

УДК 621.75.06-52

Смирнов Е. Н.
Шум В. Б.
Игнатков Р. С.
Емченко А. В.
Галухина И. Н.
Кожин Д. С.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ В ПРЯМОУГОЛЬНЫХ СОПРЯЖЁННЫХ КАЛИБРАХ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ

В условиях постоянного инновационно-технологического развития общества перед производителями металлопроката остро стоит проблема повышения эффективности производства с целью обеспечения выпуска конкурентоспособной продукции востребованного рынком качества. Применительно к условиям не обновлявшегося долгие годы сортопрокатного производства Украины, достижение поставленной задачи не видится возможным без резкого прироста объёмов производства продукции из непрерывнолитой заготовки [1].

Вместе с тем на предприятиях, которые начали использовать непрерывнолитую заготовку из качественных конструкционных марок стали, появилась потребность не только в оценке достигаемого качества конечной металлопродукции, но и в определении границ типоразмеров действующего и вновь вводимого сортамента профилей, в пределах которого качество последних будет соответствовать востребованному потребителями. При этом в свете вышеизложенного требует особого к себе внимания вопрос, связанный с совершенствованием действующего температурно-деформационного регламента прокатки непрерывнолитой сортовой заготовки в обжимных клетях (группах клетей), поскольку именно на этом технологическом участке её макроструктура существенным образом отличается от горячекатаной заготовки, полученной по, долгие годы господствовавшей, схеме слиткового передела [2]. К слову, для прокатки горячекатаной заготовки была разработана основная масса калибровок валков и температурно-деформационных режимов.

Большинство сортовых прокатных станов украинских металлургических заводов, традиционно ориентированных на производство сортового проката из углеродистых качественных (ГОСТ1050-88) и легированных конструкционных (ГОСТ 4543-71) марок сталей, относятся к группе станов линейного типа [3]. Характерной особенностью вышеуказанной группы прокатных станов является то, что в качестве обжимных клетей используются клетки «трио», в валках которых нарезано несколько пар, так называемых, сопряженных прямоугольных калибров [4]. Однако, схема деформации в них металла связана с целым рядом особенностей, которые, в свете необходимости получения по сечению готовой продукции равномерного зерна, имеют не всегда положительный характер влияния: неодинаковое воздействие на металл со стороны верхнего и нижнего ручьев калибра (особенно в нечетных проходах – нижний горизонт) из-за различной схемы вреза; неравномерность распределения обжатий в паре сопряженных калибров; минимизация выпуклости дна калибра и т. д.

Все вышеизложенное в совокупности с наличием в макроструктуре непрерывнолитой заготовки крупнозеренной структуры (типичной для литого металла), повышенной пористости, а в ряде случаев и усадочных дефектов, требует дальнейшего совершенствования конструкции калибров именно первой и второй пар. Это связано с тем, что они призваны реализовать такой режим деформирования металла имеющего наилучшее тепловое состояние, который в максимальной степени позволит уплотнить его, а, следовательно, и минимизировать вероятность развития внутренних дефектов, генетические признаки которых обусловлены физико-химическими процессами производства стали [5]. В тоже время, анализ известных технических (технологических) решений, которые предлагают авторы для повышения

степени проработки структуры металла непрерывно-литых заготовок [6–9], касаются, в основной своей массе, регламентации условий деформирования в симметричных прямоугольных калибрах. При этом они практически не могут быть реализованы в сопряженных прямоугольных калибрах путем простого переноса, так как имеется значительная разница в конструкции нечетных калибров каждой из пар.

Однако корректировка конструкции калибров приводит к необходимости изучения возможных изменений не только в характере формоизменения металла и заполнения калибра, но и в характере формируемого напряженно-деформированного состояния в различных областях фактического очага деформации. При этом с позиции минимизации затрат на проведение предварительных оценок, целесообразно использовать методы математического моделирования [10], позволяющие получать достаточный объем информации для принятия окончательного решения о необходимости опытно-практической реализации.

