



УДК 621.771.062.3; 621.774.353  
DOI: 10.21122/1683-6065-2018-92-3-82-87

Поступила 13.08.2018  
Received 13.08.2018

## РЕВЕРСИВНАЯ КАЛИБРОВКА ПРИ ПОПЕРЕЧНО-ВИНТОВОМ РЕДУЦИРОВАНИИ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК

*В. А. ТОМИЛО, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр-т Независимости, 65. E-mail: stamila@rambler.ru*

*В. В. ЛЕВКОВИЧ, Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, ул. Купревича, 10. E-mail: victor.levkovich@gmail.com*

*Представлена технология поперечно-винтового редуцирования трубных заготовок с реверсивной калибровкой. Проведен расчет изменения геометрии заготовки при изменении угла подачи. Показано, что при малых углах подачи изменение геометрии незначительно, что позволяет проводить реверсивную калибровку заготовки. Проведен расчет параметров реверсивной калибровки.*

**Ключевые слова.** Поперечно-винтовое редуцирование, реверсивная калибровка, угол подачи.

**Для цитирования.** Томило В. А. Реверсивная калибровка при поперечно-винтовом редуцировании трубных заготовок / В. А. Томило, В. В. Левкович // Литье и металлургия. 2018. Т. 92. № 3. С. 82–87. DOI: 10.21122/1683-6065-2018-92-3-82-87.

## REVERSE GROOVING FOR CROSS-SCREW REDUCTION OF TUBE BULLETS

*V. A. TAMILA, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: stamila@rambler.ru*

*V. V. LIAUKOVICH, Physical-Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 10, Kuprevich str. E-mail: victor.levkovich@gmail.com*

*The technology of cross-screw reduction of tube billets with reverse correction is presented. The calculation of the change in the geometry of the workpiece with a change in the feed angle is carried out. It is shown that for small feeding angles the change in geometry is insignificant, which makes it possible to conduct reverse correction of the workpiece. The calculation of parameters of reverse grooving is carried out.*

**Keywords.** Cross-screw reduction, reverse correction, feed angle.

**For citation.** Tamila V. A., Liaukovich V. V. Reverse grooving for cross-screw reduction of tube bullets. Foundry production and metallurgy, 2018, vol. 92, no. 3, pp. 82–87. DOI: 10.21122/1683-6065-2018-92-3-82-87.

В современном машиностроении находят широкое применение ступенчатые трубные заготовки, которые используют при изготовлении осей, цапф и других деталей узлов машиностроения [1]. Среди методов для получения заготовок данного типа – ковка, штамповка с применением молотов, радиально-ковочных, ротационных машин и др. [например, 2–4]. Перспективным методом получения ступенчатых трубных заготовок, обеспечивающим простоту автоматизации, гибкость процесса и высокую точность получаемых заготовок, является поперечно-винтовое редуцирование (ПВР) [5] (рис. 1).

Обработка осуществляется следующим образом. Заготовка 1 подается в межвалковый зазор, где происходит ее редуцирование валками 2. Осевое перемещение заготовки в процессе обработки обеспечивается отличным от нуля углом подачи  $\alpha$  (рис. 2). При достижении заданной технологическим процессом длины редуцированной части происходит изменение угла подачи  $\alpha$  в область отрицательных значений, как показано на рис. 1, 2, что обеспечивает получение заготовок с редуцированным концевым участком необходимой длины и выведение заготовки из межвалкового зазора. В этом случае при изменении угла  $\alpha$  происходит изменение геометрии конического участка между обработанной и необработанной частями заготовки.

