

## ЛИСТОПРОКАТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.771.23—408.8

# Производство листового проката с использованием локального деформирования\*

А. И. Трайно<sup>1</sup> (traino@aport.ru), В. П. Полухин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН

<sup>2</sup>ОАО «Институт Цветметобработка»

*Рассмотрены технологические особенности производства листовой стали с локальным деформированием в черновых валках с кольцевыми проточками, продольными выступами и выступами винтовой формы, что обеспечивает повышение механических свойств горячекатаных листов, особенно ударной вязкости, а также снижение их анизотропии. Помимо этого достигается улучшение формы листов в плане, улучшается удаление окислы. Локальное деформирование при холодной прокатке позволяет снизить магнитные потери в трансформаторной стали за счет создания структурных барьеров и повысить деформационное упрочнение листов.*

*Сформулирована задача разработки инженерной методики расчета энергосиловых и кинематических параметров листовой прокатки в валках с выступами, а также рифленых заготовок в гладких валках.*

**Ключевые слова:** листопрокатное производство, горячая прокатка, холодная прокатка, раскаты, локальное деформирование, макросдвиги, готовые полосы, магнитные свойства, механические свойства, прокатные валки.

Из возможных деформационных воздействий при производстве листового проката, направленных в итоге на обеспечение требуемых его конечных свойств, к наиболее эффективным относится увеличение сдвиговой компоненты деформирования (макросдвиги). Поэтому важным резервом повышения эффективности производства листового проката является использование локальных деформаций, которые обеспечивают создание в раскатах больших значений накопленной деформации», знакопеременный характер деформации, а также ее монотонность [1]. Эти условия не присущи ординарным процессам продольной листовой прокатки. В связи с этим реализация дополнительного локального деформирования требует изменения традиционной формы заготовок и прокатных валков.

Сущность технологии прокатки с локальным деформированием раскатов состоит в формировании на контактных поверхностях слитков или валков периодически повторяющихся выступов и впадин и последующее их устранение прокаткой в валках с гладкой бочкой.

\* К 100-летию со дня рождения Петра Ивановича Полухина.

Локальное деформирование позволяет расширить возможности целенаправленного воздействия на показатели качества горячекатаных и холоднокатаных листов, их механические и функциональные свойства; на наличие дефектов; на форму толстых листов в плане и др.

Исследования технологических процессов листовой прокатки с использованием локальных деформаций раскатов широко проводились как в лабораторных, так и промышленных условиях. Однако, к сожалению, несмотря на присущие этим процессам несомненные преимущества, к настоящему времени они широкого промышленного использования не получили.

### Производство горячекатаных листов с использованием локального деформирования

Рассмотрим различные варианты выполнения локального деформирования при горячей прокатке листов на толстолистовых станах (ТЛС) и непрерывных широкополосных станах (НШПС).

### *Прокатка литых слябов с выступами и впадинами*

В работе [2] показано, что черновая прокатка слябов с локальным деформированием оказывает благоприятное влияние на прочностные, пластические и вязкостные свойства толстолистовой низколегированной стали, причем в количественном отношении она превышает влияние варьирования химического состава и условий нагрева слябов перед прокаткой.

Для реализации локальных деформаций при отливке слитков в изложницы, а также непрерывнолитых слябов, на их поверхностях формируют чередующиеся выступы и впадины [1, 3]. Типичная форма поперечного сечения таких слитков приведена на рис. 1. Достоинством технологической схемы с их использованием является то, что для ее реализации на ТЛС можно работать с обычными гладкими прокатными валками. При прокатке в первых черновых проходах при повышенных обжатиях участков с выступами достигается существенная неравномерность деформации по сечению слябов, сопровождающаяся макросдвигами. Однако применению данной технологии препятствуют трудности получения слитков со сложной формой поперечного сечения на существующих МНЛЗ.

### *Прокатка в валках с выступами на бочке*

Альтернативным путем реализации макросдвигов при горячей листовой прокатке является применение рабочих валков, на бочках которых выполнены выступы. В наиболее общем случае для анализа различных вариантов технологии целесообразно рассматривать прокатку в валках с выступами, выполненными по винтовым линиям с углом подъема  $\varphi$ , значения которого теоретически изменяются от 0 до 90°. При  $\varphi = 0^\circ$

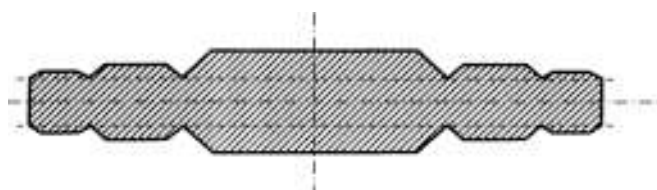


Рис. 1. Поперечное сечение слитка для прокатки толстых листов [3]

выступы и соответственно впадины располагаются по окружности валка перпендикулярно его оси, а при  $\varphi = 90^\circ$  выступы прямоугольной формы располагаются на бочке валка параллельно его оси.

