

УДК 621.771.63

**Ю. А. ПЛЕСНЕЦОВ, А.Н. ХРИСТИЧЕНКО, Е.Н. ХРИСТИЧЕНКО****АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ПРОФИЛЕЙ  
ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ ФОРМОВКОЙ В ВАЛКАХ**

В ряде отраслей экономики Украины широко применяются профили переменного сечения типа швеллеров, изготовленных листовой штамповкой. Основным их преимуществом является возможность получения равнопрочных конструкций применительно к конкретным условиям работы при наименьшем расходе металла. Наиболее перспективным способом получения профилей переменного сечения представляется профилирование в валках профилигибочного стана. Установлено, что после того, как угол подгибки достигает величины  $90^{\circ}$ , 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 разновременного смещения подвижных элементов верхнего и нижнего валков, что обеспечивается индивидуальными приводами механизма смещения каждого из них. 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.

**Ключевые слова:** профили переменного сечения, профилирование в валках, участок переменной ширины, временной интервал формовки, смещение подвижных элементов валков.

У ряді галузей економіки України широко застосовуються профілі змінного перетину (типу швелерів), виготовлених листовим штампуванням. Основною їх перевагою є можливість отримання рівномірних конструкцій стосовно до конкретних умов роботи при найменшій витраті металу. Найбільш перспективним способом отримання профілів змінного перетину представляється профілювання в валках профілезгинального стану. Встановлено, що після того, як кут підгинання досягне величини  $90^{\circ}$ , часовий інтервал формування ділянки змінної ширини різко зростає. Це призводить до збільшення зазору в калібрі валків, при якому неможливо відформувати місце згину на ділянці змінної ширини. Отримано залежність, яка забезпечує розрахунок різночасного зміщення рухомих елементів верхнього та нижнього валків, що забезпечується індивідуальними приводами механізму зсуву кожного з них. Отримані аналітичні залежності можуть бути використані в якості вихідних при розробці технологічних прийомів, спрямованих на зведення до мінімуму нерівномірності деформацій по перетину профілю («пом'якшення» режиму формування, створення додаткових поздовжніх деформацій в місцях згину) і, в кінцевому підсумку, на підвищення якості готових профілів змінного перетину.

**Ключові слова:** профілі змінного перерізу, профілювання в валках, ділянка змінної ширини, часовий інтервал формування, зміщення рухомих елементів валків.

In a number of branches of the Ukrainian economy, profiles of variable cross-section type of channels, manufactured by sheet punching, are widely used. Their main advantage is the possibility of obtaining equally strong structures with reference to specific operating conditions at the lowest metal consumption. The most promising way of obtaining profiles of variable cross-section is represented by profiling in the rolls of the roll forming mill. It is established that after the angle of the bend reaches  $90^{\circ}$ , the time interval for forming a section of variable width increases sharply. This leads to an increase in clearance in the caliber of the rolls, in which it is not possible to mold the bending point in a section of variable width. A dependence providing the calculation of the simultaneous displacement of the moving elements of the upper and lower rolls is obtained, which is provided by individual drives of the mechanism of displacement of each of them. The obtained analytical dependencies can be used as initial ones in the development of technological methods aimed at minimizing the unevenness of deformations along the section of the profile ("softening" the molding regime, creating additional longitudinal deformations at bending points) and, ultimately, improving the quality of the finished profiles variable section.

**Keywords:** variable cross-section profiles roll forming, variable-width section, time interval of forming, displacement of rolling elements of rolls.

**Введение.** 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.

**Актуальность темы.** 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 профилигибочного 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 механики сплошных сред (получено поле скоростей перемещений металла в очаге деформации) [1–4], а также зависимостей для расчета кулачковых механизмов [5].

**Результаты исследований.**

**Кинематический анализ формовки профилей переменного сечения. Постановка задачи.**

Для опробования возможности производства профилей переменного сечения формовкой в валках выбран профилегбочный стан 2-5х50-670, 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.