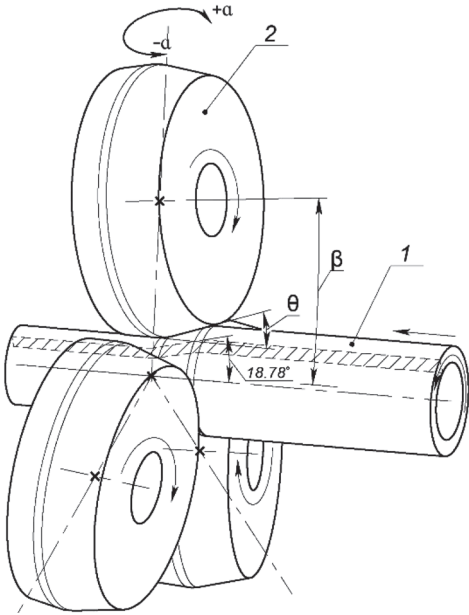


Рис. 1. Схема поперечно-винтового редуцирования

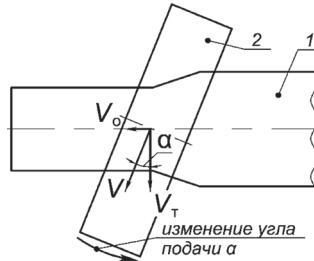


Рис. 2. Скорость редуцирования:  $V$  – скорость на бочке вала;  $V_o$  – осевая составляющая скорости;  $V_T$  – тангенциальная составляющая скорости

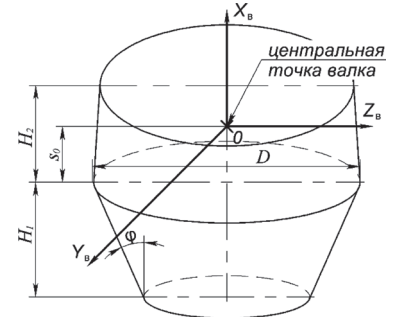


Рис. 3. Эскиз вала:  $H_1$ ,  $H_2$  – длины входного и выходного участков вала соответственно;  $s_0$  – расстояние от пережима до центральной точки вала ( $s_0 = 0$ );  $D$  – диаметр вала в точке пережима ( $R_{\Pi} = D/2$ )

В качестве критерия, характеризующего изменение очага деформации при редуцировании, принята величина изменения радиуса заготовки в каждом поперечном сечении очага деформации при изменении угла подачи  $\alpha$ . На рис. 3 приведен эскиз прокатного вала. Ось  $X_v$  совпадает с осью вала, начало координат – с центральной точкой вала (точка пересечения оси  $X_v$  вала с плоскостью), в которой лежат оси поворота валков на угол  $\alpha$  (ось поворота вала показана на рис. 4). Уравнение, описывающее коническую поверхность входного участка вала в системе координат ( $X_v$ ,  $Y_v$ ,  $Z_v$ ), имеет следующий вид:

$$Y_v^2 + Z_v^2 - (X_v \tan \varphi + R_{\Pi})^2 = 0, \quad (1)$$

где  $\varphi$  – угол конусности входного участка вала, град;  $R_{\Pi}$  – радиус вала в точке пережима, мм:  $R_{\Pi} = D/2$ .

Для нахождения радиуса заготовки в поперечном сечении необходимо уравнение (1) представить в системе координат заготовки ( $X_z$ ,  $Y_z$ ,  $Z_z$ ). Взаимное расположение систем координат вала и заготовки приведено на рис. 4. Редуцирование трубной заготовки проходит в очаге деформации длиной  $l_d = 50$  мм (при получении заготовок цапф производства ОАО «Бобруйскагромаш»), ограниченном сечениями 1 и 2. На рисунке также показана плоскость  $X_3OZ_3$ , построенная на осях  $X_3$  и  $Z_3$ . Угол между проекцией оси вала (ось  $X_v$ ) на эту плоскость и осью  $X_3$  соответствует углу подачи  $\alpha$ , угол между осью вала (ось  $X_v$ ) и этой плоскостью – углу раскатки  $\beta$ . Угол  $\theta$  является углом уклона входного участка вала и связан с углами  $\varphi$  и  $\beta$  зависимостью:

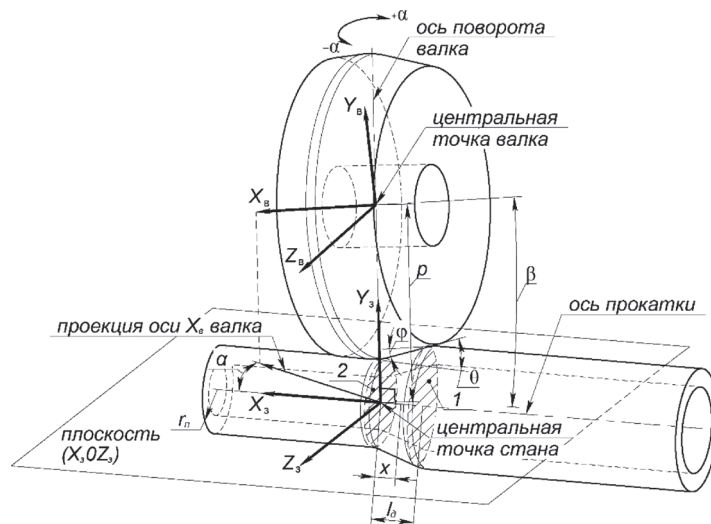


Рис. 4. Схема взаимного расположения систем координат вала и заготовки

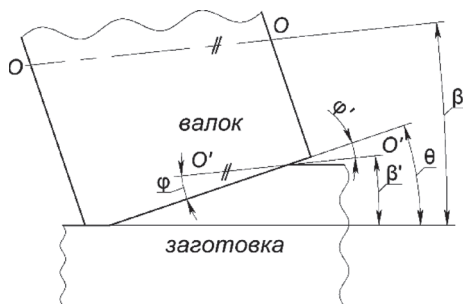


Рис. 5. Углы раскатки, уклона и конусности валка

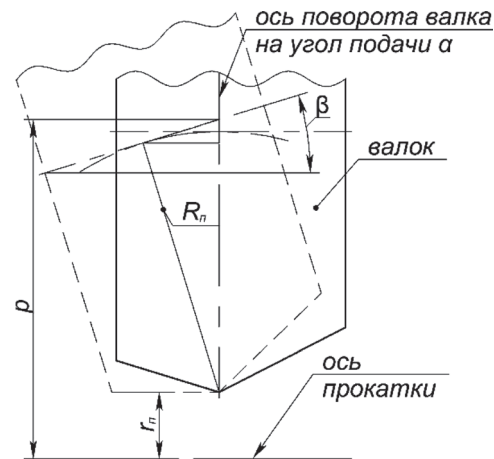


Рис. 6. Схема поворота валка на угол раскатки β

$$\theta = \varphi + \beta. \quad (2)$$

Уравнение (2) поясняется рис. 5:  $\beta = \beta'$  (так как ось  $OO$  параллельна линии  $O'O'$ ),  $\varphi = \varphi'$  (как вертикальные углы),  $\theta = \varphi' + \beta'$ , что с учетом равенств углов  $\beta, \beta'$  и  $\varphi, \varphi'$  приводит к выражению (2).

Величина  $p$  – расстояние между центральной точкой валка и плоскостью  $X_3OZ_3$ . Переход от системы координат  $X_3, Y_3, Z_3$  к системе координат  $X_B, Y_B, Z_B$  осуществляется следующим образом: перемещение вдоль оси  $Y_3$  на расстояние  $p$ , вращение системы координат вокруг оси  $Y_3$  на угол подачи  $\alpha$ , вращение вокруг оси  $Z_B$  на угол раскатки  $\beta$ . Операции вращения системы координат выполнены с применением матриц направляющих косинусов  $M_y$  и  $M_z$  для вращения вокруг осей  $Y_3$  и  $Z_B$  соответственно:

$$M_y = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$M_z = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 0 \\ -\sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Последовательные вращения системы координат осуществляются путем умножения матрицы  $M_z M_y$  на вектор координат в системе координат заготовки:

$$M_z M_y = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \sin \beta & \sin \alpha \cos \beta \\ -\cos \alpha \sin \beta & \cos \beta & -\sin \alpha \sin \beta \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix}. \quad (5)$$