Целью работы является исследование особенностей формоизменения раската и закономерностей проникновения деформации во внутренние слои металла непрерывнолитой сортовой заготовки при прокатке в системе сопряженных прямоугольных калибров новой конструкции.

Применительно к условиям среднесортного стана линейного типа сотрудниками ОАО «Донецкий металлургический завод» и кафедры «Обработка металлов давлением» Донецкого национального технического университета был разработан новый способ прокатки непрерывнолитой сортовой заготовки [11]. Основные отличия прокатки непрерывнолитой заготовки по новой схеме по сравнению с действующими могут быть сведены к следующим моментам:

- деформацию осуществляют последовательно не менее чем в трех парах сопряженных калибров;

- прямоугольные калибры имеют одинаковую конфигурацию дна ручья и высоту нижнего ручья в первом калибре каждой пары, превышающую высоту верхнего ручья на величину обжатия во втором калибре пары;

- при прокатке в каждой паре сопряженных калибров не происходит изменения направления приложения деформации вследствие кантовки на 90° . Однако, после прокатки во втором калибре каждой пары выполняется обязательная кантовка на 90° ;

- величина вытяжки в первом калибре каждой последующей пары, составляет $0,85 \div 0,95$ от величины вытяжки во втором калибре предыдущей пары. При этом деформацию в первой паре осуществляют с суммарной вытяжкой на уровне $1,65 \dots 1,85$, а в каждой следующей паре – делают вытяжку, которая превышает в $1,012 \dots 1,20$ раза вытяжку при деформации в предыдущей паре;

- радиус скругления на стыке боковых стенок и дна калибра в каждой паре калибров выполняют одинаковым и принимают для первой пары калибров равными $2,5 \dots 3,0$ радиуса скругления углов исходной заготовки, а для последующих пар калибров – равным $2,5 \dots 3,0$ радиуса скругления углов подката из предыдущей пары;

- величину прогиба дна ручья первого калибра первой пары выбирают равной $2,0 \dots 3,0$ радиуса скругления углов исходной заготовки, а в последующих парах – не более $0,7$ радиуса скругления углов исходной заготовки.

Вышеизложенные принципы были заложены в конструкцию сопряженных прямоугольных калибров, предназначенных для прокатки квадратной непрерывнолитой заготовки сечением 135×135 мм (радиус скругления углов $3,0$ мм) и нарезанных на валках обжимной клетки «трио» с начальным диаметром валков 560 мм. Данные деформационной составляющей новой схемы прокатки приведены в табл. 1.

Для исследования деформации металла по вышеизложенному способу разработана математическая модель прокатки заготовки квадратного сечения в сопряженных квадратных калибрах. Реализация математической модели осуществлена с помощью пакета прикладных программ Deform-3d [10].

При моделировании технологического процесса в пакете Deform-3d рассматривалось две схемы прокатки: базовая – действующая на предприятии система калибровки; опытная – система сопряженных калибров, спроектированная в соответствии с положениями патента [11].

Таблица 1

Проработка режима деформирования и конструкции калибров по новому способу прокатки [11]

Параметры деформации					Параметры калибровки					
Величина суммарной вытяжки			Вытяжка		Радиус скругления стыка боковой стенки и дна ручья, мм			Величина прогиба дна ручья, мм		
в 1-й паре	во 2-й паре	в 3-й паре	в 3-м калибре	в 5-м калибре	1 пара	2 пара	3 пара	1 пара	2 пара	3 пара
1,70	1,80	1,98	1,232	1,145	7,5	19,0	47,0	6,0	2,0	2,0

Результаты эксперимента и их обсуждение. С помощью разработанной математической модели произведено сравнительное исследование особенностей формоизменения раската и закономерностей проникновения деформации во внутренние слои металла непрерывнолитой сортовой заготовки при прокатке в первой паре сопряженных прямоугольных калибров, построенных на разных принципах. Результаты численного моделирования процесса деформирования исходной непрерывнолитой заготовки в первой паре прямоугольных сопряженных калибров приведены на рис. 1, а результаты деформирования – в табл. 2.

