процессе подгибки

полок при профилировании участка переменного сечения запишем следующим образом:

$$\begin{aligned} V_x &= - \left[ \alpha_1 + \frac{z}{L} (\alpha_1 - \alpha_2) \right]^2 \left[ 1 - \frac{2(1 - \cos\gamma)}{\pi} \right] y_0; \\ V_y &= \left[ \alpha_1 + \frac{z}{L} (\alpha_2 - \alpha_1) \right]^2 \left[ 1 - \frac{2(1 - \cos\gamma)}{\pi} \right] (x_0 - B_x); \\ V_z &= 0 \end{aligned} \quad (18)$$

На основании расчета по формулам (18) построено поле скоростей перемещений частиц металла при подгибке полке на участке с переменным сечением (рис. 9). Значение  $V_x$  и  $V_y$  рассчитаны для точек, расположенных на наружной поверхности полки профиля ( $h=90$  мм,  $\gamma=8^\circ$ ,  $B_x=50$  мм) при подгибке с  $\alpha_1=36^\circ$  до  $\alpha_2=52^\circ$ .

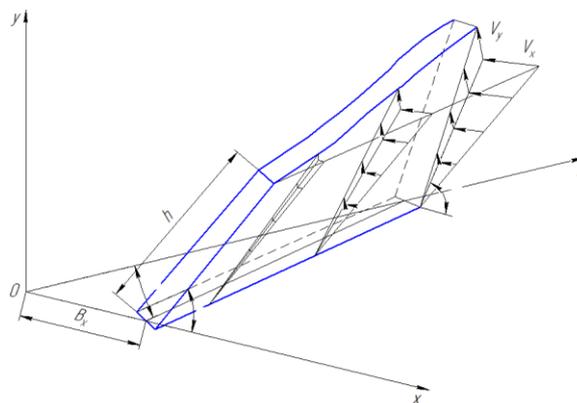


Рис. 9 - Поле скоростей перемещений при формовке участка переменного сечения

Анализ полученных эпюр распределения составляющих скоростей перемещений показал их согласуемость с кинематическими представлениями о перемещении частиц в процессе формообразования профилей переменного сечения. Характер распределения горизонтальной составляющей  $V_x$  и вертикальной составляющей  $V_y$  одинаков, с той лишь разницей, что значение  $V_y$  возрастают в конце процесса более интенсивно, чем  $V_x$ . Как  $V_x$ , так и  $V_y$  линейно зависит от координат  $y$ ,  $x$  и нелинейно зависит от  $z$ . Линейная зависимость объясняется принятой схемой перемещения элемента профиля в процессе подгибки, согласно которой происходит только поворот сечения вокруг точки на линии изгиба; нелинейная – наличием в выражениях (18) квадратичной

зависимости  $\alpha$  от  $z$ . Однако последняя функция мало влияет на изменение составляющих скоростей перемещения, которое близко к линейному.

Исследование деформированного состояния металла проводим по полученному полю скоростей перемещений (18). Используя связь скоростей деформаций со скоростями перемещений в декартовой системе координат (14), получаем:

$$\begin{aligned}\varepsilon'_{xx} &= \frac{V_x}{\partial x} = 0; \quad \varepsilon'_{yy} = \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0; \quad \varepsilon'_{zz} = \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0; \\ \varepsilon'_{xy} &= \frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} = 0; \\ \varepsilon'_{yz} &= \frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial y} = 2 \left[ \alpha_1 + \frac{z}{L} (\alpha_2 - \alpha_1) \right] \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{L} \cdot \left[ 1 - \frac{2(1 - \cos\gamma)}{\pi} \right] (x_0 - B_x); \\ \varepsilon'_{zx} &= \frac{\partial V_z}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial z} = -2 \left[ \alpha_1 + \frac{z}{L} (\alpha_2 - \alpha_1) \right] \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{L} \cdot \left[ 1 - \frac{2(1 - \cos\gamma)}{\pi} \right] y_0.\end{aligned}\quad (19)$$