### *Прокатка в валках с кольцевыми проточками*

К настоящему времени наиболее глубоко исследован случай прокатки, когда  $\varphi = 0$ , т. е. в валках с кольцевыми проточками (и выступами), который применяется в черновых клетях ТЛС и НШПС [4–6].

Экспериментальные исследования влияния локальных деформаций на свойства листовой стали были проведены на реверсивном стане ТЛС 2800. Для реализации такого процесса прокатки с помощью механической (токарной) обработки на бочках рабочих валков черновой клетки дуо создали систему чередующихся выступов и впадин с различным соотношением геометрических размеров их компонентов (рис. 2). Глубина кольцевых проточек  $\delta = 5–7$  мм, ширина разделяющих проточки опоясывающих выступов  $B = 70–95$  мм [4].

Эксперименты показали, что дополнительное локальное деформирование в черновых проходах обеспечило увеличение значений ударной вязкости толстолистовой стали в зависимости от системы легирования на 0,08–0,47 МДж/м<sup>2</sup>. Помимо этого был отмечен эффект снижения коэффициента анизотропии ударной вязкости в продольном и поперечном направлении с 2,8 до 1,9. Объясняется это, по-видимому, тем, что при такой прокатке происходит уменьшение размера (вытянутости) сульфидных и оксисульфидных включений (рис. 3). Кроме того, в листах, прокатанных в валках,

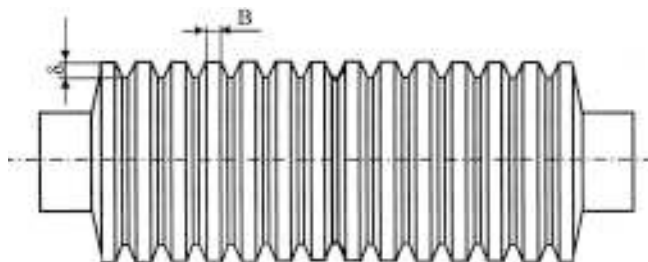


Рис. 2. Валок с кольцевыми проточками (в условном масштабе)

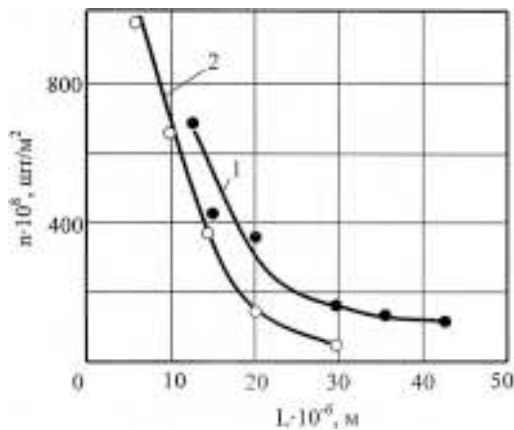


Рис. 3. Влияние способа прокатки на размер  $L$  и число  $n$  неметаллических включений в стали 09Г2 [4]:

1 — гладкие валки; 2 — валки с кольцевыми проточками

фасетки сколов приобрели равноосную форму и сохраняли следы деформации [4]. В них формируется менее выраженная волокнистая структура и ферритно-перлитная полосчатость, изменяется кристаллографическая текстура [7], а также измельчаются микроструктурные составляющие [8].

Для реализации циклического преобразования формы поперечного профиля заготовки в реверсивной черновой клетке при продольной или поперечной схемах горячей прокатки специалистами ДонНИИчермета был разработан новый способ прокатки листов, согласно которому заготовку прокатывают без кантовки в валках, имеющих кольцевые проточки с постоянным шагом. Благодаря этому на заготовке формируются регулярно расположенные продольные выступы и впадины. После каждого прохода заготовку перемещают вдоль бочки валка на величину, равную половине шага между кольцевыми проточками, осуществляют реверс клетки с одновременным уменьшением межвалкового зазора и снова обжимают металл. Последовательность перечисленных операций повторяют при каждом черновом проходе, обеспечивая интенсификацию деформирования металла в поперечном направлении. Завершают прокатку заготовки в чистовой клетке с гладкими валками. Предполагается, что в результате течения металла как в продольном, так и поперечном направлениях анизотропия структуры и механических свойств уменьшается в зависимости от величины перемещения металла вдоль валков [9].