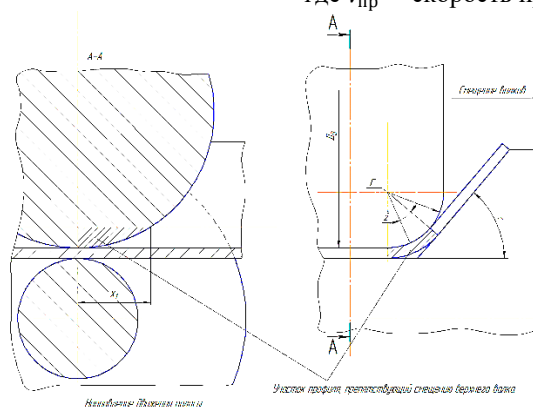


Рис. 2 – Схема для определения длины участка контакта верхнего вала с местом изгиба профиля за осевой плоскостью валков

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

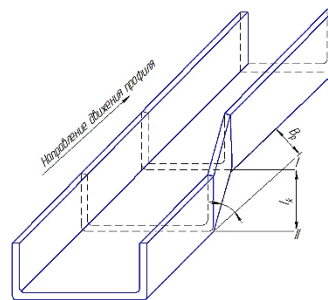


Рис. 1 – Общий вид профиля

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 формирующих 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:

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

где  $V_{np}$  – скорость профилирования.

граничному сеченні 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.

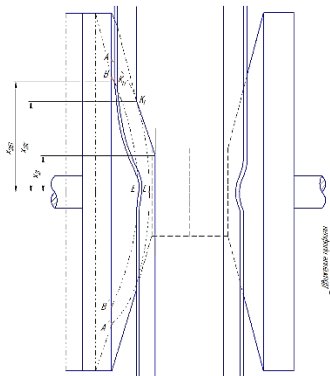


Рис. 3 – Схема для определения соприкосновения сечения II с конической поверхностью нижнего валка:  $D_H$  – катающий диаметр нижнего валка;  $B_p$  – перепад ширины стенки

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  $K_n$  на гиперболе  $BEV'$  – 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:

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

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 валка определяется в зависимости от положения сечения I, необходимо найти положение этого сечения в момент соприкосновения сечения II с подвижным элементом нижнего валка. Расстояние между сечениями I и II равно  $B_p ctg\gamma$ . С учетом (4) расстояние от сечения I до осевой плоскости валков:

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

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

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

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 валка 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.

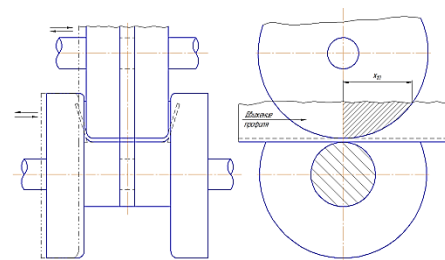


Рис. 4 – Схема для определения длины участка профиля, препятствующего смещению верхнего валка в последней клетке

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

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

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 профилирующем стане 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 стане 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).

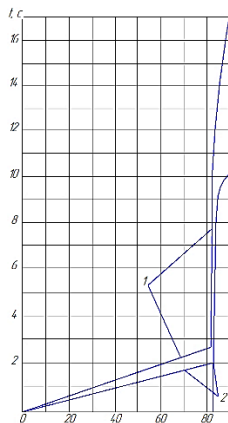


Рис. 5 – Изменение интервала между начальными моментами смещения элементов верхнего и нижнего валков в зависимости от суммарного угла подгибки: 1 –  $D_B=700$  мм; 2 –  $D_B=375$  мм

#### **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 стёки, и третий с непараллельными полками и переменной шириной стенки, при теоретическом анализе рассматриваем формообразование профиля от узкого конца к широкому. 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).