Для расчета деформаций, согласно принятым предпочтениям, определяем связь текущих координат произвольной точки М ( $x, y, z$ ) с начальными ( $x_0, y_0, z_0$ ):

$$\begin{aligned}x &= (x_0 - B_x) \cos\Delta\alpha(z) - y_0 \sin\Delta\alpha(z) + B_x - \frac{B_x}{L} z \\ y &= (x_0 - B_x) \sin\Delta\alpha(z) + y_0 \cos\Delta\alpha(z) \\ z &= z_0\end{aligned}\quad (20)$$

Из интегральных соотношений между компонентами деформаций  $e_{xx}, e_{yy}, e_{zz}, e_{xy}, e_{yz}, e_{zx}$  и скоростями деформаций, с учетом  $\Delta\alpha(z) = \Delta\alpha \cdot t$ , после преобразований получим:

$$\begin{aligned}e'_{xx} &= 0; \quad e'_{yy} = 0; \quad e'_{zz} = 0; \quad e'_{xy} = 0; \\ \varepsilon'_{yz} &= 2 \left[ \alpha_1 + \frac{z}{L} (\alpha_2 - \alpha_1) \right] \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{L} \cdot \left[ 1 - \frac{2(1 - \cos\gamma)}{\pi} \right] \\ &\cdot \left[ (x_0 - B_x) \frac{\sin\Delta\alpha}{\Delta\alpha} + \frac{y_0}{\Delta\alpha} (\cos\Delta\alpha - 1) + \frac{L-z}{L} B_x \right]; \\ \varepsilon'_{zx} &= -2 \left[ \alpha_1 + \frac{z}{L} (\alpha_2 - \alpha_1) \right] \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{L} \left[ 1 - \frac{2(1 - \cos\gamma)}{\pi} \right] \left[ \frac{\cos\Delta\alpha - 1}{\Delta\alpha} (B_x - x_0) + \frac{y_0}{\Delta\alpha} \sin\Delta\alpha \right].\end{aligned}\quad (21)$$

Аналитическое выражение (21) характеризует распределение в подгибаемом элементе сдвиговых деформаций, наличие которых соответствует

принятой расчетной схеме и рабочей гипотезе. Эти деформации линейно зависят от начальных координат точки. В определенных сечениях участка плавного перехода они достигают максимальных значений:

при

$$z = L \left[ \frac{x_0 - B_x}{B_x} \sin \Delta \alpha - \frac{y_0}{B_x \Delta \alpha} (1 - \cos \Delta \alpha) - \frac{\alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1} + 1 \right]$$

$$(\varepsilon'_{yz})_{max} = \frac{\alpha_1 (2x_0 \Delta \alpha - y_0 \Delta \alpha^2) (\pi - \gamma^2)}{\pi L}; \quad (22)$$

при  $z=L$

$$(\varepsilon'_{zx})_{max} = \frac{\alpha_2 \Delta \alpha^2 (B_x - x_0 - 2 \frac{y_0}{\Delta \alpha}) (\pi - \gamma^2)}{\pi L}. \quad (23)$$

Анализ выражений (22), (23) показывает, что сдвиговые деформации для любой точки подгибаемых элементов принимают максимальное значение не одновременно. Расстояние между плоскостями, соответствующим этим значениям, определяется по зависимости:

$$\Delta z = L \left[ \frac{x_0 - B_x}{B_x \Delta \alpha} \sin \Delta \alpha - \frac{y_0}{B_x \Delta \alpha} (1 - \cos \Delta \alpha) - \frac{\alpha_1}{\Delta \alpha} \right]. \quad (24)$$

С ужесточением режима формовки это расстояние увеличивается. Оно является минимальным у места изгиба и максимальным - у кромки профиля.

### 3 ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ВАЛКОВОЙ ФОРМОВКИ ПРОФИЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ В ВИНТОВЫХ КАЛИБРАХ

Сущность разработанного процесса формовки профилей переменного сечения заключается в предварительной формовке из листовой заготовки трапецевидной формы U-образного профиля с последующей его переформовкой в профиль заданной конфигурации. Переформовка может быть произведена в 3-4 клетях стана, имеющего валки с винтовыми калибрами (рис. 10).

