

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМОЗМЕНЕНИЯ КВАДРАТНОГО ПОДКАТА В ОВАЛЬНОМ КАЛИБРЕ ПРИ ПРОКАТКЕ В КЛЕТЯХ ЧЕРНОВОЙ ГРУППЫ НЕПРЕРЫВНОГО СОРТОВОГО СТАНА

Смирнов Е. Н.<sup>1)</sup> /д. т. н./, Скляр В. А.<sup>1)</sup> /к. т. н./, Белевитин В. А.<sup>2)</sup> /д. т. н./, Самойлова Т. Д.<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) ФГАОУ ВПО "Национальный исследовательский технологический институт "МИСиС"

<sup>2)</sup>ФГБОУ ВО "Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет"

*Досвід роботи більшості діючих прокатних станів показує, що дефекти на поверхні металопрокату є однією з основних причин отримання продукції невідповідної якості. При цьому в структурі браку найбільшу частку займають дефекти, які перейшли на готовий прокат з вихідних заготовок.*

*На сучасних середньосортних і дрібносортових безперервних прокатних станах застосовують комбіновану систему чорнових калібрів: спочатку використовуються прямокутні калібри, а потім чорнові калібри системи овал - ребровий овал або овал - коло. Наявність комбінованої системи обумовлює декілька точок переходу від однієї системи до іншої, які несуть в собі цілу сукупність проблем, пов'язану з поведінкою дефектів поверхні, особливо у разі реалізації низькотемпературних режимів прокатки.*

*Представлена методика аналізу деформованого стану металу в процесі прокатки квадратного підката в овалному калібрі в клітках чорнової групи безперервного сортового стану в умовах низькотемпературної прокатки. Отримані залежності дозволяють визначити нерівномірну деформацію бічних поверхонь штаби, що прокатується в овалному однорадіусному калібрі.*

**Ключові слова:** безперервний сортовий стан, прокатка, овальний калібр, низькотемпературна прокатка, методика оцінки, деформаційний стан.

*The experience of most of the existing rolling mill shows that the surface defects of metal are one of the main causes of obtaining a insufficient quality of product. In the general structure the highest number of defects passed on finished products with the original billets.*

*Modern medium and small-section continuous rolling mills are used combined system of rough caliber: first used rectangular calibres, and then system of calibers oval - rib oval or oval - round. The use of the combined system leads to presence of multiple points of transition from one system to another, which cause whole set of problems associated with the behavior of the surface defects, especially in the case of implementation of low-temperature rolling conditions.*

*The method of analysis of stress-strain state of metal during rolling a square strip in the oval caliber in the stands of the roughing group of a continuous mill in the conditions of low-temperature rolling is presented. The obtained dependences allow to define a non-uniform deformation of the side surfaces of the rolled strip in the one-radius oval caliber.*

**Keywords:** Continuous section rolling mill, rolling, oval caliber, low-temperature rolling, evaluation technique, strain state.

*Опыт работы большинства действующих прокатных станом показывает, что дефекты на поверхности металлопроката являются одной из основных причин получения продукции несоответствующего качества. При этом в структуре брака наибольшую долю занимают дефекты, перешедшие на готовый прокат с исходных заготовок.*

*На современных среднесортных и мелкосортных непрерывных прокатных станах применяют комбинированную систему черновых калибров: сначала используются прямоугольные калибры, а затем черновые калибры системы овал - ребровой овал или овал - круг. Наличие комбинированной системы обуславливает несколько точек перехода от одной системы к другой, которые несут в себе целую совокупность проблем, связанную с поведением дефектов поверхности, особенно в случае реализации низкотемпературных режимов прокатки.*

*Представлена методика анализа деформационного состояния металла в процессе прокатки квадратного подката в овальном калибре в клетях черновой группы непрерывного сортового станa в условиях низкотемпературной прокатки. Полученные зависимости позволяют определить неравномерную деформацию боковых поверхностей прокатываемой полосы в овальном однорадіусном калибре.*

**Ключевые слова:** непрерывный сортовой стан, прокатка, овальний калібр, низькотемпературна прокатка, методика оцінки, деформоване состояние.