Анализ, полученных в ходе численного эксперимента данных, позволяет сделать следующие выводы:

– использование новой конструкции первой пары сопряженных калибров позволяет, по сравнению с действующей, с одной стороны увеличить суммарный коэффициент вытяжки до 1,8, а с другой – обеспечить равномерное их распределение по проходам пары, что, несомненно, окажет позитивное влияние на достижение близкого по величине износа ручьев на нижнем и верхнем валках, а также на характер нагрузки главного двигателя в каждом из проходов пары;

– имеющие место изменения в характере поперечного течения металла (рис. 1) способствует улучшению формы подката после второго прохода с точки зрения повышения его устойчивости после кантовки на 90° перед 3-м проходом: округлая форма (по действующей калибровке) сменяется на сложно-профильную форму, с двумя выступами и прогибом на середине грани;

– реализация новой схемы деформирования способствовала более интенсивному течению металла в продольном направлении, следствием чего стал факт того, что величина абсолютного уширения на уровне горизонтальной оси за два прохода по новой схеме составила $\Delta b_{1,2} = 6,4 \text{ мм}$, а по действующей – $\Delta b_{1,2} = 14,1 \text{ мм}$;

– оценка степени заполнения калибров металлом ψ , выполненная по величине отношения площади поперечного сечения подката к площади калибра, показала, что при прокатке по новой схеме наблюдается практически одинаковое заполнение калибров в первом и втором проходах ($\psi_1^H = 0,938$ и $\psi_2^H = 0,949$), в то время как при прокатке по действующей схеме в первом проходе наблюдается явное недозаполнение калибра ($\psi_1^D = 0,929$). Такой результат позволяет утверждать, что новая схема калибровки в большей степени учитывает как

особенности макроструктуры металла непрерывнолитой заготовки (осевая пористость, усадочные явления и т. д.), так и обусловленную ими меньшую величину уширения металла вследствие его уплотнения на начальной стадии деформирования.