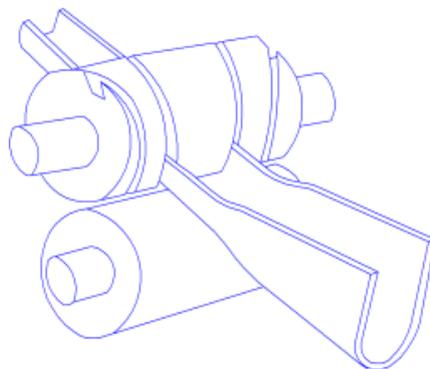


Рис. 10 - Схема переформовки U-образного профиля в валках с винтовыми калибрами

В процессе формовки U-образного профиля происходит обычный изгиб по дуге заданного радиуса, который описывается уравнениями метода механики сплошных сред (полем скоростей перемещений).

Рассмотрим процесс переформовки U-образного профиля в профиль швеллерного типа. Анализ геометрии поперечного сечения промежуточного и конического профилей, а также процесса формоизменения показывает, что в общем случае при образовании каждого из участков сечения готового профиля происходит изменение формы сечения с одновременным его переходом из одного положения в другое (рис. 11).

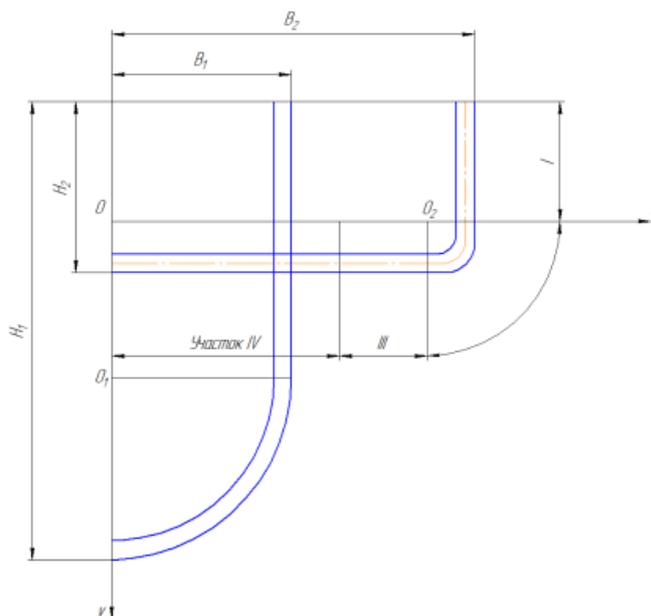


Рис. 11 - Схема для анализа процесса перехода U-образного сечения в сечение профиля швеллерного типа

Разобьем сечение профиля на четыре характерных участка (I, II, III, IV), формоизменение которых в совокупности определяет процесс переформовки. При определении длины участков принимаем, что в ходе формоизменения длина средней линии не изменяется.

Участок I (рис. 12, а) в процессе формовки полка смещается в направлении, перпендикулярном продольной оси заготовки; ось сечения остается прямоугольной, то есть сечение не претерпевает формоизменения. Таким образом, определение поля скоростей перемещений на участке сводится к определению компоненты  $V_x$ .

