

УДК 621.771.27

*д.т.н. Снитко С. А.*  
*(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР, snitko\_sa@mail.ru),*  
*Денищенко Н. П.*  
*(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, nd76696@gmail.ru),*  
*д.т.н. Яковченко А. В.*  
*(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР, mond1991@mail.ru),*  
*к.т.н. Денищенко П.Н.*  
*(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, pavel.denischenko@gmail.com)*

## РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОКАТКИ КРУГЛЫХ ПРОФИЛЕЙ

*Разработана усовершенствованная калибровка для прокатки круга диаметром 120 мм на стане «600», которая обеспечивает улучшение устойчивости специального овального раската, полученного в овальном калибре с выпуклым дном, и одновременное его обжатие по дну и боковым стенкам ручьев круглого калибра в момент захвата. На базе конечно-элементного моделирования установлено, что в этом случае во всём объёме очага деформации имеют место сжимающие нормальные напряжения, действующие по вертикальной оси. Также исключаются опасные для сплошности металла соответствующие растягивающие нормальные напряжения.*

**Ключевые слова:** *прокатка круглых профилей; калибровка предчистового овального калибра с выпуклым дном; конечно-элементное моделирование процесса прокатки; самоцентрировка овального раската в круглом калибре; нормальные напряжения, действующие в очаге деформации.*

Повышение качества круглых профилей, получаемых прокаткой, является актуальной задачей. Её решение рассмотрено в работах [1–6] и др. На практике для прокатки круглых профилей широко применяется система калибров «овал — круг». Известно, что недостатком однорадиусного овала в системе калибров «овал — круг» является плохая устойчивость раската в круглом калибре. Даже в случае применения пропусков незначительная «свобода» раската приводит к его «сваливанию», что снижает точность размеров круглых профилей и способствует образованию дефектов.

Двухрадиусный овал позволяет обеспечить более интенсивную деформацию и устойчивость полосы, а также более чистую поверхность готового проката. Однако необходимо отметить, что здесь на базе двух дуг окружностей выполняют не только боковые контуры ручья овального калибра, но и его дно. Указанные боковые контуры ручья овального калибра формируют на овальном раскате участки, которые в следующем проходе обжимаются

как дном, так и боковыми стенкам ручьев круглого калибра. В момент захвата овальный раскат, в зависимости от предусмотренной вытяжки, контактирует с круглым калибром на определенном расстоянии от плоскости выхода металла из очага деформации. Соответственно, вертикальная плоскость, параллельная плоскости выхода металла из очага деформации, проведенная на указанном расстоянии, пересекает поверхность вала в зоне калибра по сложной кривой. Поэтому выполнить контур овального калибра двумя радиусами, причем таким образом, чтобы соответствующий овальный раскат в момент захвата в круглом калибре обеспечил одновременный контакт по дну и боковым стенкам ручьев круглого калибра, не представляется возможным.

Значения радиусов овальных двухрадиусных калибров на практике определяют на базе эмпирических данных. Поэтому в момент захвата не обеспечивается одновременный по периметру круглого калибра контакт с поверхностью овального раската,

и при незначительном отклонении оси овала от оси калибра возникает крутящий момент в очаге деформации, что снижает устойчивость раската в калибре и приводит к снижению точности размеров и способствует образованию дефектов. Наряду с этим отсутствие в момент захвата одновременного контакта и одновременного обжатия металла по дну и боковым стенкам ручьев круглого калибра не создает условий для возникновения во всем объеме очага деформации сжимающих нормальных напряжений, действующих по вертикальной оси. Это способствует образованию опасных для сплошности металла зон, в которых действуют соответствующие растягивающие нормальные напряжения.

Поставлена задача повышения качества круглых профилей за счет повышения точности их размеров путем улучшения устойчивости овального раската, который в мо-

мент захвата одновременно контактирует с дном и боковыми стенками ручьев круглого калибра, и исключения во всем объеме очага деформации опасных для сплошности металла растягивающих нормальных напряжений, действующих по вертикальной оси.

Овальный калибр выполнен симметрично относительно его горизонтальной и вертикальной осей, соответственно, на рисунке 1 рассмотрена одна его четвертая часть. Здесь имеется три участка. Первый участок обжимается дном круглого калибра. Второй участок обжимается боковой стенкой ручья круглого калибра. Граница этих участков на рисунке 1 имеет координаты  $(z_1, y_1)$ . Третий участок, который лежит справа от точки с координатами  $(z_2, y_2)$ , сформирован дном овального калибра и при прокатке в круглом калибре перемещается в уширение.

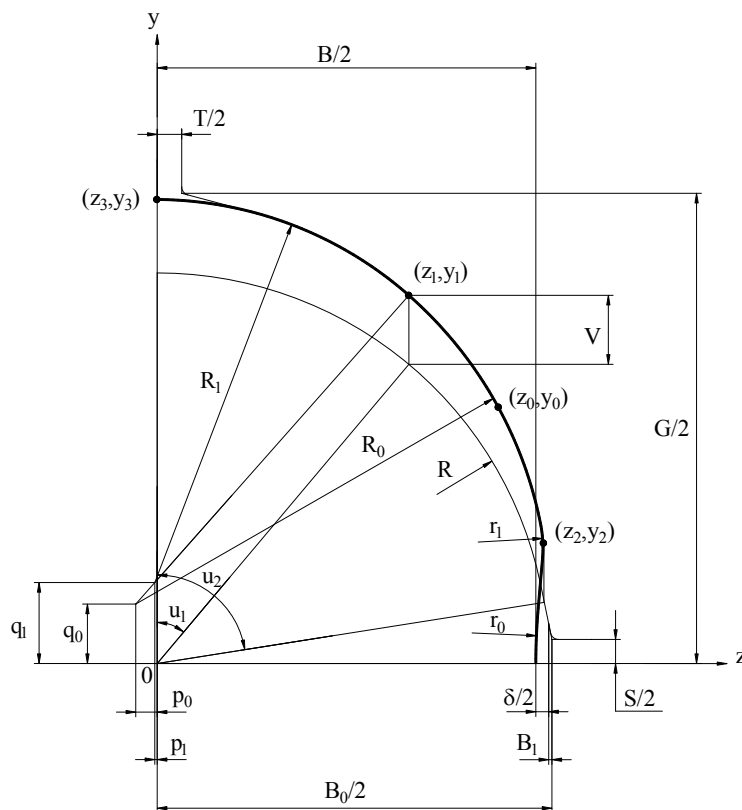


Рисунок 1 Совмещенное построение контуров круглого и овального (с выпуклым дном) калибров и соответствующих раскатов в плоскости  $yoz$

Найдём поверхность вращения (относительно оси валка, имеющего диаметр  $D$ ) дуги окружности  $l$  (рис. 2), имеющей радиус  $R$ , с центром в точке  $(z_u = 0, y_u = \frac{D}{2} - h + R)$ , которая описывает контур ручья круглого калибра.