После преобразований связь между координатами систем  $X_3, Y_3, Z_3$  и  $X_B, Y_B, Z_B$  выполняется по уравнению

$$\begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \sin \beta & \sin \alpha \cos \beta \\ -\cos \alpha \sin \beta & \cos \beta & -\sin \alpha \sin \beta \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_3 \\ Y_3 - p \\ Z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_3 \cos \alpha \cos \beta + Z_3 \cos \beta \sin \alpha + (Y_3 - p) \sin \beta \\ (Y_3 - p) \cos \beta - X_3 \cos \alpha \sin \beta - Z_3 \sin \alpha \sin \beta \\ Z_3 \cos \alpha - X_3 \sin \alpha \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Величина  $p$  в уравнении (6) определена согласно схеме, приведенной на рис. 6.

Значение  $p$  рассчитываем по уравнению:

$$p = R_{\text{п}} \cos \beta + r_{\text{п}} + \cos \left( \frac{\beta}{2} \right) R_{\text{п}} \sqrt{2(1 - \cos \beta)} \operatorname{tg} \beta, \quad (7)$$

где  $R_{\text{п}}, r_{\text{п}}$  – соответственно радиусы валка и заготовки в точке пережима.

Уравнение (1) конической поверхности валка в системе координат заготовки  $X_3, Y_3, Z_3$  с учетом уравнения (6) имеет вид:

$$(Z_3 \cos \alpha - X_3 \sin \alpha)^2 + ((Y_3 - p) \cos \beta - X_3 \cos \alpha \sin \beta - Z_3 \sin \alpha \sin \beta)^2 - (R_{\Pi} + (X_3 \cos \alpha \cos \beta + Z_3 \cos \beta \sin \alpha + (Y_3 - p) \sin \beta) \operatorname{tg} \varphi)^2 = 0. \quad (8)$$

Уравнение кривой, образующейся при пересечении поверхности валка, задаваемой уравнением (8), с плоскостью, нормальной оси  $X_3$  заготовки и проходящей через точку  $(x, 0, 0)$  (см. координату  $x$  на рис. 4), имеет следующий вид:

$$(Z_3 \cos \alpha - x \sin \alpha)^2 + ((Y_3 - p) \cos \beta - x \cos \alpha \sin \beta - Z_3 \sin \alpha \sin \beta)^2 - (R_{\Pi} + (x \cos \alpha \cos \beta + Z_3 \cos \beta \sin \alpha + (Y_3 - p) \sin \beta) \operatorname{tg} \varphi)^2 = 0. \quad (9)$$

Уравнение (9) представляет собой уравнение эллипса. На рис. 7 приведено поперечное сечение валка и заготовки. Раствор между поверхностью валка и осью заготовки в данном поперечном сечении, проходящем через точку  $(x, 0, 0)$ , определяется как радиус окружности, центр которой лежит на оси заготовки и которая касается эллипса в точке  $M(y, z)$  (рис. 7). Вследствие касания окружности и эллипса в точке  $M$  они имеют одинаковый наклон касательной (одинаковые значения производной).