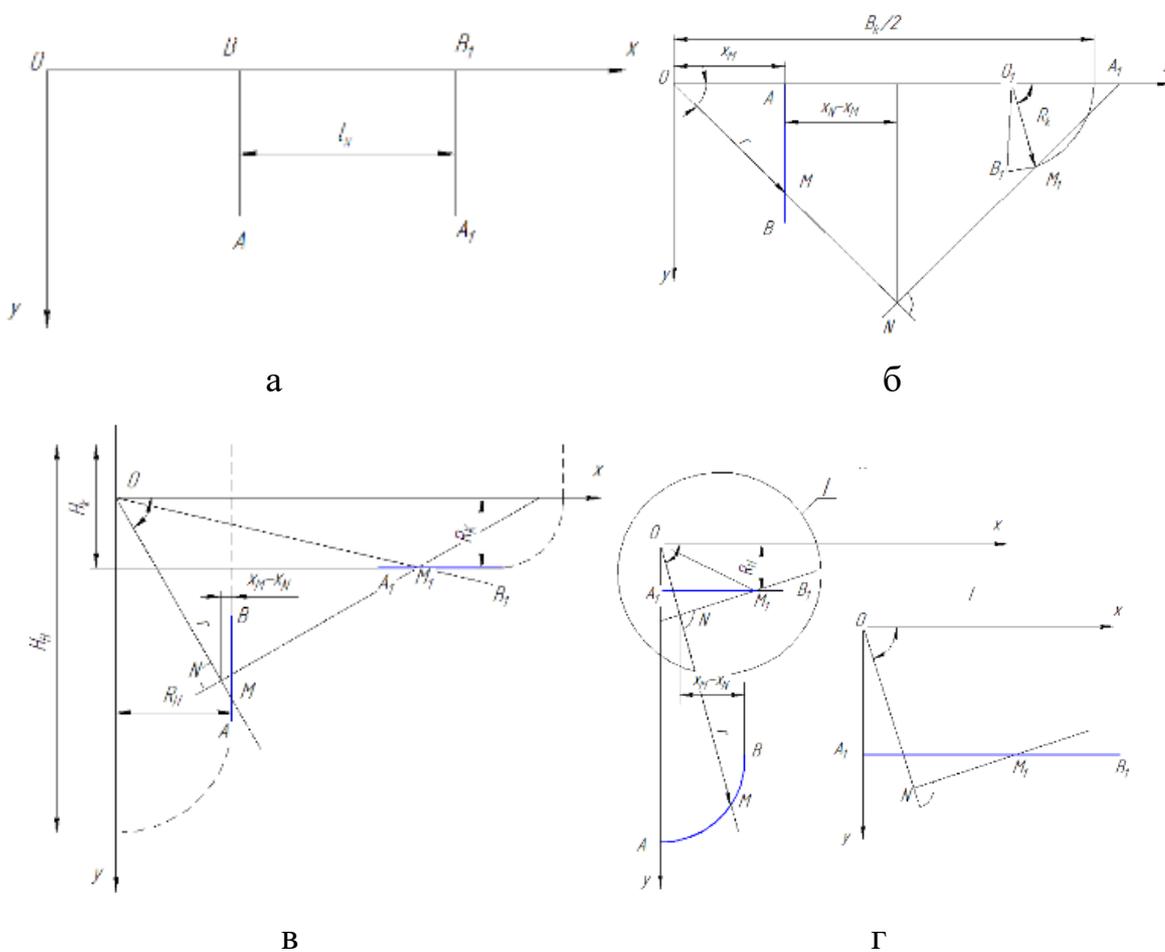


Рис. 12 - Расчетная схема к определению поля скоростей перемещений по участкам профиля: а – участок I смещается в направлении, перпендикулярном продольной оси заготовки (ось сечения остается прямоугольной); б – участок II подвергается изгибу с одновременным смещением вдоль оси  $Ox$  образуя зону соответствующую месту изгиба готового профиля; в - участок III сохраняет свою форму и перемещается из начального положения в конечное, оставаясь

прямолинейным;  $\gamma$  - участок IV при переформовке подвергается разгибу с одновременным смещением вдоль оси  $Oy$

При переформовке все точки участка смещаются по оси  $Ox$  на величину  $l_x$ . Следовательно:

$$V_x = \frac{l_x}{t_{\Pi}}, \quad (25)$$

где  $t_{\Pi}$  – время перехода участка из исходного положения в конечное.

В любом поперечном сечении профиля

$$l_x = L_{\Pi} \cdot tg\gamma, \quad (26)$$

где  $L_{\Pi}$  – длина участка переменного сечения;

$\gamma$  – угол между кромкой профиля и ее положением на исходной заготовке (угол конусности профиля).