На рисунке 2 показано положение сечения поверхности круглого калибра после указанной замены переменных.

Из уравнения окружности  $(z - z_u)^2 + (y - y_u)^2 = R^2$  находим уравнение дуги  $l$  (рис. 2):

$$y = y_u - \sqrt{R^2 - (z - z_u)^2}. \quad (1)$$

Чтобы получить уравнение поверхности, образованной вращением дуги  $l$  вокруг оси валка, нужно в уравнение (1) вместо  $y$  подставить выражение для радиуса вращения  $R_{gp}$  произвольной точки кривой, которое имеет вид

$$R_{gp} = \sqrt{X^2 + Y^2}. \quad (2)$$

В результате этой подстановки получим

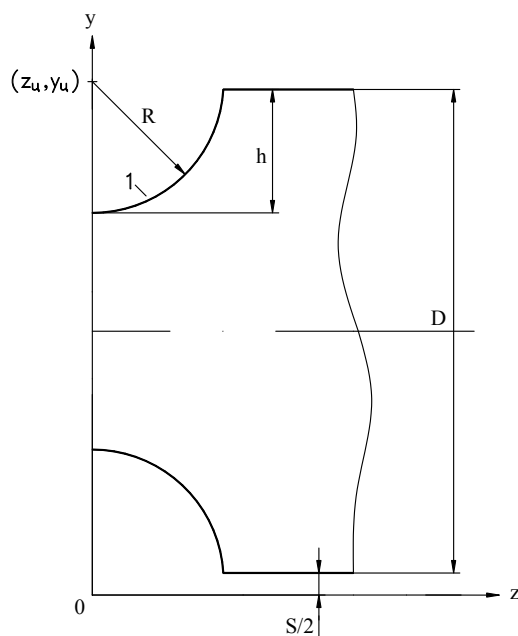
$$\sqrt{X^2 + Y^2} = y_u - \sqrt{R^2 - (Z - z_u)^2}, \quad (3)$$

где  $X, Y, Z$  — координаты точки на поверхности вращения дуги  $l$ .

Возведя обе части уравнения (3) в квадрат и выполнив замену переменных  $Y^* = Y + \frac{D}{2} + \frac{S}{2}$ , получим известное уравнение поверхности вращения дуги  $l$  (рис. 2):

$$\left. \begin{aligned} X^2 + \left( Y^* - \frac{D}{2} - \frac{S}{2} \right)^2 - \\ - y_u^2 + 2y_u \sqrt{R^2 - (Z - z_u)^2} - \\ - R^2 + (Z - z_u)^2 = 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Рассмотрим последовательность проектирования овального калибра. На основе выражения (4) определим радиусы  $R_0$  и  $R_1$  дуг окружностей (рис. 1), которые образовали боковые контуры каждого ручья овального калибра.



1 — дуга окружности радиуса  $R$  с центром в точке  $(z_u, y_u)$ , которая описывает контур ручья круглого калибра

Рисунок 2 Контур сечения валка в плоскости  $yoz$

Для этого необходимо выполнить расчет координат точек контура сечения поверхности вала в зоне круглого калибра (рис. 2) плоскостью  $yoz$ , которая расположена на расстоянии  $L$  от плоскости выхода раската из очага деформации ( $L$  — длина очага деформации) (рис. 3).

Если рассмотренный контур сечения поверхности вала в зоне круглого калибра будет также и контуром овального раската (и, соответственно, овального калибра) при  $0 \leq z \leq z_2$ , то это и обеспечит одновременный контакт соответствующего овального раската с круглым калибром в первый момент касания и выполнение условия  $L = \text{const}$  в указанном диапазоне по его ширине при установившемся процессе прокатки.

Из рисунка 1 видно, что  $z_3 = 0$ , а  $z_1 = R \cdot \sin\left(\frac{\pi}{180} \cdot u_1\right)$ , где  $u_1$  — угол, разделяющий контуры донной и боковой частей ручья круглого калибра.

Максимальное значение  $z_2 = z_k$  (формула для расчёта  $z_k$  определена в работе [5]), тогда угол  $u_2$ , соответствующий контуру ручья круглого калибра, включающему его донную и боковую части, равен

$$u_2 = u_{2\max} = \frac{180}{\pi} \cdot \arcsin\left(\frac{z_k}{R}\right). \quad (5)$$

Если  $z_2 < z_k$ , тогда

$$u_2 = \frac{180}{\pi} \cdot \arcsin\left(\frac{z_2}{R}\right). \quad (6)$$

Выражение для координаты  $y_1$  (рис. 1) имеет вид

$$y_1 = \left(\frac{S}{2} + h - R\right) + \sqrt{R^2 - z_1^2} + V, \quad (7)$$

где  $V$  — обжатие металла в ручье круглого калибра в точке, соответствующей углу  $u_1$ .

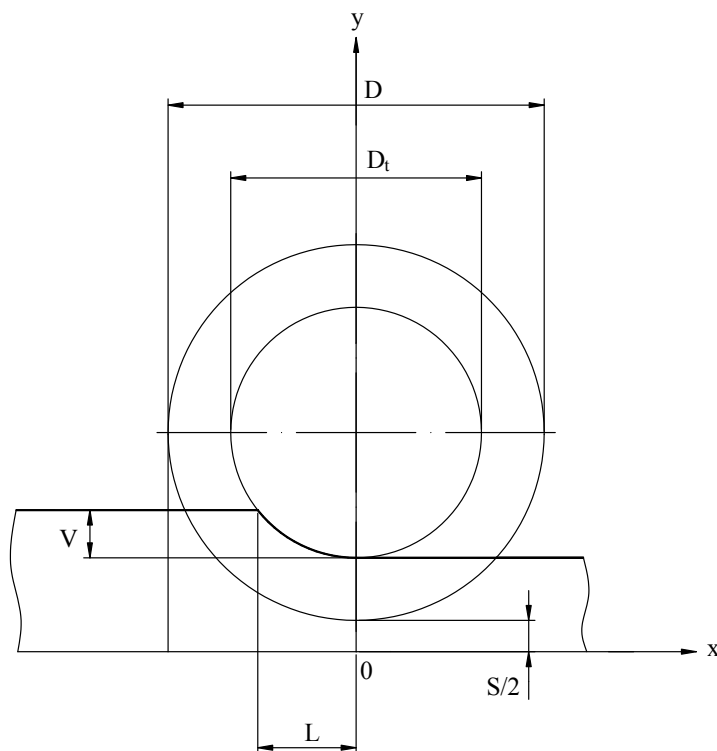


Рисунок 3 Сечение вала в зоне круглого калибра и овального раската в плоскости  $yoz$  (сечение выполнено при  $z = z_1$  (рис. 1),  $D_t = D + S - 2Y_t$ )

Значения  $V$  и  $u_1$  определяют координаты точки  $(z_1, y_1)$  на боковом контуре ручья овального калибра, в которой сопряжены дуги окружностей с радиусами  $R_0$  и  $R_1$ . Значение  $V$  определяется из условия равенства вытяжки  $\mu = S_z/S_k$  (при прокатке овального раската в круглом калибре) её заданному по эмпирическим данным значению.

