

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА КИНЕМАТИЧЕСКИХ И ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ВАЛЬЦЕВОЙ ФОРМОВКИ

*Я.Е. Залавин, В.Г. Ильичев*

Разработана методика расчета параметров формоизменения листовой заготовки в трехвалковой листогибочной машине, позволяющая с достаточной точностью, без громоздких математических преобразований определить радиус заготовки на выходе из очага деформации в зависимости от взаимного расположения валков в соответствующем проходе.

Ключевые слова: вальцовая формовка, формоизменение, кривизна, математическая модель, окружность, распушинивание.

Современные требования к геометрическим характеристикам труб большого диаметра весьма высоки. В первую очередь это касается овальности труб. Так, например, величина овальности на концах труб для проекта «Nord Stream 2» не должна превышать 3 мм при внутреннем диаметре  $1153 \pm 1$  мм.

При формовке заготовки для труб этого сортамента в вальцах требует решения задача нахождения остаточной кривизны заготовки после изгиба, поскольку на практике, ввиду отсутствия инженерной методики расчета остаточной кривизны заготовки в зависимости от параметров и настроек формовочной машины, качество сформованных заготовок зачастую зависит от квалификации персонала.

Известные методики расчета остаточной кривизны при упруго-пластическом изгибе либо приводят к весьма неточным результатам [1], в силу принятых допущений о реализации при формовке в вальцах кругового изгиба, либо сводятся к решению эллиптических интегралов, которое требует громоздких математических преобразований [2].

С целью практического применения представляет интерес описание процесса формовки в виде зависимостей кривизны листа на выходе из очага деформации от заданного положения верхнего валка и взаимного расположения опорных валков в соответствующем проходе.

При вращении валков очаг деформации имеет асимметричную форму (рис. 1); входной участок DK имеет незначительную кривизну, а участок KN – переменную, близкую к окружности радиуса R4. В такой постанов-

ке для решения задачи определения кривизны заготовки будем считать участок DK отрезком, а KN – окружностью.

Такие допущения, как следует из анализа результатов ряда численных экспериментов, приводят к погрешности в определении угловых координат векторов сил на контакте валок-заготовка порядка 1,5–2,5 %.

Для анализа геометрических характеристик очага деформации относительно наружного диаметра заготовки радиус верхнего валка принят равным  $R_3 = R/3 + s$ ; где  $s$  – толщина листа,  $R/3$  – реальный радиус верхнего валка.

Поскольку отрезок DK является касательным к окружностям с центрами  $O_1$  и  $O_3$  (рис. 2), то:

$$\varphi_1 = \varphi_3 = \frac{\pi}{2} - \alpha - \beta. \quad (1)$$

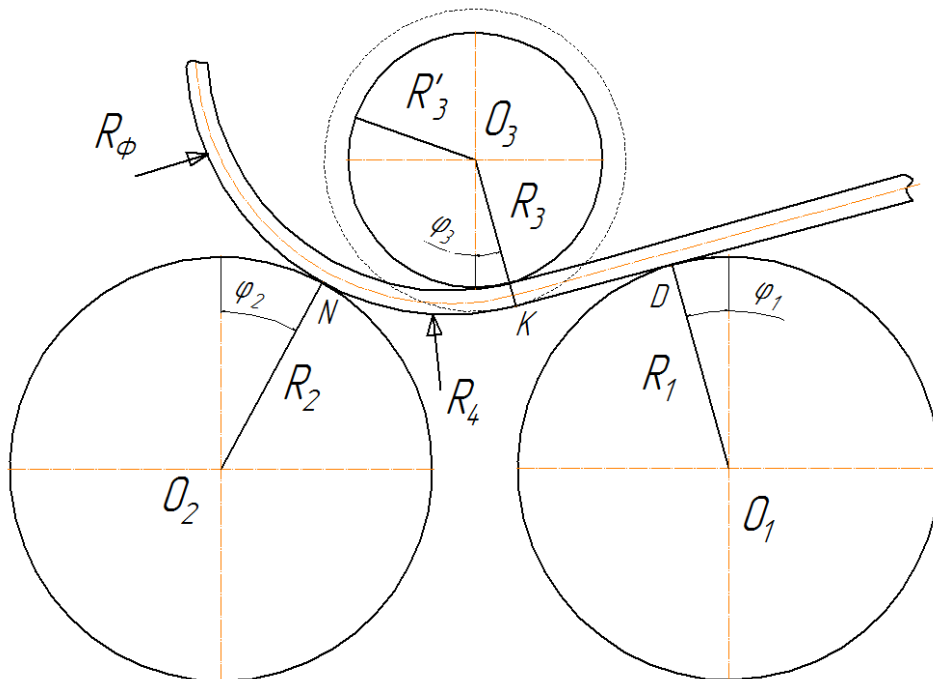


Рис. 1. Очаг деформации при вальцевой формовке в первом проходе

где угол  $\alpha = \arctg \frac{H}{L}; \quad (2)$

$$\beta = \arccos \left( \frac{R_1}{O_1M} \right) = \arccos \frac{(R_3 + R_1) \cdot \cos \left( \arctg \frac{H}{L} \right)}{L}. \quad (3)$$

Подставив в уравнение (1) значения  $\alpha$  и  $\beta$  получим:

$$\varphi_1 = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{H}{L} - \arccos \frac{(R_3 + R_1) \cdot \cos \left( \arctg \frac{H}{L} \right)}{L}. \quad (4)$$

Поскольку углы  $\varphi_1$  и  $\varphi_3$  равны (см. рис. 1), можно определить радиус  $R_4$  (рис. 3). Для этого необходимо решить задачу нахождения параметров окружности касательной к двум окружностям с центрами  $O_2$  и  $O_3$ .

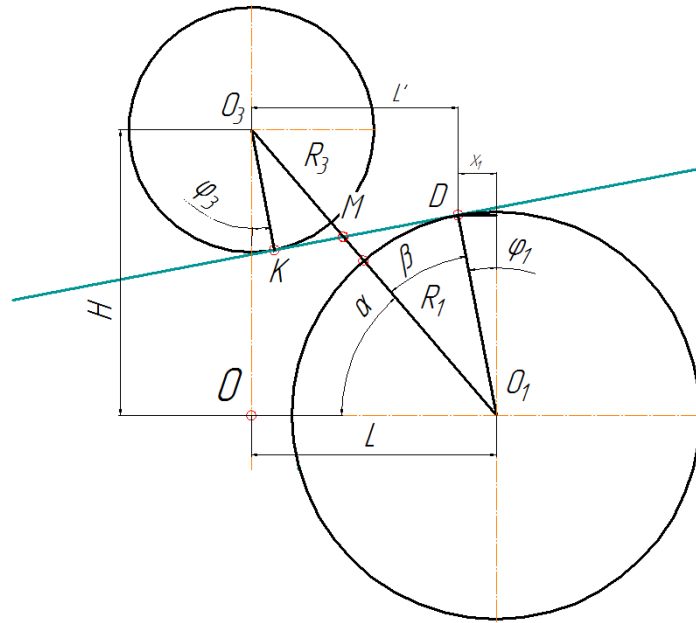


Рис. 2. К определению углов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$