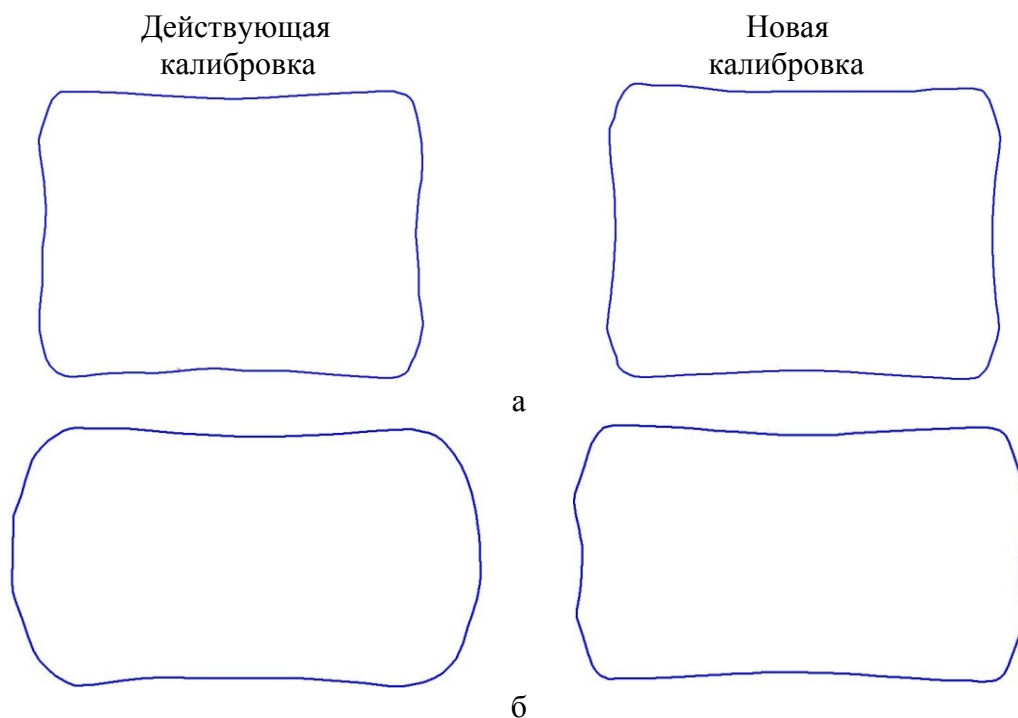


Рис. 1. Контур поперечного сечения раскатов после первого (а) и второго (б) калибров

Таблица 2

Результаты численного моделирования процесса деформирования непрерывнолитой заготовки сечением 135 × 135 мм в первой паре прямоугольных сопряженных калибров

Параметр	Действующая калибровка		Новая калибровка	
	1-й проход	2-й проход	1-й проход	2-й проход
Площадь сечения заготовки, мм ²	18225		18225	
Площадь сечения подката после пропуска, мм ²	13284	10738	13625	10167
Коэффициент вытяжки, μ	1,37	1,24	1,34	1,34
Ширина подката на горизонтальной оси, мм	138,7	148,4	138,0	141,4
Уширение металла на горизонтальной оси Δb , мм	3,7	10,4	3,0	3,4
Степень заполнения калибра	0,929	0,978	0,938	0,949

К основным параметрам, которые позволяют оценить степень проработки различных слоев металла по сечению непрерывнолитой заготовки, следует отнести степень накопленной деформации Λ и глубину проникновения во время деформирования H_{np} . Результаты численного исследования по оценке влияния параметров деформирования в первой паре

прямоугольных сопряженных калибров (действующая и новая схема прокатки) на характер накопления деформации Λ в различных точках поперечного сечения раската приведены на рис. 2 и 3.

Из приведенных данных видно, что в обоих случаях при прокатке в 1-м калибре наблюдается различный характер деформационного воздействия со стороны нижнего и среднего валков, на которых нарезаны ручьи, образующие калибр. В случае прокатки по действующей калибровке (рис. 2, а) характер накопления деформации Λ в слоях металла, прилегающих к ручью нижнего валка, носит практически равномерный характер вдоль всей поверхности дна калибра. В то же время, в случае прокатки по новой калибровке, наблюдаются видоизменения в характере накопления деформации Λ (рис. 2, б).