При прокатке на НШПС интенсификация макросдвиговых деформаций создает более благоприятные условия для измельчения дендритной структуры заготовки и заваривания внутренних дефектов. В работе [10] предложено на таком стане чередовать по клетям последовательное обжатие в валках с кольцевыми проточками и на гладкой бочке, чем обеспечивается многократное преобразование формы поверхности заготовки от плоской к рифленой.

Противонаправленное пластическое течение металла по ширине заготовки при рассматриваемом способе прокатки способствует более эффективному удалению окалины с ее поверхностей. В связи с этим в работе [7] для удаления окалины рекомендуют использовать валки с кольцевыми проточками, трудоемкость подготовки которых в 2—3 раза меньше, чем у обычно применяемых для этих целей валков с лунками.

Поперечные перемещения металла в очаге деформации в ряде случаев могут приводить к уменьшению поперечной разнотолщинности листовой стали. Этот эффект, по мнению авторов работы [11], реализуется тогда, когда хотя бы в одной из первых клеток НШПС используются рабочие валки с кольцевыми проточками, у которых длина средней части бочки с проточками составляет 0,25—0,35 от общей длины бочки, а диаметр по гребню не превышает диаметр по дну проточки более чем в 1,005 раза. Однако оптимальность указанных параметров требует экспериментальной проверки.

Исследования по прокатке свинцовых образцов в лабораторных условиях и товарных листов из низколегированных сталей на промышленном ТЛС 2800 показали, что при использовании валков с кольцевыми проточками происходит улучшение формы концов раскатов в плане, которые в этом случае приближаются к прямоугольной (рис. 4) [7, 12]. Это, в свою очередь, уменьшает величину торцевой обрезки и снижает расходный коэффициент металла при производстве листов. Также было установлено, что наиболее устойчивая прокатка без боковых смещений заготовки в валках с кольцевыми проточками происходит при условии, когда отношение ширины дна проточки и вершины выступа не превышало 0,75.

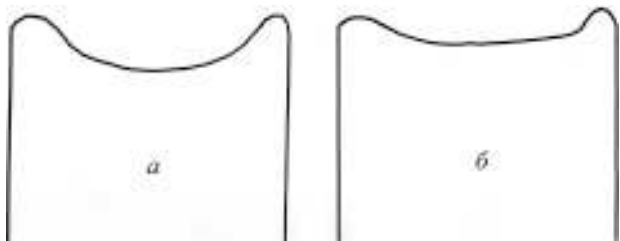


Рис. 4. Форма концевых участков листов в плане после прокатки в гладких валках (а) и в валках с кольцевыми проточками (б) [7]

Можно было ожидать, что прокатка с дополнительным локальным деформированием заготовки и увеличением площади контакта валков с заготовкой приведет к росту суммарных энергозатрат. Это предположение в действительности нашло свое экспериментальное подтверждение. В клети дуо ТЛС 2800 при одинаковых температурных условиях прокатки и отношении коэффициентов вытяжек при прокатке в валках с проточками  $\lambda_n$  и в гладких валках  $\lambda_r$ , равном  $\lambda_n/\lambda_r = 0,75-1,2$ , при переходе на валки с проточками потребляемая мощность электродвигателями главного привода увеличивалась на 10—15% [13]. В то же время в чистовой клети кварто с гладкими валками мощность при прокатке заготовки переменной толщины практически не изменялась.

При технико-экономической оценке эффективности применения валков с кольцевыми проточками необходимо учитывать расход валков. Увеличение площади контакта валков с нагретым металлом ухудшает тепловые условия их работы. Оценка износа валков с кольцевыми проточками показала следующее. После завершения кампании валки черновой клети 2800 имели слабо выраженную сетку разгара, а максимальный износ по образующей составлял 1,0—1,6 мм на радиус. При этом в первых двух кампаниях наблюдался преимущественный износ по кольцевым выступам, а износ дна проточек практически отсутствовал [7]. Тем не менее следует отметить, что выступы валка с проточками находятся в существенно более неблагоприятных условиях и сильнее подвержены фрикционному, окислительному и термическому износу. Кроме того, поскольку толщина активного слоя валков составляет несколько сантиметров, наличие кольцевых проточек сокращает общее число кампаний валка.