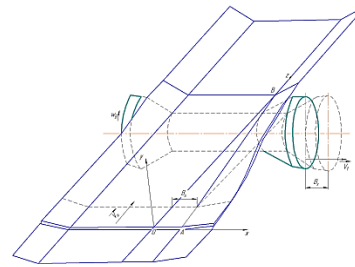


Рис. 6 – Схема очага деформации при формовке участка переменного сечения

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. Принимаем, что 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), а точки не меняют своего взаимного положения: так, 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 (постулат 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 по середине 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 переходят 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:

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

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

$\overline{[r_i]}$  – радиус-вектор, определяющий положение рассматриваемой точки в плоскости  $xOy$ .

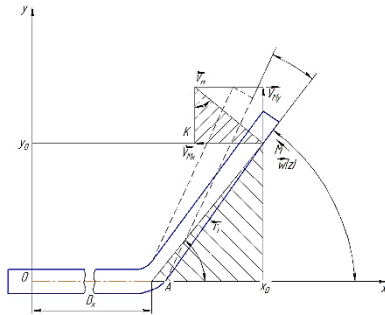


Рис. 7 – Расчетная схема к определению поля скоростей перемещения

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

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

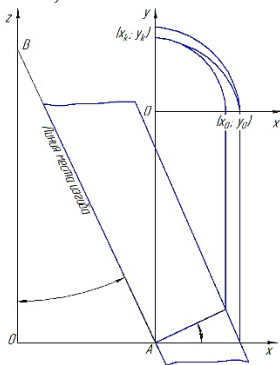
Согласно расчетной схеме рис. 7 модуль радиуса-вектора:

$$|\vec{r}_{i0}| = \sqrt{(x_0 - B_x)^2 + y_0^2}. \quad (12)$$

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

$$|\vec{r}_i| = |\vec{r}_{i0}| + \Delta r_i, \quad (13)$$

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

Рис. 8 – Схема для определения изменения  $|\vec{r}_i|$  в процессе подгибки

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:

$$V_{Mx} = \omega(z) |\vec{r}_i| \sin \beta; \quad V_{My} = \omega(z) |\vec{r}_i| \cos \beta, \quad (15)$$

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

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 полка при профилировании участка переменного сечения запишем следующим образом:

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

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  $\alpha_2=52^\circ$ .

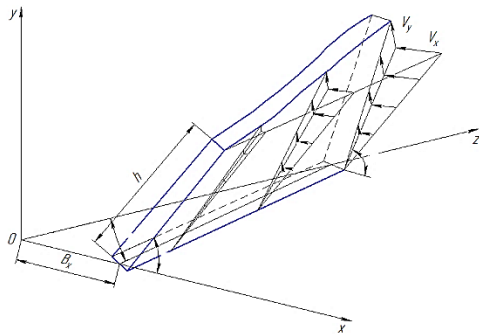


Рис. 9 – Поле скоростей перемещений при формовке участка переменного сечения

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 зависят от координат  $y$ ,  $x$  и нелинейно зависят 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  $M(x, y, z)$  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:

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

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:

$$\begin{aligned} \text{при } z = L \left[ \frac{x_0 - B_x}{B_x} \sin \Delta \alpha - \frac{y_0}{B_x \Delta \alpha} (1 - \cos \Delta \alpha) - \frac{\alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1} + 1 \right] \\ (\varepsilon'_{yz})_{max} = \frac{\alpha_1 (2x_0 \Delta \alpha - y_0 \Delta \alpha^2) (\pi - \gamma^2)}{\pi L}; \end{aligned} \quad (22)$$

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.

#### Выводы.

1. Установлено, что после того, как угол подгибки достигает величины  $90^\circ$ , 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 разновременного 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.

## Список літератури

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: Металлургия, 1983. – 285 с.
4. Тришевский, И.С. Теоретические основы процесса профилирования: монография / И.С. Тришевский, М.Е. Докторов. – Москва: Металлургия, 1980. – 287 с.
5. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин: Учеб. для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – 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.