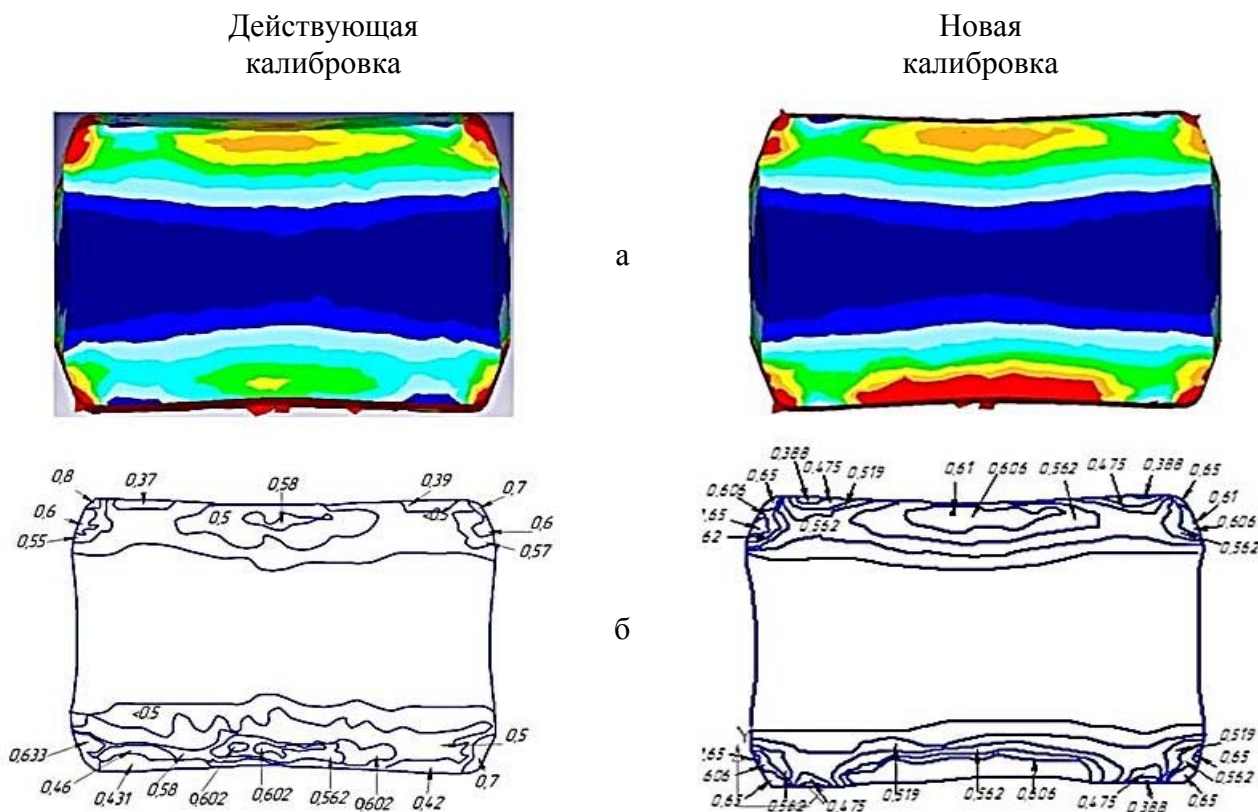


Рис. 2. Изменение Λ по сечению подката после 1-го прохода (а) и схема изолиний (б)

В этом случае наблюдается локализация деформации в центральной части дна калибра и в углах. При этом площадь области металла, в которой наблюдается максимальный уровень Λ в 5 раз больше, чем в случае прокатки по действующей калибровке. Кроме того, в случае прокатки заготовки с использованием новой калибровки, наблюдается примерно одинаковая глубина проникновения деформации H_{np} на всей ширине дна калибра.

Что касается деформационного воздействия со стороны среднего валка (верхний ручей), то можно отметить, что в случае прокатки по новой калибровке наблюдается более равномерный характер распределения параметра Λ (рис. 2) вдоль ширины дна ручья b_k . Максимальные значения Λ локализуются, как и в случае ручья нижнего валка, в трех областях; по центру и на стыках боковых стенок с дном калибра.

Что касается деформации во втором проходе (рис. 3), то можно утверждать, что прокатка с использованием новой системы калибров обеспечивает с одной стороны более высокий (до 23 %) уровень накопления деформации Λ , а с другой – более равномерный характер распределения по ширине дна ручьев, образующих верхний прямоугольный калибр.