Время перехода кромки заготовка из исходного положения в конечное равно времени формовки участка переменного сечения, то есть

$$t_{\Pi} = \frac{L_{\Pi}}{V_{\Pi}},$$

где  $V_{\Pi}$  – скорость профилирования.

Таким образом, поле скоростей перемещений для первого участка примет вид

$$V_x = V_{\Pi} \cdot tg\gamma; V_y = 0; V_z = 0. \quad (27)$$

Участок II (рис. 26, б) при переформовке полка подвергается изгибу с одновременным смещением вдоль оси  $Ox$  образуя, в конечном счете, участок, соответствующий месту изгиба готового профиля.

Радиальное перемещение произвольной точки  $M$  начального положения участка АВ будет соответствовать отрезку  $MN$ .

Находим координаты точки  $N$ :

$$x_N = \frac{y_{M1} - x_{M1} \cdot K_2}{K_1 - K_2}, \quad (28)$$

где  $K_1 = tg\varphi$ ;

$K_2 = ctg\varphi$ .

После преобразования получаем

$$x_N = y_{M1} \cdot \cos\varphi \cdot \sin\varphi + x_{M1} \cdot \cos^2\varphi \quad (29)$$

Координаты точки  $M_1$  находим из геометрических соотношений:

$$x_{M1} = \frac{B_k}{2} - R_k + R_k \cdot \cos\alpha; \quad y_{M1} = R_k \cdot \sin\alpha, \quad (30)$$

где  $B_k$  – ширина готового профиля;

$R_k$  – радиус места изгиба профиля;

$\gamma$  – центральный угол места изгиба, соответствующий рассматриваемой точке.

Из условия постоянства длины средней линии сечения профиля следует, что

$$AM = l_{M1A1},$$

где  $AM = r \sin\varphi$ ;

$l_{A1M1} = \rho\alpha$ ;

$r, \varphi$  – текущие значения координат;

$\rho = \left(R_n - \frac{S_0}{2}\right)$  – радиус нейтральной линии;

$R_n$  – наружный радиус места изгиба;

$S_0$  – толщина заготовки.

Отсюда

$$\alpha = \frac{r}{\rho} \sin\varphi. \quad (31)$$

С целью упрощения выражений запишем тригонометрические функции  $\sin\alpha$  и  $\cos\alpha$  в виде степенного ряда, ограничившись первыми двумя его членами:

$$\sin\alpha = \alpha - \frac{\alpha^3}{6}; \quad \cos\alpha = 1 - \frac{\alpha^2}{2}. \quad (32)$$

После преобразований выражения (30) с учетом (31) и (32) примут вид

$$x_{M1} = \frac{B_k}{2} - R_k \cdot \frac{r^2}{2\rho^2} \cdot \sin^2\varphi; \quad y_{M1} = R_k \left( \frac{r}{\rho} \sin\varphi - \frac{r^3}{6\rho^3} \cdot \sin^3\varphi \right). \quad (33)$$

Подставляя (9) в (5), получим

$$x_N = R_k \left( \frac{r}{\rho} \sin\varphi - \frac{r^3}{6\rho^3} \sin^3\varphi \right) \cos\varphi \sin\varphi + \left( \frac{B_k}{2} - R_k \frac{r^2}{2\rho^2} \cdot \sin^2\varphi \right) \cos^2\varphi. \quad (34)$$

Длина отрезки MN

$$l_{MN} = \frac{x_N - x_M}{\cos\varphi}. \quad (35)$$

Подставляем (10) в (11) и учитывая, что

$$x_M = r \cos\varphi,$$

получим:

$$l_{MN} = \left(1 - \frac{r^2}{6\rho^2} \sin^2\varphi - \frac{r}{2\rho} \cos\varphi\right) \cdot R_k \frac{r}{\rho} \sin^2\varphi - r + \frac{B_k}{2} \cos\varphi. \quad (36)$$