При значениях координат точки контакта  $(z_1, y_1)$  соответствующая координата  $x_1$ , равная длине очага деформации  $L$ , определяется из уравнения (4) и имеет известный вид:

$$L = \sqrt{-\left(y_1 - \frac{D}{2} - \frac{S}{2}\right)^2 + y_u^2 - 2y_u\sqrt{R^2 - (z_1 - z_u)^2} + R^2 - (z_1 - z_u)^2} \quad (8)$$

При значениях координат  $x_1=L$  и  $z_2$  из уравнения (4) определяется координата  $y_2$ :

$$y_2 = \frac{S}{2} + \frac{D}{2} - \sqrt{-L^2 + y_u^2 - 2y_u\sqrt{R^2 - (z_2 - z_u)^2} + R^2 - (z_2 - z_u)^2} \quad (9)$$

Аналогично, при значениях координат  $x_1=L$  и  $z_3$ , из уравнения (4) определяется координата  $y_3$ :

$$y_3 = \frac{S}{2} + \frac{D}{2} - \sqrt{-L^2 + y_u^2 - 2y_u\sqrt{R^2 - (z_3 - z_u)^2} + R^2 - (z_3 - z_u)^2} \quad (10)$$

Аналогично, при значениях координат  $x_1=L$  и  $z_0$ , из уравнения (4) определяется координата  $y_0$ :

$$y_0 = \frac{S}{2} + \frac{D}{2} - \sqrt{-L^2 + y_u^2 - 2y_u\sqrt{R^2 - (z_0 - z_u)^2} + R^2 - (z_0 - z_u)^2} \quad (11)$$

Затем, используя уравнение поверхности вращения (4), при  $x_1=L$  в диапазоне  $0 \leq z \leq z_2$  определяется (с шагом  $\Delta z$ ) массив точек контура сечения круглого калибра  $y = f(z)$ .

Для практического использования результатов необходимо контур  $y = f(z)$ , состоящий из множества точек, аппроксимировать двумя дугами с радиусами  $R_0$  и  $R_1$  (рис. 1). Контур  $y = f(z)$ , который определен найденным выше массивом точек, на завершающем этапе используется для оценки точности указанной аппроксимации.

Радиус  $R_0$  и соответствующие координаты центра дуги  $(p_0, q_0)$  находим из условия прохождения ее через три точки с координатами  $(z_0, y_0)$ ,  $(z_1, y_1)$ ,  $(z_2, y_2)$ . Подставив координаты каждой из указанных точек в уравнение поверхности вращения (4), получаем систему 3-х уравнений для определения искомых величин.

Радиус  $R_1$  и соответствующие координаты центра дуги  $(p_1, q_1)$  находим из условия прохождения ее через две точки с координатами  $(z_3, y_3)$ ,  $(z_1, y_1)$ , а также условия общей касательной в точке  $(z_1, y_1)$  для дуг с радиусами  $R_0$  и  $R_1$ . То есть также получаем систему 3-х уравнений для определения искомых величин. Решая эти системы уравнений, получаем следующие формулы:

$$\begin{aligned} R_0 &= \sqrt{(z_2 - p_0)^2 + (y_2 - q_0)^2}, \\ R_1 &= \sqrt{(z_1 - p_1)^2 + (y_1 - q_1)^2}, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $z_2$  — заданная по эмпирическим данным ширина контакта овального раската с круглым калибром в момент захвата.

$$\begin{aligned}
 p_0 &= \frac{(w_1 \cdot v_2 - w_2 \cdot v_1)}{(g_1 \cdot v_2 - g_2 \cdot v_1)}, \\
 q_0 &= \frac{(w_1 \cdot g_2 - w_2 \cdot g_1)}{(g_2 \cdot v_1 - g_1 \cdot v_2)}, \\
 g_1 &= 2 \cdot (z_2 - z_1), \\
 v_1 &= 2 \cdot (y_2 - y_1), \\
 w_1 &= z_2^2 + y_2^2 - z_1^2 - y_1^2, \\
 g_2 &= 2 \cdot (z_2 - z_0), \\
 v_2 &= 2 \cdot (y_2 - y_0), \\
 w_2 &= z_2^2 + y_2^2 - z_0^2 - y_0^2, \\
 p_1 &= \frac{-E - 2(y_1 - y_3)(y_1 - z_1 \cdot F)}{2(z_1 - z_3) + 2(y_1 - y_3) \cdot F}, \\
 q_1 &= (y_1 - z_1 \cdot F) + p_1 \cdot F, \\
 E &= (z_3^2 - z_1^2) + (y_3^2 - y_1^2), \\
 F &= \frac{y_1 - q_0}{z_1 - p_0}.
 \end{aligned} \quad (13)$$

Проектируемый овальный калибр (рис. 1) образован двумя ручьями в прокатных валах и разъемом между ними. Боковые контуры каждого ручья овального калибра, расположенные между его разъемом (зазором), равным  $T$ , и дном, выполнены двумя сопряженными в точке с координатами  $(z_1, y_1)$  дугами окружностей с радиусами  $R_0$  и  $R_1$ . Одна часть бокового контура ручья овального калибра, расположенная между его разъемом и точкой с координатами  $(z_1, y_1)$ , выполнена дугой окружности с радиусом  $R_1$ . Другая часть бокового контура ручья овального калибра, расположенная между точками с координатами  $(z_1, y_1)$  и  $(z_2, y_2)$ , выполнена дугой окружности с радиусом  $R_0$ .

Дно овального калибра расположено между точками с координатами  $(z_2, y_2)$  и  $(z = B/2, y = 0)$ . Дно ручья овального калибра проектируется по эмпирическим данным. У овального калибра с вогнутым дном (рис. 1) контуры бокового участка и дна могут сопрягаться дугой окружности с радиусом  $r_1$ . Также в его контуре может быть предусмотрена дуга окружности с радиусом  $r_0$ , имеющая координаты центра  $(z = B/2 - r_0, y = 0)$ . Дуги окружностей с радиусами  $r_1$  и  $r_0$  могут быть сопряженными между собой или могут быть сопряженными отрезком прямой линии.