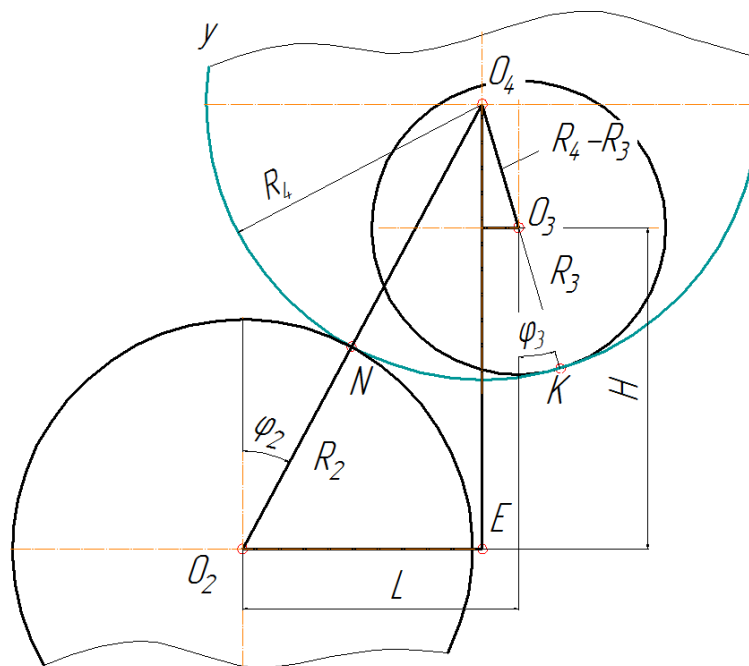


Рис. 3. К определению  $R_4$

Построив перпендикуляр из точки  $O_4$  к оси абсцисс, получим прямоугольный треугольник  $O_2O_4E$ , в котором:

$$O_4E = H + (R_4 - R_3)\cos\varphi_3, \quad (5)$$

$$O_2E = L - (R_4 - R_3)\sin\varphi_3, \quad (6)$$

$$O_2O_4 = R_4 + R_2. \quad (7)$$

В таком случае, из простых геометрических соотношений следует:

$$(H + (R_4 - R_3)\cos\varphi_3)^2 + (L - (R_4 - R_3)\sin\varphi_3)^2 = (R_2 + R_4)^2. \quad (8)$$

После преобразования уравнения (8) выразим из него радиус заготовки на выходе из очага деформации  $R_4$  в виде:

$$R_4 = \frac{H^2 + L^2 + R_3^2 - R_2^2 - 2R_3(H\cos\varphi_3 - L\sin\varphi_3)}{2(R_2 + R_3 - H\cos\varphi_3 + L\sin\varphi_3)}. \quad (9)$$

С учетом распушинивания радиус заготовки  $R_5$  после первого прохода равен:

$$R_5 = \frac{R_4}{k_{\text{расп}}}, \quad (10)$$

где согласно формуле У. Джонсона [3]:

$$k_{\text{расп}} = 1 - 3\left(\frac{\sigma \cdot R_4}{2Es}\right)(1 - \nu^2) + 4\left(\left(\frac{\sigma \cdot R_4}{2Es}\right)(1 - \nu^2)\right)^3, \quad (11)$$

где  $E$  – модуль упругости стали;

$\nu$  – коэффициент Пуассона;

$\sigma = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_T$  – предел текучести по Мизесу.

Во втором и последующих проходах очаг деформации также можно разделить на две части (рис. 4).

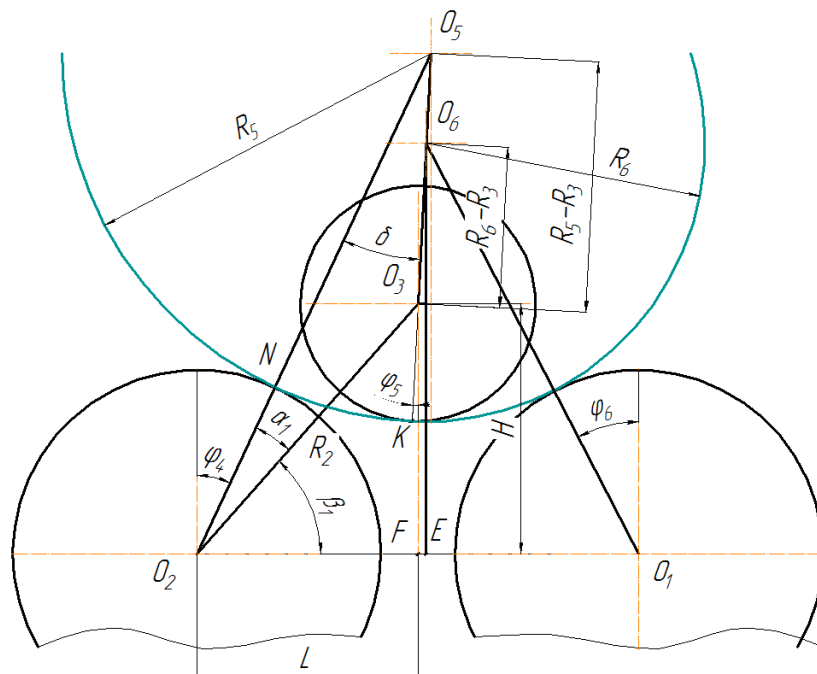


Рис. 4. Очаг деформации во втором проходе

При этом входная часть имеет кривизну радиусом  $R_5$ , приобретенную в предыдущем проходе, а выходная догибается до радиуса  $R_6$ , где  $R_6$  определяется аналогично  $R_4$  в первом проходе:

$$R_6 = \frac{H^2 + L^2 + R_3^2 - R_2^2 - 2R_3(H\cos\varphi_5 - L\sin\varphi_5)}{2(R_2 + R_3 - H\cos\varphi_5 + L\sin\varphi_5)}. \quad (12)$$

Здесь:

$$\varphi_5 = 90^\circ - \alpha_1 - \beta_1 - \delta, \quad (13)$$

где из треугольника  $O_2O_5O_3$  (см. рис. 4):

$$\alpha_1 = \arccos \frac{(R_2 + R_5)^2 + H^2 + L^2 - (R_5 - R_3)^2}{2(R_2 + R_5)\sqrt{H^2 + L^2}}; \quad (14)$$

$$\delta = \arccos \frac{(R_2 + R_5)^2 + (R_5 - R_3)^2 - (H^2 + L^2)}{2(R_2 + R_5)(R_5 - R_3)}; \quad (15)$$

из треугольника  $O_2O_3F$  на рис. 4:

$$\beta_1 = \arctg \frac{H}{L}. \quad (16)$$

После прохождения очага деформации во втором проходе радиус заготовки  $R_7$  с учетом распушинивания равен:

$$R_7 = \frac{R_6}{k_{расп}}. \quad (17)$$

В последующих проходах радиусы заготовки рассчитываются аналогично второму проходу.

В табл. 1 показаны результаты сравнения радиусов заготовки на выходе из очага деформации, рассчитанных по теоретическим формулам и полученных с помощью средств компьютерного моделирования.

Различие радиусов заготовки после первого прохода, полученных с помощью средств компьютерного моделирования и по теоретическим формулам, находится в диапазоне 2–13,2 %.

Таблица 1

Сравнительные результатов теоретических расчетов радиусов формовки в первом проходе с результатами, полученными на цифровой модели

Исходные данные				Дтеор 1	Дциф2	$\frac{Дциф}{Дтеор} \cdot 100, \%$
Толщина стенки h, мм	Раствор L, мм	Погруже- ние Δ, мм	Диаметр верхнего вала Rв, мм			
18	800	85	900	1309	1449	+10,7
24	800	81	900	1318	1433	+8,7
30	800	78	900	1336	1429	+6,9
25,4	800	100	780	1018	1038	+1,96
30	700	70,2	780	1099	1164	-5,9
25,4	600	65	300	632	680	+7,59

1 – значения диаметра заготовки, полученные по теоретическим формулам;

2 – значения диаметра заготовки, полученные из цифровой модели.

Наибольшее расхождение результатов наблюдается на относительно тонких стенках. Очевидно, это связано с тем, что с утонением стенки отклонение от прямой и окружности в первом проходе во входной и выходной частях очага деформации возрастает по причине снижения жесткости заготовки.

При производстве в промышленных условиях партии труб  $\varnothing 1153 \times 30,9$  мм был произведен замер радиуса заготовки после первого и третьего проходов. Одновременно с этим фиксировались режимы формовки с пульта оператора.

В последующем применительно к фактическим режимам формовки было проведено компьютерное моделирование процесса.

В табл. 2 показаны сравнительные результаты расчетных и фактических значений радиуса заготовки от фактического.

Таблица 2

Сравнительные результаты расчета радиусов формовки в первом проходе

	I проход		III проход	
	Радиус по наружной поверхности	Отклонение измеряемой величины от реального процесса, %	Радиус после третьего прохода	Отклонение измеряемой величины от реального процесса, %
Математический расчет	725,45	-8,036	589,29	-3,79
Компьютерное моделирование	832,82	+6,26	–	–
Реальный процесс	783,75	0	611,64	0

Сравнительный анализ расчетных значений радиуса формовки свидетельствует о том, что разработанная математическая модель позволяет с достаточной степенью точности определить радиус заготовки на выходе из очага деформации в зависимости от настройки валков ЛГМ.