Наклон касательной эллипса (производная уравнения (9)):

$$\frac{dY_3}{dZ_3} = \frac{Z_3 \cos^2 \alpha - x \cos \alpha \cos^2 \beta \sec^2 \varphi \sin \alpha - \sin \alpha (-Z_3 \sin \alpha \sin^2 \beta + (p - Y_3) \cos^2 \beta + \cos \beta \sec^2 \varphi (x \cos \alpha + Z_3 \sin \alpha) \sin \beta + Z_3 \cos^2 \beta \sin \alpha \operatorname{tg}^2 \varphi + \cos \beta ((Y_3 - p) \sec^2 \varphi \sin \beta + R_{\Pi} \operatorname{tg} \varphi) + \sin \beta \operatorname{tg} \varphi (R_{\Pi} - (p - Y_3) \sin \beta \operatorname{tg} \varphi))}{(p - Y_3) \cos^2 \beta + \cos \beta \sec^2 \varphi (x \cos \alpha + Z_3 \sin \alpha) \sin \beta + Z_3 \cos^2 \beta \sin \alpha \operatorname{tg}^2 \varphi + \cos \beta ((Y_3 - p) \sec^2 \varphi \sin \beta + R_{\Pi} \operatorname{tg} \varphi) + \sin \beta \operatorname{tg} \varphi (R_{\Pi} - (p - Y_3) \sin \beta \operatorname{tg} \varphi)}. \quad (10)$$

Окружность описывается уравнением (11), наклон касательной к окружности – уравнением (12):

$$Y_3^2 + Z_3^2 = r_0^2, \quad (11)$$

где  $r_0$  – радиус окружности в поперечном сечении, проходящем через точку  $(x, 0, 0)$ .

$$\frac{dY_3}{dZ_3} = -\frac{Z_3}{Y_3}. \quad (12)$$

Приравняв правые части уравнений (10) и (12), получаем уравнение с двумя неизвестными  $Y_3$  и  $Z_3$ , которые для каждого поперечного сечения, проходящего через точку  $(x, 0, 0)$ , являются координатами точки  $M$  касания эллипса и окружности (рис. 7):

$$\frac{Z_3 \cos^2 \alpha - x \cos \alpha \cos^2 \beta \sec^2 \varphi \sin \alpha - \sin \alpha (-Z_3 \sin \alpha \sin^2 \beta + (p - Y_3) \cos^2 \beta + \cos \beta \sec^2 \varphi (x \cos \alpha + Z_3 \sin \alpha) \sin \beta + Z_3 \cos^2 \beta \sin \alpha \operatorname{tg}^2 \varphi + \cos \beta ((Y_3 - p) \sec^2 \varphi \sin \beta + R_{\Pi} \operatorname{tg} \varphi) + \sin \beta \operatorname{tg} \varphi (R_{\Pi} - (p - Y_3) \sin \beta \operatorname{tg} \varphi))}{(p - Y_3) \cos^2 \beta + \cos \beta \sec^2 \varphi (x \cos \alpha + Z_3 \sin \alpha) \sin \beta + Z_3 \cos^2 \beta \sin \alpha \operatorname{tg}^2 \varphi + \cos \beta ((Y_3 - p) \sec^2 \varphi \sin \beta + R_{\Pi} \operatorname{tg} \varphi) + \sin \beta \operatorname{tg} \varphi (R_{\Pi} - (p - Y_3) \sin \beta \operatorname{tg} \varphi)} = -\frac{Z_3}{Y_3}. \quad (13)$$

Решая систему из уравнений (9) и (13) численным способом, получаем координаты точки  $M(y \text{ и } z)$ ,

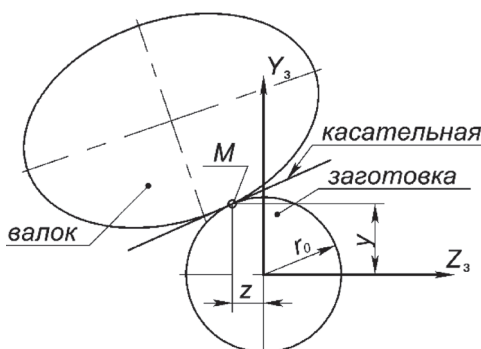


Рис. 7. Разрез очага деформации плоскостью, нормальной оси заготовки

определяющие положение указанной точки в каждом поперечном сечении. Результаты расчета при  $\beta = 6^\circ$ ,  $\varphi = 12,78^\circ$ ,  $R_{\Pi} = 150$  мм представлены на рис. 9. Угол конусности  $\varphi$  выбран согласно техническим требованиям на редуцированную заготовку ОАО «Бобруйскагроماش» (рис. 8, уравнение (2)).