**Введение.** Концепция минимизации металлоемкости конструкции готового изделия предъявляет все более высокий комплекс требований к стали как к конструкционному материалу. В этой связи вопросы, связанные изучением поведения дефектов макроструктуры непрерывнолитой заготовки (усадочная раковина, газовые пузыри, осевая пористость) в процессе деформирования имеют актуальный характер.

**Анализ литературных данных.** Опыт работы большинства действующих прокатных станом показывает, что дефекты на поверхности металлопроката являются одной из основных причин получения

продукции несоответствующего качества. При этом в структуре брака наибольшую долю занимают дефекты, перешедшие на готовый прокат с исходных заготовок [1].

На современных среднесортных и мелкосортных прокатных станах применяют комбинированную систему черновых калибров: сначала идут прямоугольные калибры, а затем черновые калибры системы овал-ребровой овал или овал-круг. Наличие комбинированной системы обуславливает несколько точек перехода от одной системы к другой, которые несут в себе целую совокупность проблем, связанную с поведением дефектов поверхности, особенно

в случае реализации низкотемпературных режимов прокатки [2].

Первой проблемной точкой следует считать момент перехода от подката квадратного сечения к подкату овального сечения, т.е. возникает элемент вытяжной системы калибров "овал-квадрат" [3]. Касательно системы калибров "овал-квадрат" можно отметить, что ее существенным недостатком является значительная вероятность образования поверхностных дефектов при прокатке квадратной заготовки в овальном калибре из-за неравномерного обжатия по ширине калибра.

А. П. Грудев [4] объясняет механизм образования таких поверхностных дефектов следующим образом (рис. 1). Повышенный износ калибров в местах интенсивного обжатия углов квадратной заготовки в овальном калибре 1 (рис. 1, а) приводит к появлению "рябизны", которая переходит на грани полосы после прокатки в последующем калибре (в классическом случае – квадратном, а в условиях непрерывного сортового стана – ребровой овальной калибры или круг).

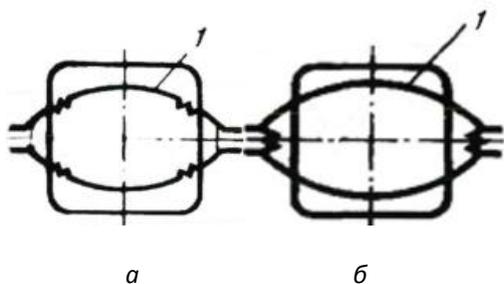


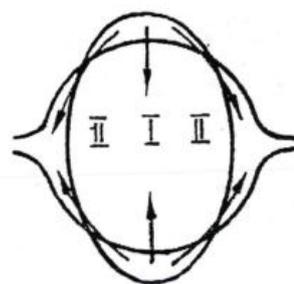
Рис. 1. Схема образования дефектов при прокатке в элементах системы вытяжных калибров "овал-квадрат": а – повышенный износ калибра, б – образование "морщин" [4]

Кроме того, возможны случаи, когда интенсивное уменьшение высоты полосы в овальном калибре 1 (рис. 1, б) приводит к образованию "морщин", сжатие которых в последующем калибре может привести к их трансформации в трещины. К достоинствам системы "овал-квадрат" с точки зрения влияния на качество поверхности проката можно отнести наименьшую вероятность образования поперечных трещин. Данный факт обусловлен отсутствием растягивающих напряжений на ребрах раската, что достигается за счет постоянного обновления ребер полосы при чередовании кантовок на  $45^\circ$  и на  $90^\circ$  в процессе прокатки.

Второй проблемной точкой следует считать момент перехода от подката овального сечения к подкату ребрового овального сечения, т.е. возникает элемент вытяжной системы калибров "овал-ребровой овал". Для системы вытяжных калибров "овал-ребровой овал" риск возникновения поверхностных дефектов минимален из-за отсутствия острых ребер и практически равномерной деформации полосы по ширине калибров [3]. Однако данное утверждение

справедливо для небольших сечений (чистовая группа клеток непрерывного сортового стана, может быть часть клеток промежуточной группы). В случае использования данной вытяжной системы в черной группе или первых клетях промежуточной группы, ситуация несколько меняется.