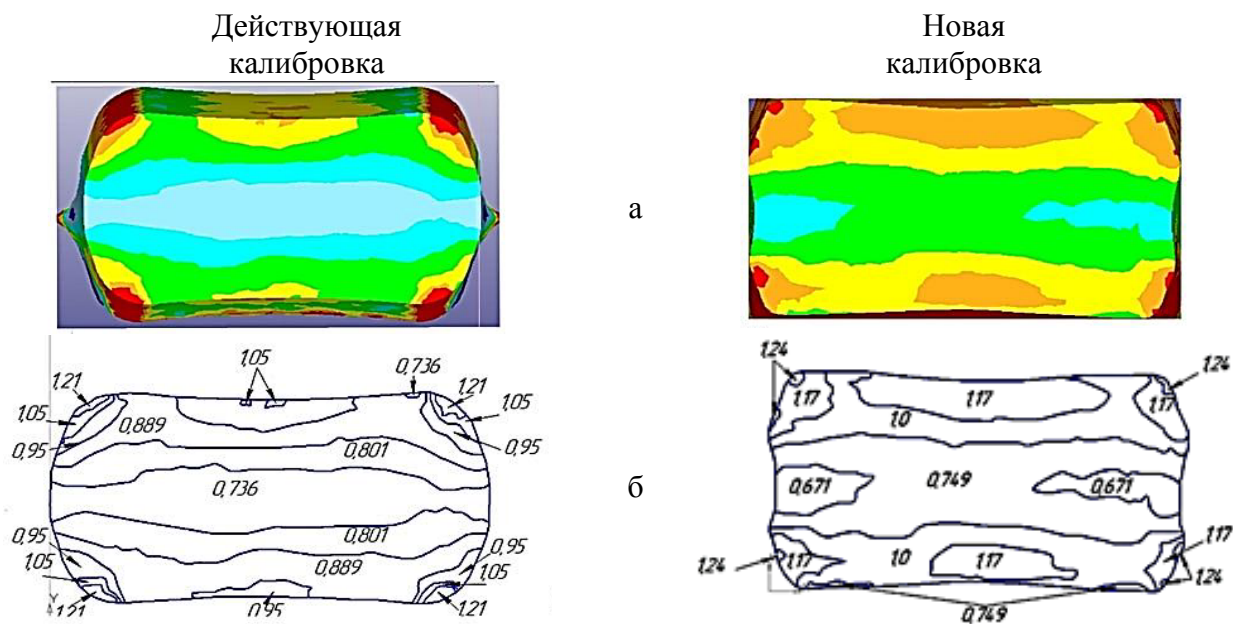


Рис. 3. Изменение Λ по сечению подката после второго прохода (а) и схема изолиний Λ (б)

Видимые всплески и падения в случае использования действующей калибровки (рис. 4) отсутствуют.