Высота овального калибра  $G$  (рис. 1) зависит от его выпуска, который задается по эмпирическим данным. Если овальный калибр проектируется без выпуска, то его высота равна  $G = 2y_3$ .

Ширина овального калибра  $B$  (рис. 1) (соответственно, и ширина овального раската) задается по эмпирическим данным с учетом величины уширения металла  $\delta$  при прокатке в круглом калибре. При этом незаполнение круглого калибра равно  $B_1$  (рис. 1).

В зависимости от диаметра круглого профиля, ширины бокового участка овального калибра, определяемой координатой  $z_2$ , уширения металла  $\delta$  и заданной вытяжки в круглом калибре  $\mu$  овальный калибр может быть спроектирован с вогнутым, плоским или выпуклым дном.

Учет заданной вытяжки выполняется путем реализации нескольких итерационных циклов расчетов. Так, если вытяжка  $\mu = S_z/S_k$  (соответствующая контуру овального калибра, полученному после первого цикла расчетов) окажется, например, меньше заданной величины, то значение величины  $V$  (рис. 1, 3), входящей в формулу (7), увеличивается с некоторым шагом, если больше, то уменьшается. При переходе от увеличения к уменьшению и наоборот шаг делится пополам (то есть используется метод половинного деления). С

учетом измененных значений  $V$  каждый раз проектируется скорректированный контур овального калибра. В итоге находятся значения:  $V$  и, соответственно,  $L$ , а также радиусы  $R_0$  и  $R_1$ , при которых площадь сечения овального подката соответствует заданной вытяжке с требуемой точностью.

На основе разработанных математических формул создана компьютерная программа, окно которой показано на рисунке 4. Чертежи круглого и овального (с выпуклым дном) калибров (и соответствующих раскатов) для прокатки круга диаметром 120 мм на стане «600» показаны на рисунке 5.

Реализация моделирования процесса прокатки специального овального раската, полученного в овальном калибре с выпуклым дном (рис. 1), выполнена в системе Deform-3D. Результаты моделирования показаны на рисунках 6–11. Адаптация метода конечно-элементного моделирования применительно к решению такого рода задач выполнена в работе [7]. Методика исследований изложена в работах [6, 7]. В работе [6] также выполнено конечно-элементное моделирова-

ние процесса прокатки специального овального раската, полученного в овальном калибре с вогнутым дном. Результаты здесь использованы для сравнительного анализа выявленных закономерностей напряженно-деформированного состояния металла в рассмотренных очагах деформации.

Результаты конечно-элементного моделирования процесса самоцентрировки овала специальной формы, имеющего наклон на угол  $5^\circ$ , при его прокатке в круглом калибре представлены на рисунке 7.

На рисунке 7,а показан первый момент контакта овала, который наклонен на угол  $5^\circ$ , с круглым калибром. Значения радиусов овала  $R_0$  и  $R_1$ , показанные на рисунках 1, 4, 5, определены на базе математической модели (12) и специализированной компьютерной программы (рис. 4) и обеспечивают одновременный контакт овального раската специальной формы с круглым калибром в первый момент касания и, соответственно, одинаковую длину очага деформации, равную 71,585 мм (рис. 4), по всей его ширине в процессе прокатки.

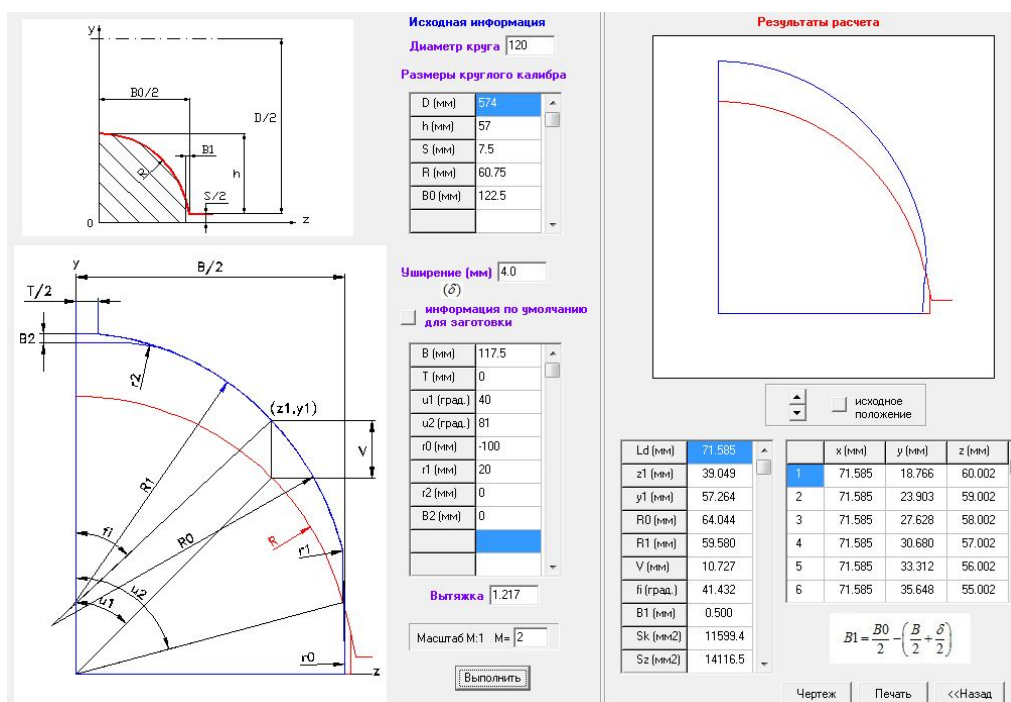


Рисунок 4 Окно программы проектирования калибровок валков для прокатки круглых профилей по системе калибров «овал — круг»