Так в ходе проведения лабораторных и промышленных экспериментов [5-7] установлено, что при прокатке в овальных и круглых калибрах наиболее значимое влияние на интенсивность выработки дефектов оказывает их расположение: в наибольшей степени уменьшается глубина расположенных на ребрах дефектов, а в наименьшей степени – глубина дефектов на вершинах калибров. Такая неравномерность выработки дефектов объясняется авторами особенностями заполнения калибров при прокатке (рис. 2).



I – осевая зона; II – ребровая зона.

Рис. 2. Схема течения металла при деформации в простых калибрах [5-7]

Заполнение свободных боковых зон круглого и овального калибров происходит за счет тангенциального смещения поверхностных слоев раската, в результате чего происходит значительное уменьшение их толщины. В осевой зоне металл получает только вертикальное смещение и соответственно толщина поверхностных слоев уменьшается незначительно. Особый случай представляет формоизменение дефектов в разъеме калибров, где глубина дефектов может даже увеличиваться за счет увеличения толщины поверхностных слоев при втекании последних в разъем, особенно в случае реализации низкотемпературных режимов прокатки [8-11].

С учетом вышеизложенного, целью работы является анализ деформационного состояния металла в процессе прокатки квадратного подката в овальном калибре в клетях черновой группы непрерывного сортового стана в условиях низкотемпературной прокатки.

**Методика анализа.** При прокатке квадратной полосы в овальном калибре величина обжатия по ширине полосы различна, а пластическая деформация во время процесса прокатки распространяется, начиная с верхних слоев металла в его глубину, вслед за упругой деформацией, распространяющейся со скоростью звука в данной среде. Анализируя характер деформации необходимо учитывать:

- воздействие подпирющих усилий ( $t_x$ ), возникающего в результате трения на поверхности взаимодействия "валок-металл" и зависящего от целой совокупности технологических факторов, среди которых температура играет главенствующую роль;

- форму фасонного калибра ( $w_x$ ).

Калибры овального типа принадлежат к типичным калибрам, в значительной мере ограничивающие уширение, благодаря подпирющим усилиями

(рис. 3), которые направлены к оси калибра. Поперечной деформации препятствуют совместно поперечные подпирющие усилия  $t_x$  и  $w_x$ . Эти силы, действующие на поверхностные слои металла, влияют на величину упругой и пластической деформаций, проникающей на определенную глубину внутрь полосы ( $h_{def}$ ). Меньшее по абсолютной величине вследствие этого уширение можно условно назвать "ограниченным уширением –  $\Delta b/2$ ".