## Bibliography (transliterated)

1. Sedov L.I. Mekhanika sploshnoy sredy. – Moscow: Nauka. 1983. – 540 p.
2. Ilyushin A.A. Mekhanika sploshnoy sredy. / 3-e izd. – Moscow: Izd-vo MGU. 1990. – 285 p.
3. Gun G.Ya. Matematicheskoye modelirovaniye protsessov obrabotki metallov davleniyem: uchebnoye posobiye dlya vuzov. – Moscow: Metallurgiya. 1983. – 285 p.
4. Trishevskiy I.S. Teoreticheskiye osnovy protsessa profilirovaniya: monografiya / I.S. Trishevskiy. M.E. Doktorov. – Moscow: Metallurgiya. 1980. – 287 p.
5. Artobolevskiy I.I. Teoriya mekhanizmov i mashin: Ucheb. dlya vuzov. – 4-e izd., pererab. i dop. – Moscow: Nauka. 1988. – 640 p.
6. Trishevskiy I.S. Proizvodstvo detaley iz gnutykh profiley / I.S. Trishevskiy. V.S. Marin. V.A. Khmel. – Kiev: Tekhnika. 1985. – 127 p.
7. Trishevskiy I.S. Kalibrovka valkov dlya proizvodstva gnutykh profiley prokata: monografiya / I.S. Trishevskiy. V.I. Miroshnichenko. V.P. Stukalov. – Kiev: Tekhnika. 1980. – 168 p.
8. Trishevskiy I.S. Proizvodstvo gnutykh profiley. Oborudovaniye i tekhnologiya: monografiya / I.S. Trishevskiy. A.B. Yurchenko. V.C. Marin. – Moscow: Metallurgiya. 1982. – 384 p.

Поступила (received) 13.10.2017

## Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Анализ возможности производства профилей переменного сечения формовкой в валках / Ю.А. Плеснецов, А.Н. Христиченко, Е.Н. Христиченко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія:Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №37(1259). – С. 59–65. – Библиогр.: 8 назв.– ISSN 2519-2671

**Аналіз можливості виробництва профілів змінного перетину формуванням в валках / Ю.О. Плеснецов, А.М. Христиченко, Є.М. Христиченко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія:Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №37(1259). – С. 59–65. – Библиогр.: 8 назв.– ISSN 2519-2671

**Analysis of the possibility of producing sections of variable cross-section by forming in rolls / Yu. A. Plesnetsov, A.N. Khristichenko, E.N. Khristichenko** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 37(1259). – P. 59–65. – Bibl.: 8. – ISSN 2519-2671

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Плеснецов Юрій Олександрович** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри обробки металів тиском, тел.: (097) 902-29-18; e-mail: plesnetsov@gmail.com

**Плеснецов Юрий Александрович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», заведующий кафедрой обработки металлов давлением, тел.: (097) 902-29-18; e-mail: plesnetsov@gmail.com

**Plesnetsov Yury Alexandrovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Researcher, National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Head of the department of metal forming, tel.: (097) 902-29-18; e-mail: plesnetsov@gmail.com

**Христиченко Анастасія Миколаївна** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри обробки металів тиском, тел.: (097) 026-17-38; e-mail: Anast733@mail.ru

**Христиченко Анастасия Николаевна** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент кафедры обробки металів тиском, тел.: (097) 026-17-38; e-mail: Anast733@mail.ru

**Khristichenko Anastasia Nikolaevna** – National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», student of the department of metal forming, tel.: (097) 026-17-38; e-mail: Anast733@mail.ru

**Христиченко Єлизавета Миколаївна** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри обробки металів тиском, тел.: (050) 969-72-14; e-mail: Lizax.2014@gmail.com.

**Христиченко Елизавета Николаевна** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент кафедры обробки металів тиском, тел.: (050) 969-72-14; e-mail: Lizax.2014@gmail.com

**Khristichenko Elizaveta Nikolaevna** – National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», student of the department of metal forming, tel.: (050) 969-72-14; e-mail: Lizax.2014@gmail.com