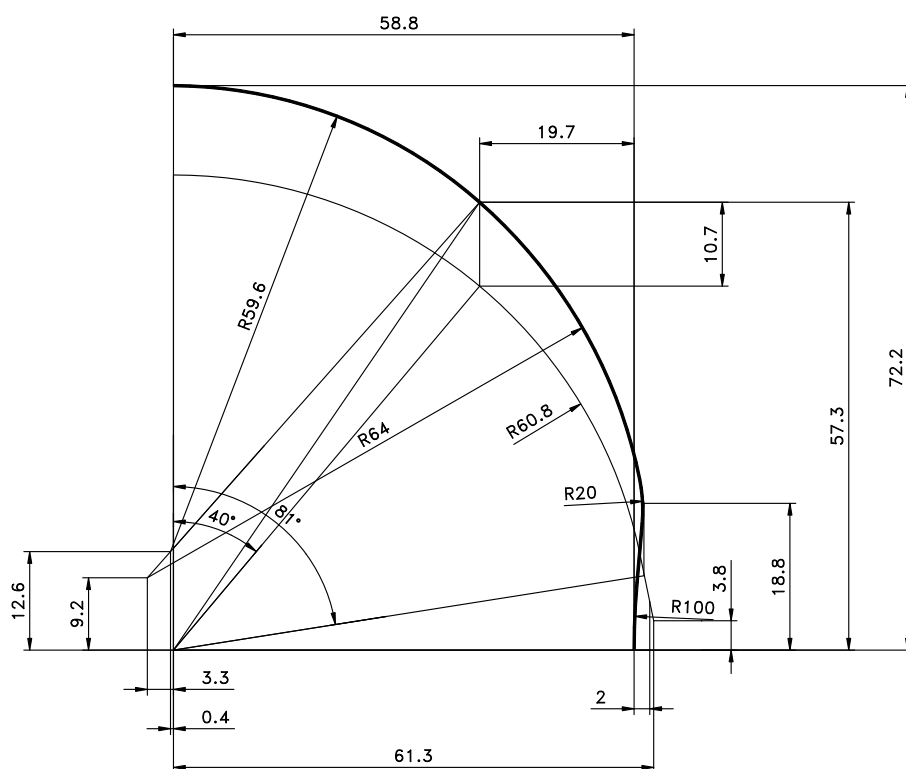


Рисунок 5 Чертеж специального овального раската, совмещенного с калибром прокатки круглого профиля диаметром 120 мм на крупносортом стане «600»

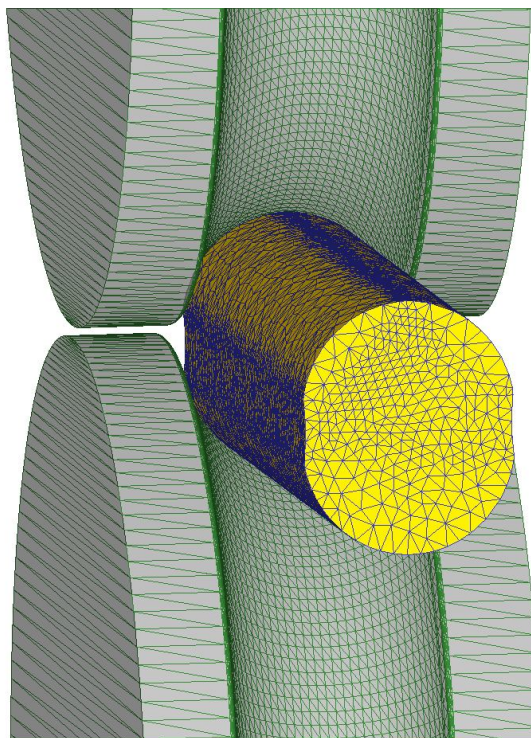
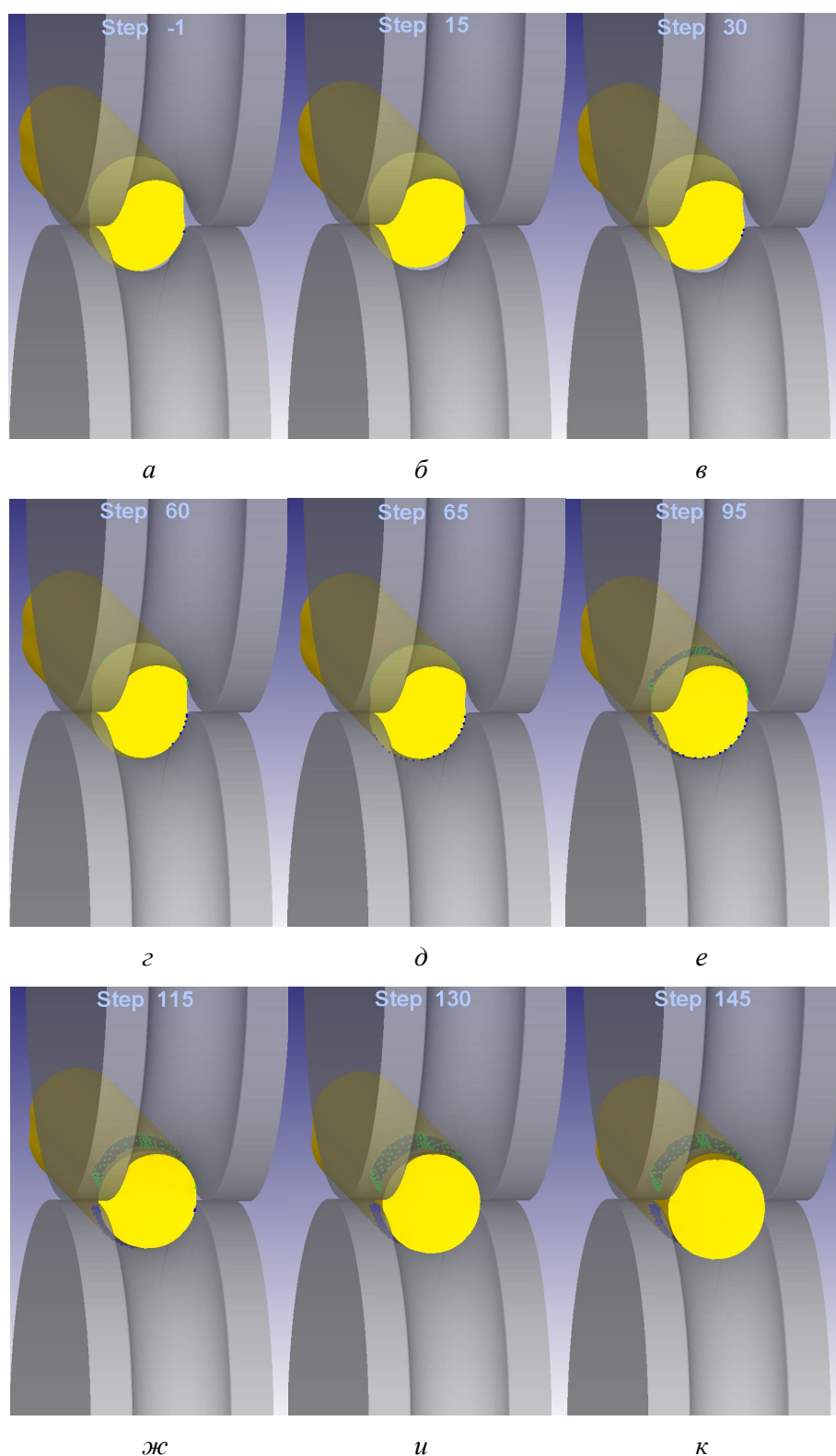