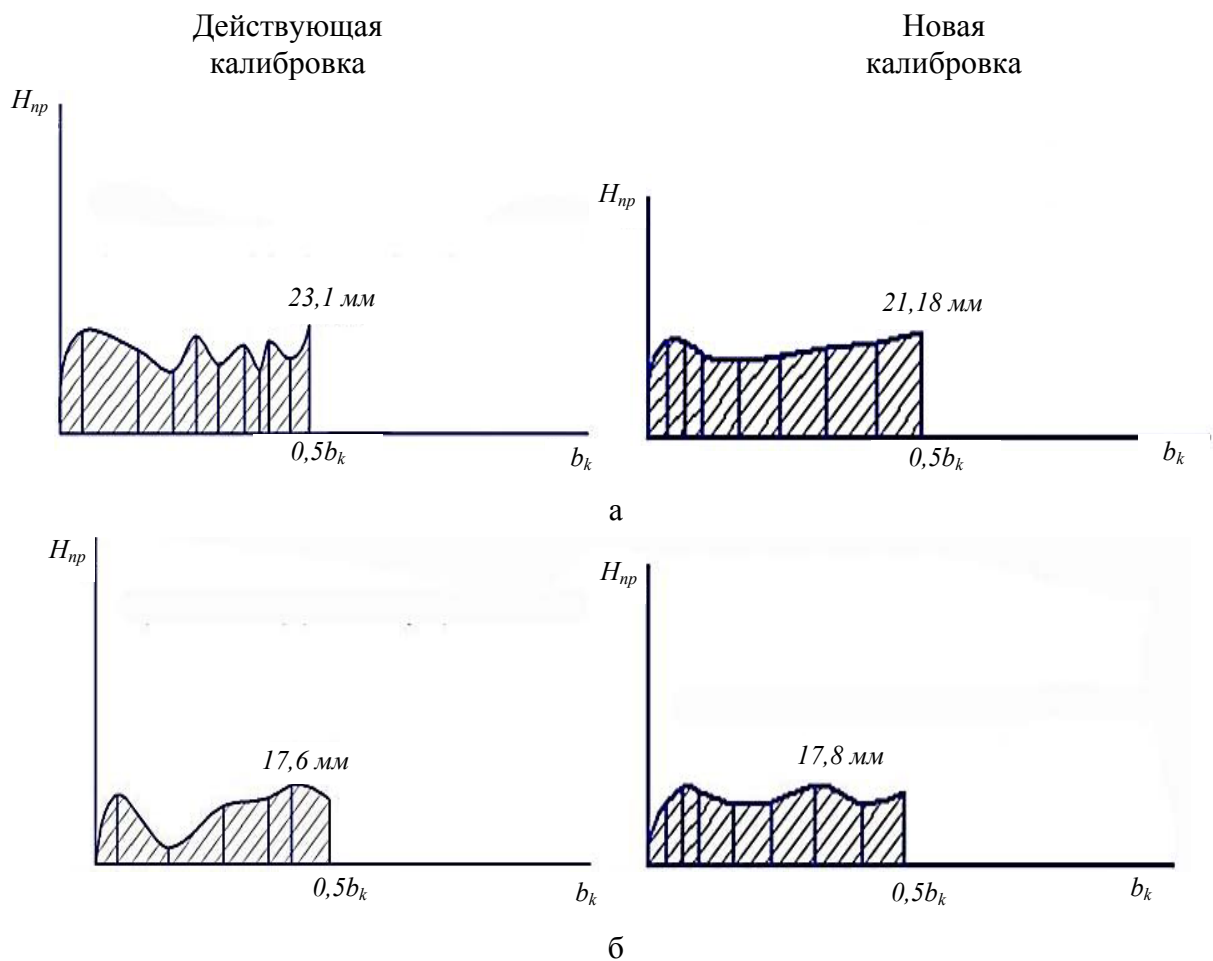


Рис. 4. Характер проникновения деформации H_{np} внутрь подката в различных точках по ширине дна ручья при прокатке в первом калибре:
а – со стороны ручья среднего вала; б – со стороны ручья нижнего вала