Из рис. 8  $\theta = \arctg((60,5 - 43,5)/50) = 18,78^\circ$ . Из уравнения (2)  $\varphi = 18,78 - 6 = 12,78^\circ$ .

Характер увеличения радиуса заготовки при изменении угла подачи  $\alpha$  имеет вид параболы и для поперечных сечений, проходящих через точки  $(-50, 0, 0)$ ,  $(-25, 0, 0)$  и  $(0, 0, 0)$ , приведен на рис. 9.

Согласно техническим требованиям на редуцированную заготовку (см. рис. 8) в сечении  $x = -50$  мм, радиус заготовки дол-

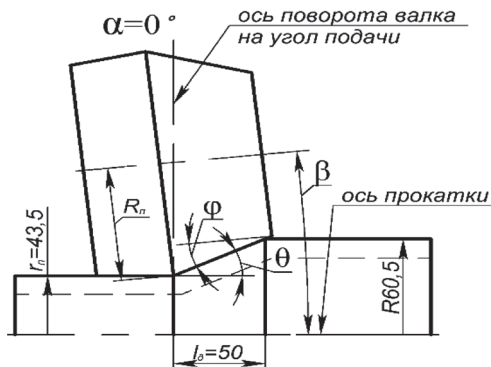


Рис. 8. Схема редуцирования

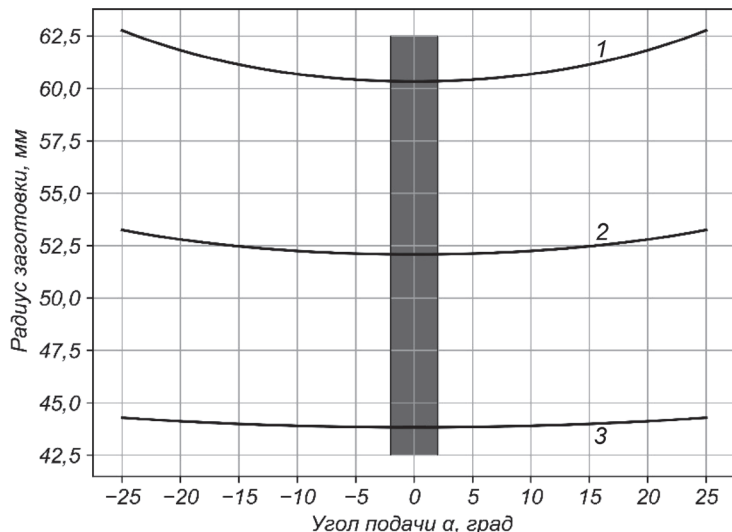


Рис. 9. Характер изменения радиуса заготовки в различных поперечных сечениях  $x$ : 1 –  $x = 50$  мм; 2 – 25; 3 –  $x = 0$

жен составлять 60,5 мм (радиус исходной трубной заготовки), из рис. 9 радиус заготовки достигает 62,7 мм при  $\alpha = \pm 25^\circ$  (отклонение радиуса  $\Delta r = 2,2$  мм). При малых углах подачи отклонение радиуса незначительно. Данный факт позволяет использовать изменение угла подачи в область отрицательных значений (см. рис. 4) в процессе редуцирования для калибровки конусной переходной части между необжатой и обжатой частями редуцированной заготовки и последующего ее вывода из межвалкового зазора посредством реверсирования осевого движения заготовки.

Для проведения калибровки необходимо, чтобы заготовка совершила не менее одного оборота в области малых углов подачи. Введен угол  $\alpha_{\text{крит}}$  – угол подачи, в пределах которого проводится калибровка, т. е. при калибровке  $-\alpha_{\text{крит}} \leq \alpha \leq \alpha_{\text{крит}}$ . Выбран  $\alpha_{\text{крит}} = 2^\circ$  (данный угол выбирается в зависимости от необходимой геометрической точности конусного участка).