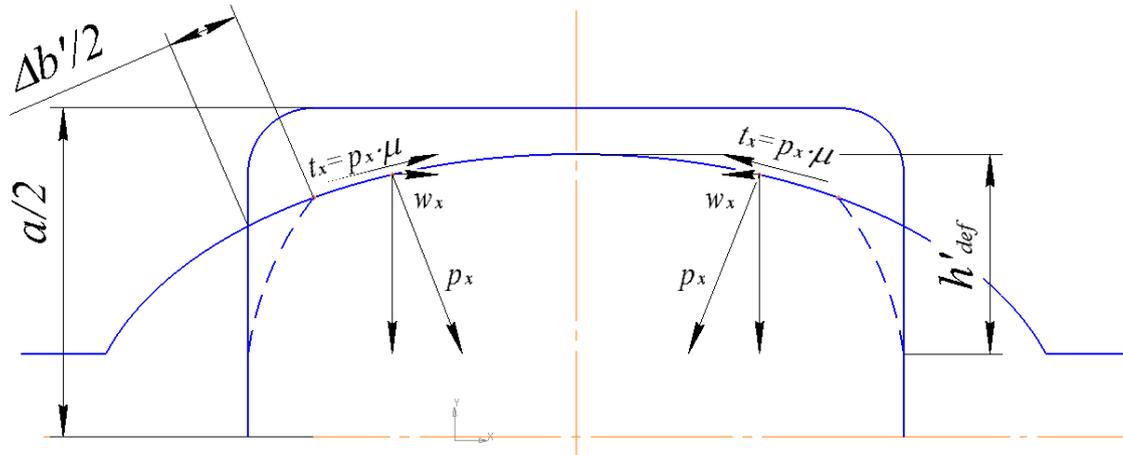


Рис. 3. Схема подпирющих усилий на поверхности контакта полосы с калибром

Если в теоретических выкладках пренебречь воздействием подпирющих усилий на поверхности контакта прокатываемой полосы с калибром, то тогда можно допустить, что величина уширения изменится по высоте поперечного сечения полосы от  $\Delta b_0/2$  на поверхности контакта до нуля в точке сечения, определяемой границей области проникновения пластической деформации  $h_{def(sr)}$  (рис. 4), а

уменьшение величины уширения может быть представлено в виде пропорциональной функциональной зависимости от величины уширения на определенной высоте  $y$ . В этом случае можно записать:

$$-d\left(\frac{\Delta b_y}{2}\right) = k \frac{\Delta b_y}{2} dy \quad (1)$$

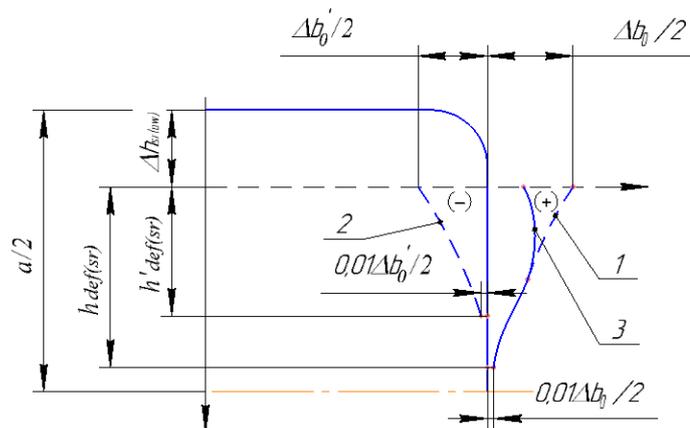


Рис. 4. Формирование кривизны свободной боковой поверхности полосы для случая  $l_d / h_{sr} < 1$

Интеграл этого уравнения выражается произведением

$$\frac{\Delta b_y}{2} = C \cdot \exp(-K \cdot y). \quad (2)$$

Коэффициент пропорциональности  $K$  определяется с использованием следующего начального условия:

для  $y = h_{def(sr)}$ ,  $\Delta b_y/2 = d$ , где  $d$  обозначает число близкое к нулю.

Тогда

$$K = \frac{1}{h_{def(sr)}} \ln \frac{2d}{\Delta b_0}. \quad (3)$$

Также принимается, что величина уширения  $\Delta b_y/2$  равна нулевому значению, если на расстоянии  $h_{def(sr)}$  от поверхности контакта его величина не превышает значения равного  $0,01 (\Delta b_0/2)$ , т. е. 1% от величины  $\Delta b_0/2$ . Для принятых допущений получаем

$$K = \frac{4,6}{h_{def(sr)}}. \quad (4)$$

Функциональная зависимость уширения от глубины проникновения по высоте  $y$  в этом случае будет иметь вид:

$$\frac{\Delta b_y}{2} = \frac{\Delta b_0}{2} \cdot \exp\left(-\frac{4,6}{h_{def(sr)}} y\right). \quad (5)$$

Величина ограниченного уширения, вызванного действием подпирющих усилий (рис. 4), определяется по аналогии из выражения

$$\frac{\Delta b'_y}{2} = \frac{\Delta b'_0}{2} \cdot \exp\left(-\frac{4,6}{h'_{def(sr)}} y\right). \quad (6)$$

Результирующее уравнение кривизны боковой поверхности полосы будет представлять из себя сумму правых сторон уравнений (5) и (6):

$$\frac{\Delta b_y}{2} = \frac{\Delta b_0}{2} \cdot \exp\left(-\frac{4,6}{h_{def(sr)}} y\right) - \frac{\Delta b'_0}{2} \cdot \exp\left(-\frac{4,6}{h'_{def(sr)}} y\right). \quad (7)$$