Расчет радиальных усилий формовки проведем из условия равенства моментов от действия внутренних и внешних сил в точке соприкосновения листа с верхним валком.

Запишем сумму действующих сил на ось  $y$  в первом проходе (рис. 5):

$$\sum P_y = P_1 \cdot \cos\varphi_1 + P_2 \cdot \cos\varphi_2 - P_3 \cdot \cos\varphi_3 = 0; \quad (18)$$

Силы  $P_1$  и  $P_2$  создают в точке  $K'$  внешние изгибающие моменты  $M_{изг}^{P_1}$  и  $M_{изг}^{P_2}$  соответственно.

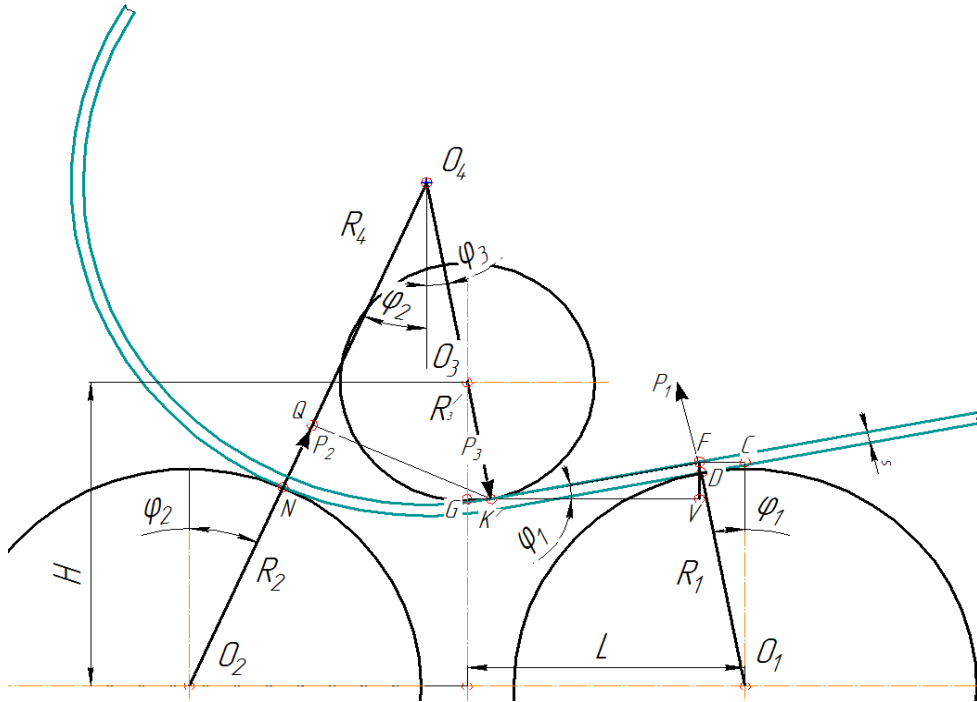


Рис. 5. Схема силового взаимодействия валков и заготовки (I проход)

Изгибающий момент в точке  $K'$  от внутренних сил, если аппроксимировать диаграмму растяжения степенной функцией вида:

$$\sigma = K\varepsilon^m, \quad (19)$$

где

$$k = \frac{\sigma_B}{\varepsilon_B^m}; \quad (20)$$

$$m = \frac{\lg \frac{\sigma_B}{\sigma_T}}{\lg \frac{\varepsilon_B}{\varepsilon_T}}, \quad (21)$$

равен

$$M_{\text{изг}} = \frac{\sigma_T \cdot b \cdot s^{m+1}}{y_0^m \cdot 2^{m+1} \cdot (m+2)}, \quad (22)$$

где  $y_0^i = \varepsilon_T \cdot R_i$  – высота упругого слоя в соответствующем проходе;

$R_i$  – радиус под нагрузкой по нейтральной линии в соответствующем проходе;

$\sigma_T$ , – предел текучести материала;

$b$  – ширина листа;

$s$  – толщина стенки трубы.