Скорость вращения заготовки определяется тангенциальной составляющей скорости на бочке вала (см. рис. 2) и составляет:

$$n_3 = \frac{D_c}{d_c} n_b \cos(\alpha_{\text{нач}} - V_{\text{п}} t), \quad (14)$$

где  $n_3$  – скорость вращения заготовки, об/мин;  $D_c$ ,  $d_c$  – соответственно средние скорости в очаге деформации вала и заготовки, мм ( $D_c = 283$  мм,  $d_c = 104$  мм при изготовлении заготовок ОАО «Бобруйскагро-маш» на рис. 8);  $n_b$  – скорость вращения вала, об/мин ( $n_b = 20$ );  $\alpha_{\text{нач}}$  – угол подачи, при котором проходит редуцирование, град ( $\alpha_{\text{нач}} = 5$ );  $V_{\text{п}}$  – скорость изменения угла подачи  $\alpha$ , град/с ( $V_{\text{п}} = 3$ );  $t$  – переменная времени, с ( $t = 0$  в момент начала изменения угла подачи  $\alpha$ ).

При уменьшении угла подачи значение  $\alpha_{\text{крит}}$  достигается в момент времени  $t = (\alpha_{\text{нач}} - \alpha_{\text{крит}})/V_{\text{п}}$ , значение  $-\alpha_{\text{крит}}$  – при  $t = (\alpha_{\text{нач}} + \alpha_{\text{крит}})/V_{\text{п}}$  (решения уравнения  $\alpha_{\text{нач}} - V_{\text{п}} t = \pm \alpha_{\text{крит}}$ ).

Количество оборотов  $n_k$ , совершаемых заготовкой при реверсивной калибровке, определяем по уравнению:

$$\int_0^{n_k} dn = \int_{\frac{\alpha_{\text{нач}} - \alpha_{\text{крит}}}{V_{\text{п}}}}^{\frac{\alpha_{\text{нач}} + \alpha_{\text{крит}}}{V_{\text{п}}}} \frac{D_c n_b}{60 d_c} \cos(\alpha_{\text{нач}} - V_{\text{п}} t) dt. \quad (15)$$

После интегрирования получим

$$n_k = \frac{D_c n_b}{d_c \pi} \frac{6 \sin \alpha_{\text{крит}}}{V_{\text{п}}}. \quad (16)$$

На рис. 10 приведена зависимость количества оборотов, которые совершает заготовка в области калибровки, от скорости вращения валков при различных скоростях изменения угла подачи  $\alpha$ .

Согласно результатам расчета, минимальная скорость вращения валков, при которой возможно проведение калибровки (количество оборотов заготовки  $n_k \geq 1$ ), составляет  $n_b \approx 16,5$  об/мин при следующих