С учетом того, что

$$1 \gg \frac{r^2}{6\rho^2} \sin^2\varphi \gg \frac{r}{2\rho} \cos\varphi,$$

представим выражение (36) в окончательном виде

$$l_{MN} = \left(1 - \frac{r}{2\rho} \cos\varphi\right) R_k \frac{r}{\rho} \sin^2\varphi - r + \frac{B_k}{2} \cos\varphi. \quad (37)$$

Радиальная составляющая скорости перемещения точки М

$$V_r = \frac{l_{MN}}{t_{\Pi}}. \quad (38)$$

Окончательно получим

$$V_r = \frac{V_{\Pi}}{l_{\Pi}} \left[ \left(1 - \frac{r}{2\rho} \cos\varphi\right) R_k \frac{r}{\rho} \sin^2\varphi - r + \frac{B_k}{2} \cos\varphi \right]. \quad (39)$$

Из уравнения неразрывности

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_r}{r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial V_{\varphi}}{\partial \varphi} = 0.$$

Определяем тангенциальную составляющую скорости  $V_{\varphi}$ :

$$V_{\varphi} = \frac{V_{\Pi}}{l_{\Pi}} \left[ 2r\varphi \left(1 - \frac{R_k}{2\rho}\right) + R_k \frac{r}{2\rho} \left(\sin 2\varphi + \frac{r}{\rho} \sin^3\varphi\right) - \frac{B_k}{2} \sin\varphi \right] + C. \quad (40)$$

Постоянная интегрирования  $C$  определяется из граничных условий:

при  $\varphi=0$

$$V_{\varphi}=0,$$

и, следовательно

$$C=0.$$

Третья составляющая поля скоростей (аксиальная)

$$V_z=0. \quad (41)$$

Участок III (рис. 3, в) сохраняет свою форму, оставаясь прямолинейным, и перемещается из начального положения в конечное положение.

Определяем поле скоростей перемещения точек участка аналогично предыдущему.

Из геометрических соотношений

$$x_N = y_{M1} \cos \varphi \sin \varphi + x_{M1} \cdot \cos^2 \varphi; \quad x_{M1} = x_{A1} + AM; \quad (42)$$

$$x_{A1} = \frac{\pi}{2} \cdot \rho_1, \quad (43)$$

где  $\rho_1 = R_H - \frac{S_0}{2}$ ;

$R_H$  – радиус места изгиба U-образной заготовки;

$$AM = \Delta h - R_H + R_k - r \cdot \sin \varphi, \quad (44)$$

где  $\Delta h = H_H - H_k$ ;

$H_H$  – высота U-образной заготовки;

$H_k$  – высота готового профиля.

С учетом (43), (44) и рис. 12, в

$$x_{M1} = \frac{\pi \rho_1}{2} + \Delta h - R_H + R_k - r \cdot \sin \varphi; \quad y_{M1} = R_k. \quad (45)$$

Тогда выражение (42) примет вид

$$x_N = R_k \cdot \cos \varphi \cdot \sin \varphi + \left( \frac{\pi \rho_1}{2} + \Delta h - R_H + R_k - r \cdot \sin \varphi \right) \cdot \cos^2 \varphi. \quad (46)$$

В соответствии с рис. 3, в и (21)

$$l_{MN} = r - R_k \cdot \sin \varphi - \left( \frac{\pi \rho_1}{2} + \Delta h - R_H + R_k - r \sin \varphi \right) \cos \varphi. \quad (47)$$

Выражение для радиальной составляющей скорости  $V_r$  на основании (38), для тангенциальной  $V_\varphi$  – на основании выражений для  $V_r$  с учетом уравнения неразрывности.

Поле скоростей перемещений для участка III будет иметь вид:

$$V_r = \frac{V_\Pi}{l_\Pi} \left[ r \cdot R_k \cdot \sin \varphi - \left( \Delta h - R_H + R_k - r \cdot \sin \varphi + \frac{\pi \rho_1}{2} \right) \cos \varphi \right];$$

$$V_\varphi = \frac{V_\Pi}{l_\Pi} \left[ \left( \Delta h - R_H + R_k + \frac{\pi \rho_1}{2} \right) \sin \varphi - R_k \cdot \cos \varphi - 2 \cdot \varphi + \frac{r}{2} \cos 2\varphi \right];$$

$$V_z = 0. \quad (48)$$

Участок IV (рис. 3, г) при переформовке подвергается разгибу с одновременным смещением вдоль оси  $Oy$ .