Уравнение (7) можно упростить, принимая следующие допущения:

1.  $\Delta b_0 \cong \Delta b'_0$
2.  $h'_{def(sr)} = f(R_{ow}, h_{sr}, \mu, D) \cong \frac{2}{3} h_{def(sr)}$

С учетом принятых допущений, уравнение кривизны боковой поверхности полосы примет вид:

$$\frac{\Delta b_y}{2} = \frac{\Delta b_0}{2} \left[ \exp\left(-\frac{4,6}{h_{def(sr)}} y\right) - \exp\left(-\frac{6,9}{h'_{def(sr)}} y\right) \right]. \quad (8)$$

Свободное уширение в овальном калибре может начинаться только от точки, обозначенной на рис. 5 символом  $h_p$

$$\frac{\Delta b_y}{2} = \frac{\Delta b_0}{2} \left[ \exp\left(-\frac{4,6}{h_{def(sr)}} (y - h_p)\right) - \exp\left(-\frac{6,9}{h'_{def(sr)}} (y - h_p)\right) \right], \quad (9)$$

где

$$h_p = R_{ow} - \sqrt{R_{ow}^2 - \left(\frac{a}{2}\right)^2} \quad (\text{по рис. 3})$$

и  $h_p \leq y \leq h_{ow}/2$ .

За величину  $\Delta b_0$  принимают наибольшее уширение в условиях отсутствия воздействия поверхностных подпирающих усилий, чего, фактически, в реальных условиях прокатки не бывает. Величину  $\Delta b_0$  вычисляют с использованием уравнения:

$$\Delta b_0 = C_{\Delta b} \cdot \Delta h_{sr(ow)}$$

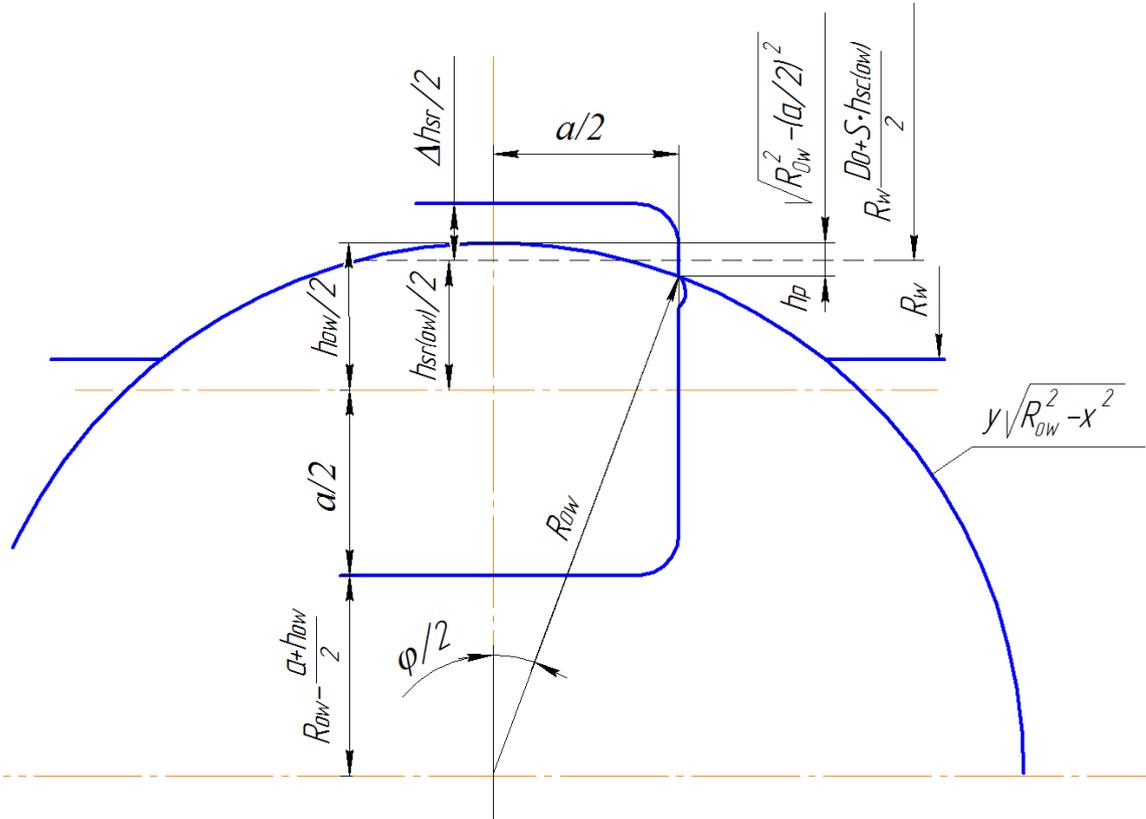


Рис. 5. Обозначения, приняты для вычисления  $\Delta h_{def(sr)}$

Следует особо отметить, что в этом случае коэффициент "C<sub>Δb</sub>" нельзя отождествлять с широко используемым понятием "коэффициент уширения" [12]. Фактически это некоторое число (зависящее от коэффициента уширения), равное величине отношения  $b_0 / \Delta h_{sr(ow)}$ .

Для определения коэффициента C<sub>Δb</sub> можно использовать диаграммы, построенные по результатам обобщения экспериментального материала (рис. 6), учитывающей диаметр валков в обжимной группе клеток непрерывного сортового стана, коэффициент вытяжки и температуру металла.

Для овального однорадиусного калибра принимается, что вместо переменной по ширине калибра величины обжатия  $\Delta h_{(x)}$ , используется среднее значение этой величины "Δh<sub>sr</sub>".

$$\Delta h_{(x)} = 2 \left( R_{ow} - \sqrt{R_{ow}^2 - (X)^2} \right) - h_{ow} + a ; (10)$$

$$\Delta h_{sr} = a - h_{sr(ow)}, \quad (11)$$

где

$$h_{sr(ow)} = h_{ow} - 2 \left( R_{ow} - \sqrt{R_{ow}^2 - \left(\frac{a}{2}\right)^2} \right) + \frac{R_{ow}^2}{a} (\hat{\phi} - \sin \phi). \quad (12)$$

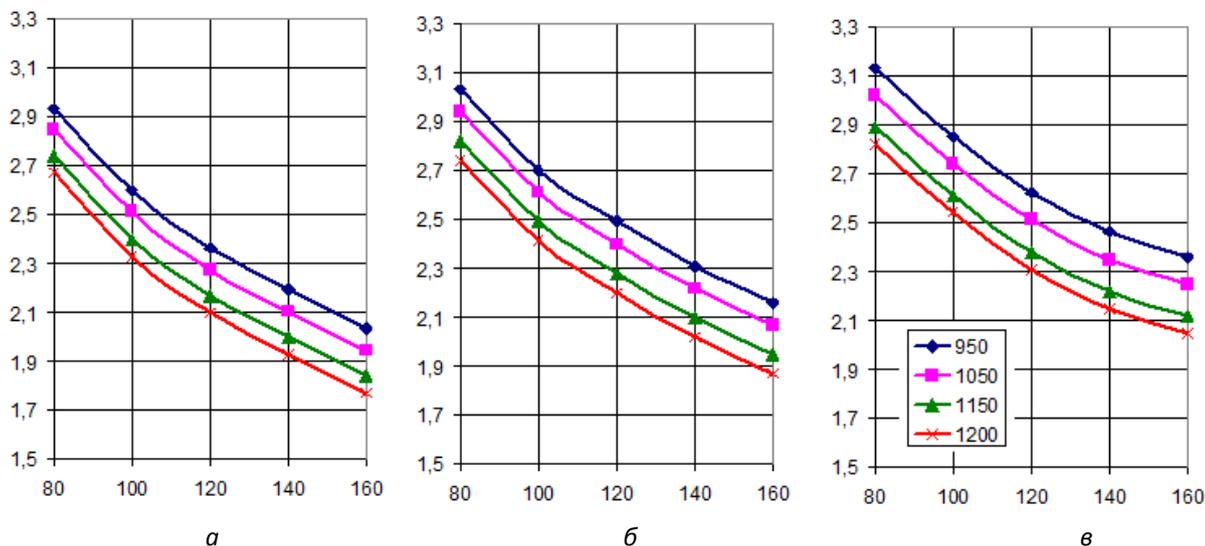


Рис. 6. Зависимость коэффициента  $C_{\Delta b}$  от стороны квадрата, прокатываемого в овальном калибре, диаметр валков: а – 600 мм, б – 650 мм, в – 700 мм