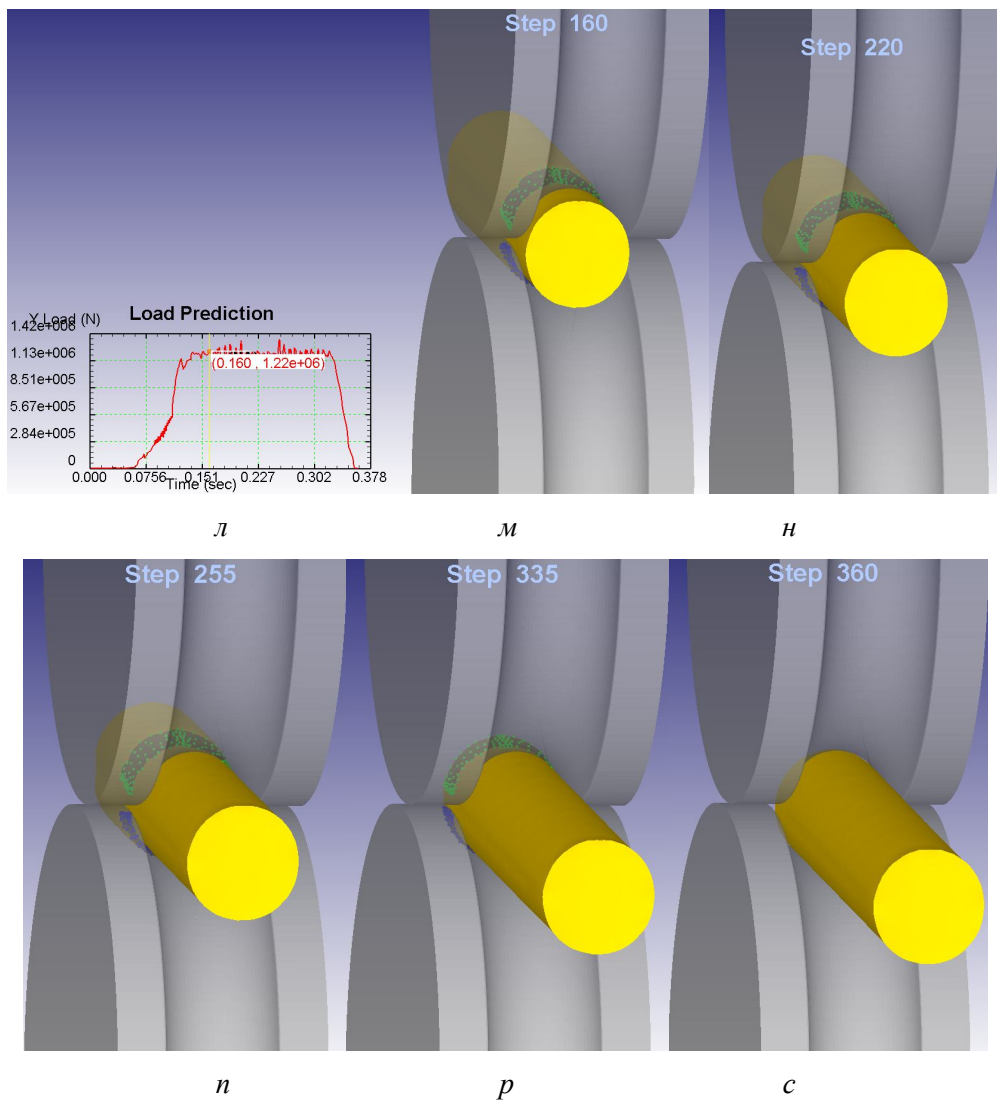
Рисунок 6 Визуализация сетки конечных элементов при задаче раската, полученного в овальном калибре с выпуклым дном, в круглый калибр в процессе прокатки круга диаметром 120 мм на стане «600»





а–г — самоцентрировка овала специальной формы, имеющего наклон на угол  $5^\circ$ , в круглом калибре;  
д–ж — заполнение очага деформации; и–к — образование внешней зоны на выходе из очага деформации

Рисунок 7 Результаты конечно-элементного моделирования процесса прокатки



л — график силы прокатки; м–с — завершающий этап моделирования процесса прокатки круга диаметром 120 мм на стане «600»

Продолжение рисунка 7

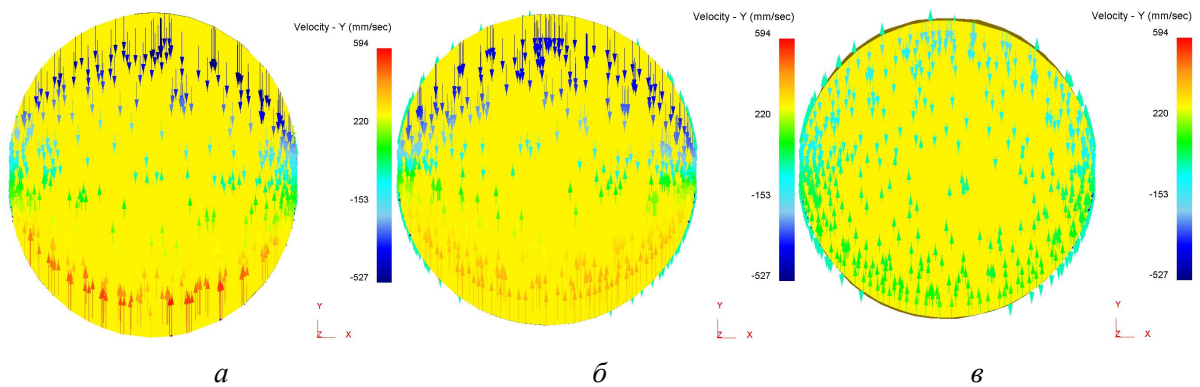


Рисунок 8 Распределение векторов скорости по вертикальной оси:  
а — при захвате; б — в средней части очага деформации; в — на выходе из очага деформации

**МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

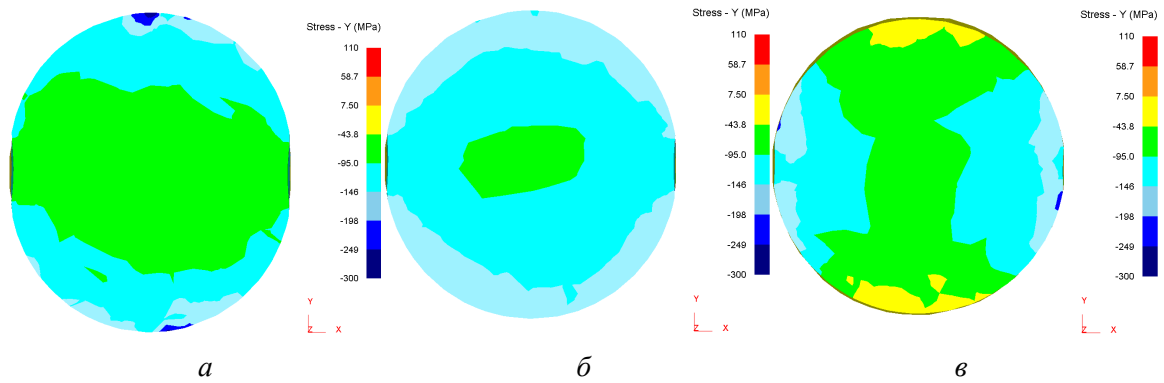


Рисунок 9 Распределение нормальных напряжений по вертикальной оси:  
 а — при захвате; б — в средней части очага деформации; в — на выходе из очага деформации