Аналогично предыдущему расчету

$$x_N = y_{M1} \cos\varphi \sin\varphi + x_{M1} \cos^2\varphi. \quad (49)$$

Подставив в (49)

$$x_{M1} = R_k \frac{r}{\rho} \left( \frac{\pi}{2} - \varphi \right);$$

$$y_{M1} = R_k,$$

получим

$$x_N = R_k \cos\varphi \sin\varphi + R_k \frac{r}{\rho} \left( \frac{\pi}{2} - \varphi \right) \cos^2\varphi. \quad (50)$$

Из очевидных геометрических соотношений

$$l_{MN} = r - R_k \sin\varphi - R_k \frac{r}{\rho} \left( \frac{\pi}{2} - \varphi \right) \cos\varphi. \quad (51)$$

Используя (17) и уравнение неразрывности, получаем поле скоростей перемещений

$$V_r = \frac{V_{\Pi}}{l_{\Pi}} \left[ r - R_k \sin\varphi - R_k \frac{r}{\rho} \left( \frac{\pi}{2} - \varphi \right) \cos\varphi \right];$$

$$V_{\varphi} = \frac{V_{\Pi}}{l_{\Pi}} \left[ 2r\varphi \left( 1 + \frac{R_k}{\rho} \sin\varphi \right) - R_k \frac{r}{\rho} (\pi \sin\varphi - \cos\varphi) + R_k \cos\varphi \right];$$

$$V_z = 0. \quad (52)$$

Распределение радиальной составляющей  $V_r$  и тангенциальной составляющей  $V_{\varphi}$  скорости перемещения частиц металла по участкам швеллера с переменной по длине профиля шириной стенки показано графически на рис. 13. Оно соответствует кинематическим представлением о реальном процессе формоизменения заготовки до получения конечной формы готового профиля. Из рис. 13 следует, что радиальная составляющая  $V_r$  имеет максимальное по модулю значение на оси симметрии профиля, затем ее абсолютное значение уменьшается до нуля (на участке III). Далее радиальная скорость изменяет направление и увеличивается до границы с участком I, где она становится постоянной и равной скорости перемещения полки профиля  $V_x$ . Тангенциальная составляющая  $V_{\varphi}$  изменяется от нуля на оси симметрии до максимального

значения в точке, где  $V_r=0$ , с последующим уменьшением до нулевого значения на границе I и II участков.