ВЫВОДЫ

Приведенное исследование процесса деформирования непрерывнолитой заготовки в прямоугольных сопряженных калибрах, конструкция которых в максимальной степени учитывает как геометрию заготовки, так и особенности макроструктуры металла, показало, что реализуемая схема деформирования, в сравнении с действующими, позволяет изменить характер накопления деформации в слоях металла, контактирующих с дном ручья. При этом для условий деформирования в первом калибре, площадь области, в которой наблюдается максимальный уровень Λ , примерно в 5 раз больше, чем в случае прокатки по действующей схеме, а глубина проникновения становится практически одинаковой на всей ширине ручья. В то же время, деформация во втором калибре пары обеспечивает более высокий (до 23 %) уровень накопления деформации Λ . Полученные результаты позволяют говорить о целесообразности использования нового способа прокатки на действующих станах линейного типа.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гринев А. Ф. Конкурентоспособность. Пути повышения эффективности производства горно-металлургического комплекса Украины / А. Ф. Гринев // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2010. – № 1. – С. 1–3.
2. Технологические предпосылки получения крупных профилей ответственного назначения из непрерывнолитого металла с качественной микроструктурой / Смирнов Е. Н., Несвет В. В., Смирнов А. Н. [и др.] // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2002. – С. 376–383.*
3. Прокатные станы : справочник. В 3-х т. Т. 2. Средне-, мелкосортные и специальные станы / [сост. Антипин В. Г., Тимофеев С. В., Нестеров Д. К. и др.]. – [2-е изд.]. – М. : *Металлургия*, 1992. – 496 с.
4. Илюкович Б. М. Прокатка и калибровка. В 6-ти т. Т. 2. Калибровка полосовых профилей / Б. М. Илюкович. – Днепропетровск : Днепро-ВАЛ, 2003. – 569 с.
5. Влияние конструкции калибров на формирование дефектов на поверхности сортового проката / В. А. Юров, И. Е. Назаров, П. Ф. Жоров [и др.] // *Сталь*. – 1999. – № 12. – С. 35–37.
6. Пат. 2119394 России, МПК В 21 В 1/00. Способ производства сортового проката из непрерывнолитой заготовки / Юров В. А., Назаров И. Е., Жоров П. Ф. ; заявитель и патентообладатель ОАО «Оскольский электрометаллургический комбинат». – № 97109070/02 ; заявл. 03.06.1997 ; опубл. 27.09.1998, Бюл. № 18. – 6 с.
7. А. с. 1674996 СССР, МКП В 21 В 1/00. Способ прокатки сортовых заготовок / А. А. Минаев, В. А. Белевитин, Е. Н. Смирнов, А. Г. Носанёв, А. Н. Смирнов, В. В. Шликевич, В. Б. Капустин, В. В. Щербачёв, А. Л. Геллер ; заявитель и патентообладатель Донец. политехн. ин-т (СССР). – № 4667722/02 ; заявл. 06.02.89 ; опубл. 07.09.91, Бюл. № 33 – 6 с.
8. Пат. 75832 Украина, МПК В 21 В 1/46, С 21D 8/00. Спосіб виробництва прокату з безперервнолитого металу / Є. М. Смирнов, В. В. Щербачов, М. В. Григор'єв, В. М. Мяжков, В. В. Зуб, О. О. Слугін, І. А. Демидова; заявитель и патентообладатель Донец. нац. техн. ун-т. – № 20041209910 ; заявл. 03.12.04 ; опубл. 15.05.2006, Бюл. № 5. – 6 с.
9. Технологические особенности производства сортового проката из непрерывнолитых заготовок / А. Н. Луценко, В. А. Мониц, Э. А. Гарбер, А. И. Тройно // *Производство проката*. – 2005. – № 1. – С. 11–13.
10. Практическое руководство к программному комплексу DEFORM-3D : учебное пособие / В. С. Паршин, А. П. Карамышев, И. И. Некрасов, А. И. Пугин, А. А. Федулов. – Екатеринбург : УрФУ, 2010. – 266 с.
11. Пат. на крисну модель 58851 Украина, МПК В 21 В 1/16 (2011. 01). Спосіб прокатки безперервнолитой заготовки / В. Б. Шум, Є. М. Смирнов, А. В. Ємченко, О. В. Алексєєв, О. О. Асикін ; заявник та патеновласник ВАТ «Донецький металургійний завод». – № 1 и 201012030 ; заявл. 11.11.10 ; опубл. 26.04.2011, Бюл. № 8. – 5 с.

Смирнов Е. Н. – д-р техн. наук, проф. ДонНТУ;

Шум В. Б. – канд. техн. наук, калибровщик ПАО «ДМЗ»;

Ємченко А. В. – канд. техн. наук, зам. ген. директора ПАО «ДМЗ»;

Галухина И. Н. – аспирант ДонНТУ;

Игнатков Р. С. – магистр ДонНТУ;

Кожин Д. С. – специалист ДонНТУ.

ДонНТУ – Донецкий национальный технический университет, г. Донецк.

ПАО «ДМЗ» – Публичное акционерное общество «Донецкий металлургический завод», г. Донецк.

E-mail: smirnov@fizmet.dgtu.donetsk.ua

Статья поступила в редакцию 29.03.2012 г.