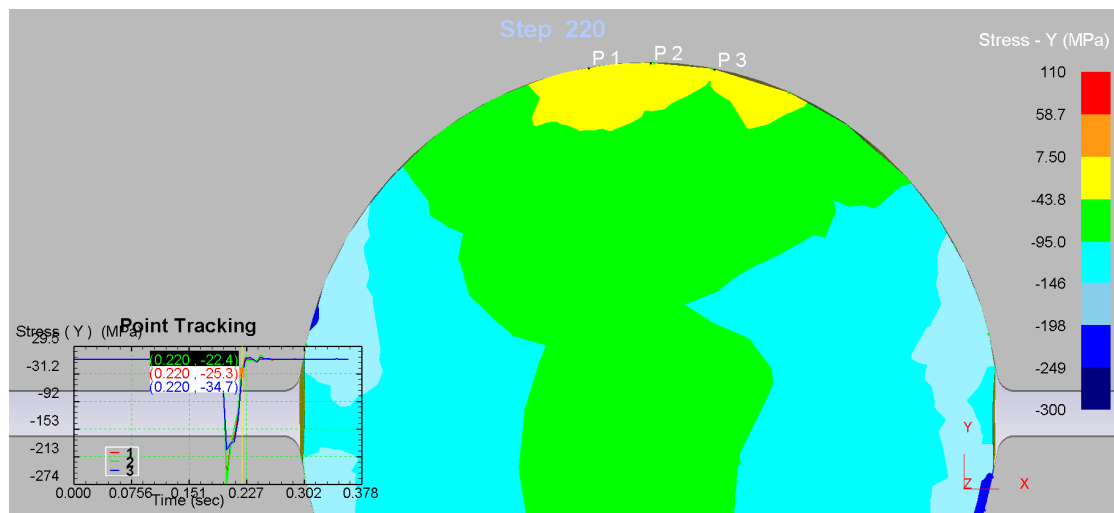


Рисунок 10 Результаты расчета значений сжимающих нормальных напряжений, действующих по вертикальной оси, в точках P1, P2, P3 на поверхности контакта металла с валком (рис. 9, в)

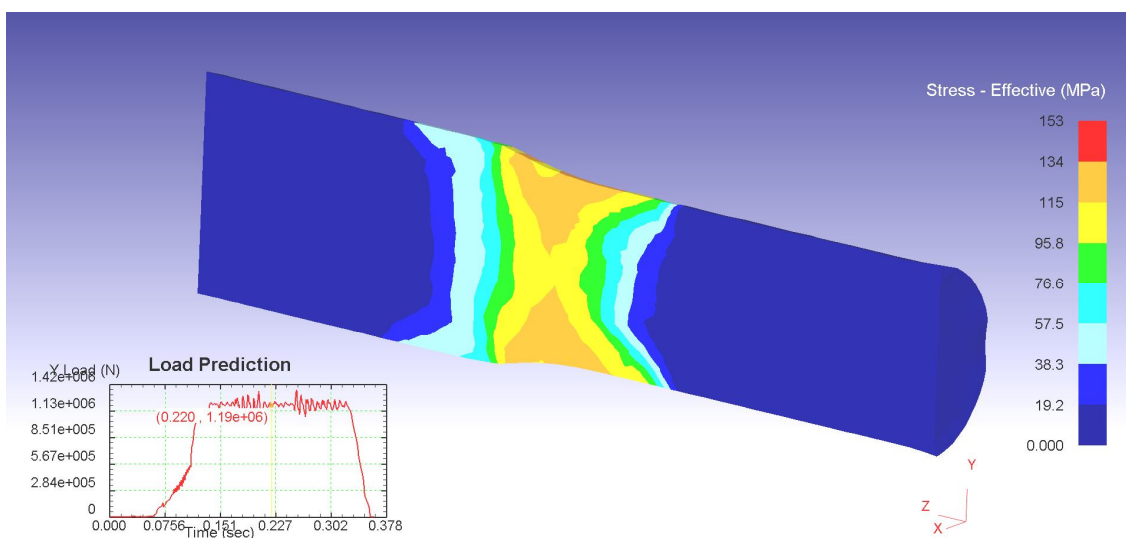


Рисунок 11 Распределение эквивалентных напряжений по длине очага деформации

Самоцентрировка в том случае, когда по причине нарушения технологии прокатки возникает наклон овала, обеспечивается за счет действия сил, показанных в работе [6]. Её реализация становится возможной благодаря тому, что в первый момент контакта металла с валками верхняя и боковые части контура овального раската совпадают с контуром сечения круглого калибра вертикальной плоскостью на расстоянии, равном длине очага деформации от плоскости выхода металла из валков. На рисунке 5, *з* показано устойчивое положение овала, полученное после его самоцентрировки.

При конечно-элементном моделировании, показанном на рисунке 7, процесс самоцентрировки овала специальной формы завершился на 60-м шаге (рис. 7, *з*). Здесь и на рисунке 7, *в* зелеными точками показано, что имеет место контакт овала с круглым калибром по всей ширине раската. После этого начинается обжатие овального раската в круглом калибре. Видно, что постепенно увеличивается длина очага деформации. При этом она остаётся величиной постоянной по ширине очага деформации, причем как при заполнении калибра металлом, так и при установившемся процессе прокатки, а также при выходе заднего конца раската из очага деформации (рис. 7, *р*). На рисунках 7, *м–с* показан завершающий этап моделирования процесса прокатки круга диаметром 120 мм на стане «600». Одновременное обжатие металла по дну и боковым стенкам ручьев круглого калибра, начиная с первого момента касания овального раската круглого калибра и до конца прокатки, создает условия для возникновения во всём объёме очага деформации сжимающих нормальных напряжений, действующих по вертикальной оси. При этом исключаются опасные для сплошности металла соответствующие растягивающие нормальные напряжения.

В процессе моделирования выполнен расчёт силы прокатки. На рисунке 7, *л* показан график силы при прокатке круга диаметром 120 мм на стане «600».

На рисунке 8 показано распределение векторов скорости течения металла, на рисунке 9 — распределение нормальных напряжений по вертикальной оси (*a* — при захвате; *б* — в средней части очага деформации; *в* — на выходе из очага деформации).