Окончательно, после подстановки величин (12) и (11) получим:

$$\Delta h_{sr(ow)} = a - h_{ow} + 2 \left( R_{ow} - \sqrt{R_{ow}^2 - \left(\frac{a}{2}\right)^2} \right) - \frac{R_{ow}^2}{a} (\hat{\phi} - \sin \varphi) \quad (13)$$

**Заключение.** Таким образом с помощью представленной методики анализа деформационного состояния металла в процессе прокатки квадратного подката в овальном калибре в клетях черновой группы непрерывного сортового

стана в условиях низкотемпературной прокатки. Полученные зависимости позволяют определить неравномерную деформацию боковых поверхностей прокатываемой полосы в овальном одно- радиусном калибре.

#### ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Дефекты стальных слитков и проката: справочное издание / В.В.Правосудович, В.П.Сокуренок, В.Н.Данченко и др. – М: Интермет Инжиниринг, 2006. – 384 с. ил.
2. Крахт, В.Б. Повышение эффективности сортамента мелкосортно-среднесортного стана 350 Оскольского электрометаллургического комбината / В.Б. Крахт, А.Е.Пратусевич, Н.А.Шляхов // Производство проката, 2003. - №5. – С. 19-21.
3. Чекмарев, А.П. Калибровка прокатных валков: учебное пособие для вузов / А.П.Чекмарев, М.С.Мутьев, Р.А.Машковец. – М.: Металлургия, 1971. – 512 с.
4. Грудев, А.П. Технология прокатного производства / А.П. Грудев, Л.Ф. Машкин, М.И. Ханин. - М.: Металлургия, 1994. - 656 с.
5. Зильберг, Ю.В. Формоизменение поверхностных дефектов при прокатке в простых калибрах / Ю.В. Зильберг, С.В. Ревякин // Металлургическая и горнорудная промышленность. - 1996. - №8 - С. 23-25.
6. Зильберг, Ю.В. Исследование закономерностей формоизменения поверхностных дефектов при прокатке / Ю.В. Зильберг [и др.] // Сталь. - 1997. - №10. -С. 44-46.
7. Зильберг, Ю.В. Изменение поверхностных дефектов при прокатке трубной заготовки из коррозионностойкой стали /Ю.В. Зильберг [и др.] // Сталь. - 1991.-№10.-С. 33-36.
8. Минаев, А.А. Исследование полей деформации при прокатке овальных заготовок с неравномерным распределением температуры по сечению/ А.А.Минаев, В.А.Белевитин, Е.Н.Смирнов, О.С.Савицкий // Известия вузов. Черная металлургия. – 1992. – №6. – С.20–24.
9. Минаев, А. А. Скорость течения металла при прокатке овальных заготовок с неравномерным распределением температуры по сечению / А. А. Минаев, В. А. Белевитин, Е. Н. Смирнов // Известия вузов. Чёрная металлургия. - 1993. - №11-12. - С. 22-25.
10. Смирнов, Е. Н. Неравномерность распределения скоростей течения металла при прокатке овальных заготовок с неравномерным распределением температуры по сечению / Е. Н. Смирнов // Наук. пр. Донец. держ. техн. ун-ту. Сер., Металургія. - Донецьк: ДонНТУ, 1999. - Вип. 8. - С. 121-126.
11. Минаев, А. А. Демонотонность пластического формоизменения при прокатке овальных заготовок с неравномерным распределением температуры по сечению / А. А. Минаев, Е. Н. Смирнов, В. А. Белевитин // Известия вузов. Чёрная металлургия. - 1993. - №6. - С. 34-37.
12. Грудев, А.П. Теория прокатки: Учебник для вузов / А.П. Грудев. – М.: Металлургия, 1988. – 240 с.