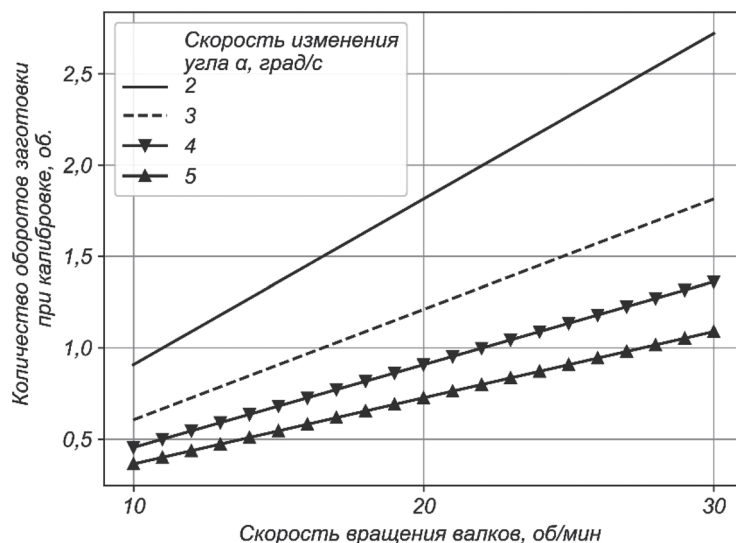


Рис. 10. Количество оборотов заготовки при калибровке

значениях технологических параметров:  $D_c = 283$  мм,  $d_c = 104$  мм,  $V_{\pi} = 3$  град/с,  $\alpha_{\text{крит}} = 2^\circ$ ; при  $n_v = 20$  об/мин значение  $n_k$ , согласно уравнению (16) и рис. 10, составляет 1,2 об.

### Выводы

1. Предложена технология получения ступенчатых трубных заготовок, включающая поперечно-винтовое редуцирование с реверсивной калибровкой. Технология позволяет проводить обработку широкой номенклатуры заготовок (различные длины, диаметры, толщины стенок).
2. Вычислено изменение геометрии заготовки при изменении угла подачи. Показано, что при малых углах подачи изменение геометрии незначительно, что позволяет использовать это для проведения реверсивной калибровки и вывода заготовки из межвалкового зазора.
3. Получена зависимость, связывающая количество оборотов, совершаемых заготовкой в области калибровки, с основными технологическими параметрами процесса обработки (скорость вращения валков, скорость изменения угла подачи, размеры заготовки и валка в очаге деформации, а также значения угла  $\alpha_{\text{крит}}$  определяющего геометрическую точность заготовки).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Клубович В. В. Технологии изготовления и обработки специальных периодических профилей / В. В. Клубович, В. А. Тамила. Минск: БНТУ, 2007. 298 с.
2. Карамышев А. П. Определение усилия обжатия заготовок на радиально-ковочной машине AVS / А. П. Карамышев, И. И. Некрасов, В. С. Паршин, В. А. Сыстеров // Металлург. 2009. № 3. С. 61–64.
3. Allwood J. M. A survey of flexible forming processes in Japan / J. M. Allwood, H. Utsunomiya // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2006. No. 46. P. 1939–1960.
4. Чумадин А. С. Исследование процесса обжима тонкостенных труб / А. С. Чумадин, А. А. Шишкин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2012. № 11. С. 14–18.
5. Барабашкин В. П. Производство труб на агрегатах с трехвалковым раскатным станом / В. П. Барабашкин, И. К. Тартаковский. М.: Металлургия, 1981. 148 с.

### REFERENCES

1. Klubovich V. V., Tamila V. A. *Tekhnologii izgotovleniya i obrabotki special'nyh periodicheskikh profilej* [Technologies for manufacturing and processing of special periodic profiles]. Minsk, BNTU Publ., 2007, 298 p.
2. Karamyshev A. P., Nekrasov I. I., Parshin V. S., Systеров V. A. *Opreделение usiliya obzhatija zagotovok na radial'no-kovochnoj mashine AVS* [Determination of the compression force of workpieces on a radial forging machine AVS]. *Metallurg = Metallurgist*, 2009, no. 3, pp. 61–64.
3. Allwood J. M., Utsunomiya H. A survey of flexible forming processes in Japan, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006, no. 46, pp. 1939–1960. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2006.01.034.
4. Chumadin A. S., Shishkin A. A. *Issledovanie processa obzhima tonkostennykh trub* [Study of the process of reduction thin-walled tubes]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem = Forging and stamping production. Metal forming*, 2012, no. 11, pp. 14–18.
5. Barabashkin V. P., Tartakovskij I. K. *Proizvodstvo trub na agregatah s trehvalkovym raskatnym stanom* [Production of tubes on a three-roll rolling mill], Moscow, Metallurgija Publ., 1981, 148 p.