Тогда:

$$M_{\text{изг}} = M_{\text{изг}}^{P_1} = M_{\text{изг}}^{P_2}. \quad (24)$$

Изгибающий момент от силы  $P_1$  равен:

$$M_{\text{изг}}^{P_1} = P_1 \cdot K/F, \quad (25)$$

где из  $\Delta K F V$ :

$$K/F = K/V \cdot \cos\varphi_1, \quad (26)$$

Или

$$K/F = L - FC - GK' = L - (R_1 + s) \cdot \sin\varphi_1 - R_3' \cdot \sin\varphi_3, \quad (27)$$

тогда

$$P_1 = \frac{M_{\text{изг}}^{P_1}}{L - (R_1 + s) \cdot \sin\varphi_1 - R_3' \cdot \sin\varphi_3}; \quad (28)$$

Изгибающий момент от силы  $P_2$  равен:

$$M_{\text{изг}}^{P_2} = P_2 \cdot K/Q, \quad (29)$$

где из  $\Delta QO_4K'$ :

$$K/Q = O_4K' \cdot \sin\varphi_2 = (R_4 - s) \cdot \sin(\varphi_2 + \varphi_3), \quad (30)$$

тогда:

$$P_2 = \frac{M_{\text{изг}}^{P_2}}{(R_4 - s) \cdot \sin(\varphi_2 + \varphi_3)}. \quad (31)$$

Из (18) сила  $P_3$  равна:

$$P_3 = \frac{P_1 \cdot \cos\varphi_1 + P_2 \cdot \cos\varphi_2}{\cos\varphi_3}. \quad (32)$$

Подставив значения  $M_{\text{изг}}$  из (22) в (28) и (31) вместо  $M_{\text{изг}}^{P_1}$  и  $M_{\text{изг}}^{P_2}$ , найдем значения усилий  $P_1$  и  $P_2$ .

Для определения усилий во втором и последующих проходах (рис. 6) запишем сумму проекций сил на ось  $y$ :

$$\sum P_y = P_1 \cdot \cos\varphi_6 + P_2 \cdot \cos\varphi_4 - P_3 \cdot \cos\varphi_5 = 0. \quad (33)$$

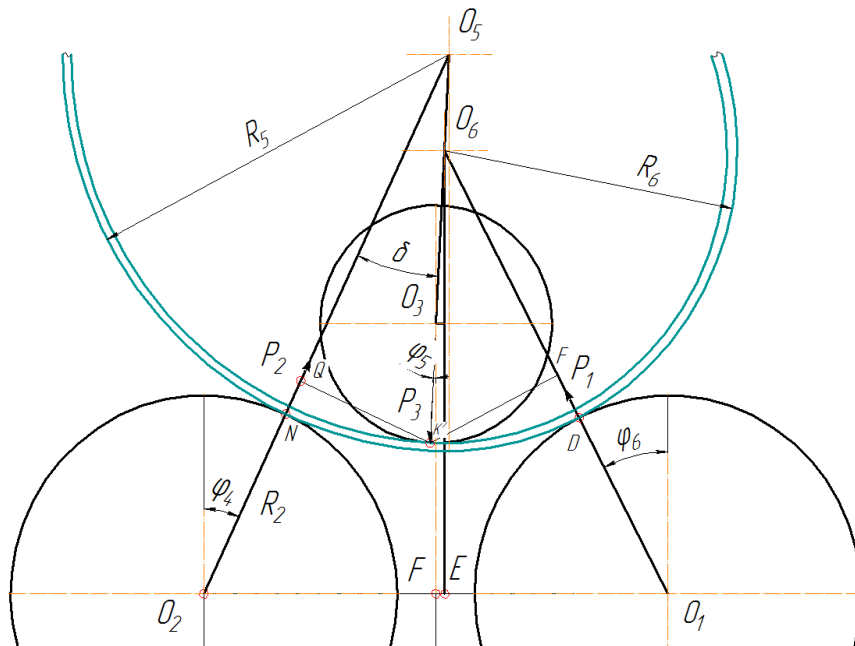


Рис. 6. Силовая схема для II прохода



Изгибающий момент от силы  $P_1$  равен:

$$M_{\text{изг}}^{P_1} = P_1 \cdot K/F, \quad (34)$$

$$M_{\text{изг}}^{P_1} = P_1 \cdot (R_6 - s) \cdot \sin(\varphi_5 + \varphi_6). \quad (35)$$