Анализ полученных на рисунках 9, 10 результатов позволяет сделать вывод о том, что при прокатке в круглом калибре овального раската, полученного в овальном калибре с выпуклым дном, во всём объёме очага деформации имеют место сжимающие нормальные напряжения, действующие по вертикальной оси. При этом, как показали расчеты, вертикальные нормальные напряжения, действующие в приконтактных слоях раската в зоне дна калибра, знак не изменяют (рис. 9, *в*, 10) и составляют ~27 МПа. То есть они остаются, по-прежнему, сжимающими.

На рисунке 11 показано распределение эквивалентных напряжений по длине очага деформации, которые используются при расчете силы прокатки.

Выполнен сравнительный анализ выявленных закономерностей напряженно-деформированного состояния металла в очагах деформации при прокатке в круглом калибре овальных раскатов, полученных в овальных калибрах с вогнутым [6] и выпуклым дном. Установлено, что при прочих равных условиях снижение высотного обжатия овального подката на 11,4 % и, соответственно, уширения — на 27,3 % (при прокатке овального раската, полученного в овальном калибре с выпуклым дном) приводит к тому, что ширина контактной поверхности подката с валками при захвате увеличивается на 6,7 % и по длине очага деформации практически не меняется. Таким образом, при такой калибровке (и, соответственно, при таких форме и размерах овального подката) возрастает роль боковых стенок калибра в условиях, когда обжатие металла по стенкам и дну круглого калибра начинается одновременно. В результате этого реализуется схема течения металла, при которой обес-

печивается повышение уровня сжимающих вертикальных напряжений в зоне боковой поверхности формируемого круглого раската. Это особенно хорошо заметно на входе в очаг деформации и в средней его части по длине (рис. 9, а, б).

#### Выводы:

1. Для условий прокатки круга диаметром 120 мм на стане «600» разработана усовершенствованная калибровка, являющаяся основным элементом технологии прокатки, которая обеспечивает улучшение устойчивости специального овального раската и одновременное его обжатие по дну и боковым стенкам ручьев круглого калибра в момент захвата.

2. Впервые на базе конечно-элементного моделирования установлено, что при прокатке в круглом калибре овального раската специальной формы, полученного в овальном калибре с выпуклым дном, в условиях, когда обжатие металла по боковым стенкам и дну круглого калибра начинается одновременно, во всём объёме очага деформации имеют место сжимающие нормальные напряжения, действующие по вертикальной оси.

#### Библиографический список

1. Илюкович, Б. М. Прокатка и калибровка : справочник [Текст]. Том I / Б. М. Илюкович, Н. Е. Нехаев, С. Е. Меркурьев ; под ред. Б. М. Илюковича. — Днепропетровск : РВА «Дніпро-ВАЛ», 2002. — 506 с.
2. Hong, H. Roll pass design and simulation on continuous rolling of alloy steel round bar / H. Hong // *Procedia Manufacturing : 9th International Conference on Physical and Numerical Simulation of Materials Processing (ICPNS'2019)*. — 2019. — Vol. 37. — P. 127–131.
3. Бахтинов, В. Б. Технология прокатного производства / В. Б. Бахтинов. — М. : Металлургия, 1983. — 486 с.
4. Пат. 102915 Украина, МПК (2012) B21B 1/02. Способ прокатки круглых профилей / Шум В. Б., Яковченко А. В., Никишин В. М., Курилов А. В., Гайдук Р. Е., Борискин В. В. ; владелец патента Донецкий национальный технический университет. — № a201200925 ; заявл. 30.01.2012 ; опубл. 27.08.2013, Бюл. № 16. — 6 с. : ил.
5. Снитко, С. А. Математическая модель поверхности круглого калибра / С. А. Снитко, Н. П. Денищенко // *Вестник Донецкого национального технического университета*. — 2020. — Том 20. — № 4. — С. 43–48.
6. Снитко, С. А. Исследование процесса самоцентрировки овального раската специальной формы в круглом калибре на базе метода конечных элементов / С. А. Снитко, Н. П. Денищенко // *Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении : сб. науч. тр.* — 2021. — Том 36. — № 3. — С. 72–82.

3. Выполнен сравнительный анализ выявленных закономерностей напряженно-деформированного состояния металла в очагах деформации при прокатке в круглом калибре овальных раскатов, полученных в овальных калибрах с вогнутым и выпуклым дном. Установлено, что при прочих равных условиях снижение высотного обжатия овального подката на 11 % и, соответственно, уширения — на 27 % (при прокатке овального раската, полученного в овальном калибре с выпуклым дном) приводит к тому, что ширина контактной поверхности подката с валками при захвате увеличивается на 7 % и по длине очага деформации практически не меняется. В условиях, когда обжатие металла по стенкам и дну калибра начинается одновременно, возрастает роль боковых стенок калибра и реализуется схема течения металла, при которой обеспечивается повышение уровня сжимающих вертикальных напряжений в зоне боковой поверхности формируемого круглого раската.

7. Снитко, С. А. Адаптация метода конечно-элементного моделирования процесса прокатки овального раската в круглом калибре / С. А. Снитко, Н. П. Денищенко, В. В. Пилипенко // Сборник научных трудов ДонГТИ. — 2021. — Вып. 23 (66). — С. 32–39.

© Снитко С. А.  
© Денищенко Н. П.  
© Яковченко А. В.  
© Денищенко П. Н.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. МЧМ ДонГТИ Должиковым В. В., к.т.н., доц., помощником начальника СПЦ по технологии филиала № 1 «АМК» ООО «ЮГМК» Чичканом А. А.*

*Статья поступила в редакцию 14.12.2021.*

**Doctor of Technical Sciences Snitko S. A., Denishchenko N. P., Doctor of Technical Sciences Yakovchenko A. V., PhD in Engineering Denishchenko P. N. (DonSTI, Alchevsk, LPR, pavel.denischenko@gmail.com)**

#### **DEVELOPMENT OF THE THEORY AND TECHNOLOGY OF ROLLING ROUND PROFILES**

*An improved calibration has been developed for rolling a circle with a diameter of 120 mm on a 600 mill, which improves the stability of a special oval roll obtained in an oval pass with a convex bottom, and its simultaneous compression along the bottom and side walls of round pass streams at the time of capture. On the basis of finite-element modeling, it is determined that in this case, the compressive normal stresses acting along the vertical axis take place in the entire volume of the deformation focus. The corresponding tensile normal stresses, which are dangerous for the metal continuity, are also excluded.*

**Key words:** *rolling of round profiles; calibration of a pre-finishing oval pass with a convex bottom; finite-element modeling of the rolling process; self-centering of an oval roll in a round pass; normal stresses acting in the deformation area.*