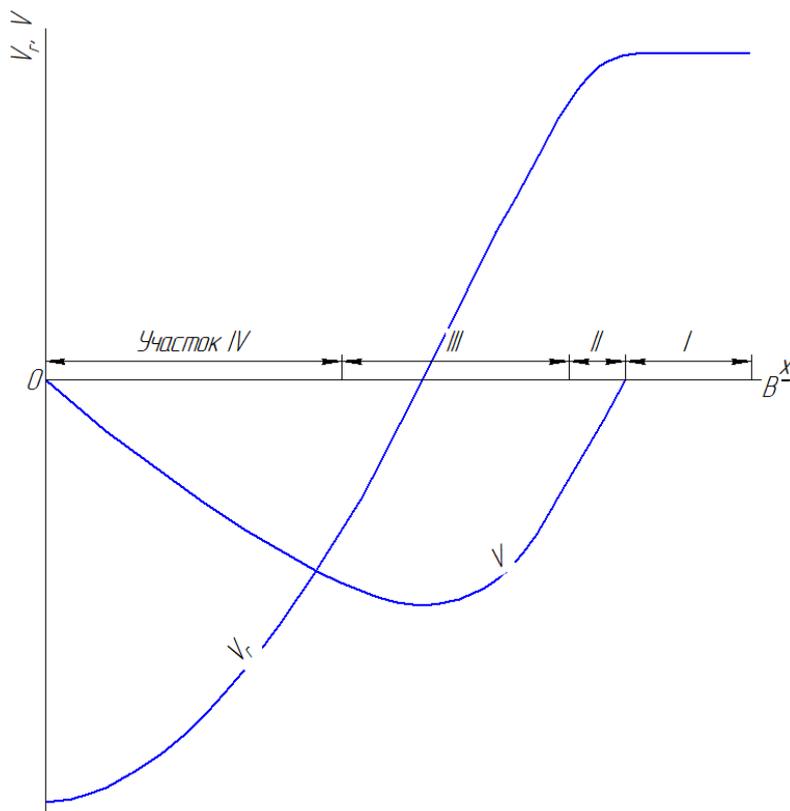


Рис. 13. Распределение радиальной  $V_r$  и тангенциальной  $V_\phi$  составляющих скорости перемещения по ширине заготовки

## ВЫВОДЫ

1. Установлено, что после того, как угол подгибки достигает величины  $90^0$ , временной интервал формовки участка переменной ширины резко возрастает. Это приводит к увеличению зазора в калибре валков, при котором невозможно отформовать место изгиба на участке переменной ширины. Получена зависимость, обеспечивающая расчет одновременного смещения подвижных элементов верхнего и нижнего валков, обеспечивается индивидуальными приводами механизма смещения каждого из них.

2. Полученные аналитические зависимости могут быть использованы в качестве исходных при разработке технологических приемов, направленных на сведение к минимуму неравномерности деформаций по сечению профиля («смягчение» режима формовки, создание дополнительных продольных

деформаций в местах изгиба) и, в конечном итоге, на повышение качества готовых профилей переменного сечения.

3. Полученное распределение  $\alpha_c(z)$  можно использовать при аналитическом определении компонент деформированного состояния металла. Необходимы дальнейшие экспериментальные исследования для проверки аналитических зависимостей и получения дополнительных данных.

4. Располагая графиками распределения  $\alpha_c(z)$  для возможно большего числа сечений рассматриваемого участка, можно получить реальную картину формоизменения и на ее основании определить уточненное напряженно-деформированное состояние металла.

5. Полученное поле скоростей перемещений позволяет определить напряженно-деформированное состояние металла и энергосиловые параметры процесса формовки симметричных профилей переменного сечения в винтовых калибрах, что обеспечивает разработку рациональной технологии формовки таких профилей и оптимальной конструкции формирующих валков.

6. При организации производства профилей переменного сечения полученное поле скоростей перемещений может быть использовано для расчета технологических параметров профилегибочного стана в зависимости от сортамента и геометрии профилей.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ

1. Седов Л.И. Механика сплошной среды. – Москва: Наука, 1983. – 540 с.
2. Ильюшин А.А. Механика сплошной среды. / 3-е изд. – Москва: Изд-во МГУ, 1990. – 285 с.
3. Гун Г.Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением: учебное пособие для вузов. - Москва: Metallurgy, 1983. – 285 с.
4. Тришевский, И.С. Теоретические основы процесса профилирования: монография / И.С. Тришевский, М.Е. Докторов. - Москва: Metallurgy, 1980. - 287 с.

5. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин: Учеб. для втузов. - 4-е изд. - Москва: Наука, 1988. - 640 с.
6. Тришевский И.С. Производство деталей из гнутых профилей / И.С. Тришевский, В.С. Марьин, В.А. Хмель. - Киев: Техніка, 1985. - 127 с.
7. Тришевский И.С. Калибровка валков для производства гнутых профилей проката: монография / И.С. Тришевский, В.И. Мирошниченко, В.П. Стукалов. - Киев: Техніка, 1980. - 168 с.
8. Тришевский И.С. Производство гнутых профилей. Оборудование и технология: монография / И.С. Тришевский, А.Б. Юрченко, В.С. Марьин. - Москва: Металлургия, 1982. - 384 с.