Тогда

$$P_1 = \frac{M_{\text{изг}}^{P_1}}{(R_6 - s) \cdot \sin(\varphi_5 + \varphi_6)}. \quad (36)$$

Изгибающий момент от силы  $P_2$  равен:

$$M_{\text{изг}}^{P_2} = P_2 \cdot K/Q, \quad (37)$$

$$M_{\text{изг}}^{P_2} = P_2 \cdot (R_5 - s) \cdot \sin \delta. \quad (38)$$

Тогда:

$$P_2 = \frac{M_{\text{изг}}^{P_2}}{(R_5 - s) \cdot \sin \delta}. \quad (39)$$

Из (33) сила  $P_3$  равна:

$$P_3 = \frac{P_1 \cdot \cos \varphi_6 + P_2 \cdot \cos \varphi_4}{\cos \varphi_5}. \quad (40)$$

Подставив значения  $M_{\text{изг}}$  из (15) в (36) и (39) вместо  $M_{\text{изг}}^{P_1}$  и  $M_{\text{изг}}^{P_2}$ , найдем значения усилий  $P_1, P_2, P_3$  во II проходе.

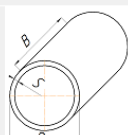
На основе изложенной методики была разработана программа предназначена для расчета технологических и энергосиловых параметров процесса формовки листовой заготовки, используемой для изготовления труб большого диаметра, в трехвалковой листогибочной машине. (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017611243 от 01.02.2017 г.).

Программа (рис. 7) позволяет на основе исходных данных, включающих механические свойства материала, параметры готовой трубы, коэффициент экспандирования, диаметры опорных и нажимных валков, количество проходов, распределение деформаций по проходам, вычислять величину погружения нажимного валка в соответствующем проходе, а также изгибающий момент и усилия, действующие на валки в процессе формовки, угловые координаты точек контакта валков с заготовкой и максимальные деформации в соответствующем проходе. Программа позволяет проводить расчеты от одного до четырех проходов деформации заготовки. Применение программы дает возможность оперативно и с достаточной степенью точности производить инженерные расчеты для настройки трехвалковых листогибочных машин на заданный профила размер.

Исходные данные | Результаты

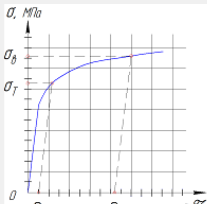
**ПАРАМЕТРЫ ЗАКАЗА**

- Наружный диаметр трубы  $D_n$ , мм: 1420
- Толщина листа,  $s$ , мм: 30
- Длина листа  $B$ , мм: 12000



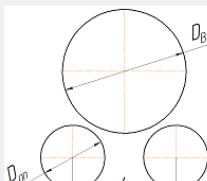
**МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА**

- Модуль упругости  $E$ , МПа: 200000
- Предел текучести, МПа: 550
- Временное сопротивление, МПа: 600
- Максимальные деформации, %: 7
- Коэффициент Пуассона: 0,5



**ПАРАМЕТРЫ ЛГМ**

- Расстояние между опорными валами,  $L$  (мм): 800
- Диаметр верхнего вала,  $D_B$  (мм): 900
- Диаметр опорного вала,  $D_{op}$  (мм): 500
- Количество проходов: [dropdown]



**ДРУГИЕ ПАРАМЕТРЫ**

13. Межкромочный зазор после формовки, мм: 90	18. Доля деформации от конечной деформации, %: 50	19. Остаточная деформация, %: 1,077	20. Радиус, мм: 1408,135
14. Коэффициент экспандирования: 0,009	1 проход, мм: 50		
15. Рассчитать максимально допустимое погружение, мм: 119,345	2 проход, мм: 30	1,723	885,71
16. Рассчитать радиус после последнего прохода, мм: 711,568	3 проход, мм: 15	2,046	748,229
17. Конечная остаточная деформация, %: 2,153	4 проход, мм: 5	2,153	711,568

21. Рассчитать остаточную деформацию и радиусы

22. Рассчитать параметры 1 прохода

23. Рассчитать параметры 2 прохода

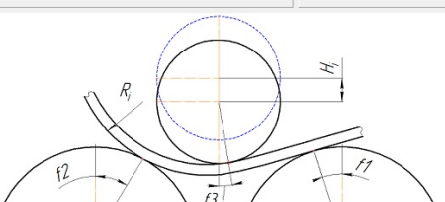
24. Рассчитать параметры 3 прохода

25. Рассчитать параметры 4 прохода

а)

Исходные данные | Результаты

ПАРАМЕТРЫ 1 ПРОХОДА	ПАРАМЕТРЫ 2 ПРОХОДА	ПАРАМЕТРЫ 3 ПРОХОДА	ПАРАМЕТРЫ 4 ПРОХОДА
<b>Технологические:</b>			
1. Погружение верхнего вала $H$ , мм: 54,837	1. Погружение верхнего вала $H$ , мм: 67,194	1. Погружение верхнего вала $H$ , мм: 82,656	1. Погружение верхнего вала $H$ , мм: 88,913
2. Коэффициент распрямления: 0,857	2. Коэффициент распрямления: 0,905	2. Коэффициент распрямления: 0,918	2. Коэффициент распрямления: 0,922
3. Радиус на выходе $R$ , мм: 1408,102	3. Радиус на выходе $R$ , мм: 885,706	3. Радиус на выходе $R$ , мм: 748,225	3. Радиус на выходе $R$ , мм: 711,555
4. Угол $f_1$ : 5,448	4. Угол $f_1$ : 20,773	4. Угол $f_1$ : 22,121	4. Угол $f_1$ : 25,624
5. Угол $f_2$ : 13,137	5. Угол $f_2$ : 16,769	5. Угол $f_2$ : 24,317	5. Угол $f_2$ : 24,406
6. Угол $f_3$ : 5,448	6. Угол $f_3$ : 4,845	6. Угол $f_3$ : 3,911	6. Угол $f_3$ : 2,665
7. Деформация до распрямления, %: 1,259	7. Деформация до распрямления, %: 1,908	7. Деформация до распрямления, %: 2,232	7. Деформация до распрямления, %: 2,34
<b>Энергосиловые:</b>			
8. Изгибающий момент, Н*м: 125532,237	8. Изгибающий момент, Н*м: 126089,697	8. Изгибающий момент, Н*м: 126300,92	8. Изгибающий момент, Н*м: 126364,646
9. Усилие на правом валке, кН: 377,89	9. Усилие на правом валке, кН: 378,093	9. Усилие на правом валке, кН: 406,393	9. Усилие на правом валке, кН: 425,929
10. Усилие на левом валке, кН: 326,47	10. Усилие на левом валке, кН: 442,828	10. Усилие на левом валке, кН: 472,305	10. Усилие на левом валке, кН: 474,979
11. Усилие на верхнем валке, кН: 697,258	11. Усилие на верхнем валке, кН: 780,299	11. Усилие на верхнем валке, кН: 809,761	11. Усилие на верхнем валке, кН: 817,459



б)

Рис. 7. Интерфейс программы для ЭВМ:  
а – окно ввода исходных данных; б – окно вывода результатов расчета

## **Выводы**

1. Разработана инженерная методика расчета параметров формоизменения листовой заготовки при вальцевой формовке, позволяющая определить радиус заготовки на выходе из очага деформации в соответствующем проходе при заданном взаимном положении валков.

2. Получены простые расчетные зависимости, которые позволяют при заданных свойствах материала заготовки определить кривизну в соответствующем проходе и таким образом разработать технологическую схему получения трубной заготовки заданного профилеразмера.

3. При разработке алгоритма с целью оценки степени адекватности модели и достижения более высокой достоверности расчетов использованы ранее полученные результаты конечно-элементного моделирования процесса формовки в вальцах.

## Библиографический список

1. Мошнин, Е.Н. Гибка и правка на ротационных машинах / Е.Н. Мошнин. – М.: Машиностроение, 1967.

2. Лысов, М.Н. Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки / М.Н. Лысов. – М: Машиностроение, 1966.

3. Джонсон, У. Теория пластичности для инженеров / У. Джонсон, П. Меллор. – М.: Машиностроение, 1979.

[К содержанию](#)