Для проектирования и оптимизации режимов прокатки листового проката с локальным деформированием необходимы инженерные методики расчета пластического течения металла, а также кинематических, энергосиловых и температурных параметров процесса. Известные методики и алгоритмы расчетов [14—16], основанные на использовании гипотезы плоских сечений, требуют дальнейшего развития, экспериментальной проверки и уточнения. Последнее в наибольшей мере касается случаев прокатки заготовки с неравномерной по ширине толщиной в валках с гладкой бочкой [17, 18], теоретические аспекты которых требуют своего развития.

### *Прокатка в валках с продольными выступами на бочке*

С точки зрения особенностей пластического течения металла в очаге деформации при листовой прокатке с использованием локального деформирования и формирования заданных механических свойств практический интерес представляет прокатка в валках, имеющих продольные выступы.

В работе [19] предложен способ прокатки полос, согласно которому для улучшения прорабатываемости структуры металла при ограниченных коэффициентах деформации в черновом проходе заготовку периодически обжимают в валках с продольными выступами, а в последующем проходе — в валках с гладкими бочками (рис. 5).

Данная схема прокатки, особенно в сочетании с обжатиями в черновых проходах в валках с кольцевыми выступами, обеспечивает

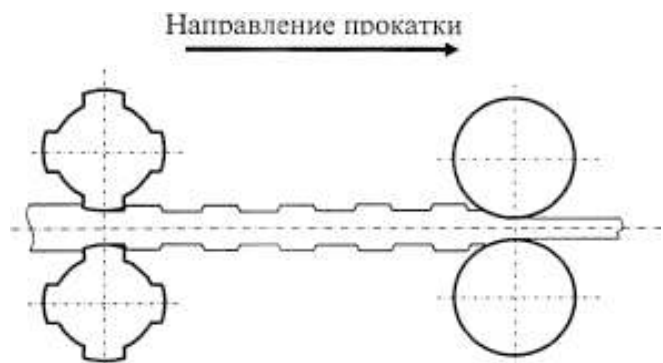


Рис. 5. Схема прокатки полосы с локальным деформированием в поперечном направлении [19]



макросдвиговые деформации, в свою очередь интенсифицирующие сдвиги по большому числу плоскостей скольжения, снижает анизотропию и улучшает механические и функциональные свойства горячекатаного листового проката, особенно производимого на НШПС. В научно-технической литературе нами не обнаружены исследования по прокатке в валках с продольными выступами.

Тем не менее данная схема деформирования реализуется на реверсивных ТЛС. Для этого достаточно после поперечной прокатки заготовки в валках с кольцевыми проточками произвести ее кантовку и задать в гладкие валки чистовой клетки.

Промышленные испытания показали, что после кантовки на  $90^\circ$  раската, обжатого в валках с кольцевыми проточками, и последующей прокатки металла с переменной по длине толщиной в чистовой клетке там наблюдаются синусоидальные колебания усилия и момента прокатки. Эти колебания могут быть весьма большими: для условий ТЛС 2800 при величине выступов до 10 мм максимальное отклонение усилия прокатки в чистовой клетке с гладкими валками от среднего значения составляло 1,5—2,5 МН и достигало в отдельных случаях 5—7 МН. С целью снижения колебаний усилия прокатки в работе [7] рекомендовано при черновых проходах смещать расположение проточек со стороны верхнего и нижнего валков друг относительно друга.

*Прокатка в валках с винтовыми выступами на бочке*

Прокатка в валках с винтовыми выступами соответствует условию  $90^\circ > \varphi > 0^\circ$ . Исследованию напряженно-деформированного состояния металла при прокатке в валках с винтовыми выступами посвящена работа [20].

Для повышения эффективности удаления окалины на НШПС путем локализации сдвиговой деформации на поверхности и в объеме металла при незначительном изменении размеров стальной слябовой заготовки разработана новая конструкция валкового узла, верхний и нижний валки которого имеют «волнистые» рабочие поверхности и в условном масштабе показаны на рис. 6. Выступы или впадины одинаковой

геометрии на верхнем 1 и нижнем 2 валках расположены оппозитно, а угол подъема винтовой линии находится в диапазоне  $45\text{—}60^\circ$ .

Заготовки прокатывали за несколько проходов с относительным обжатием за проход, равным

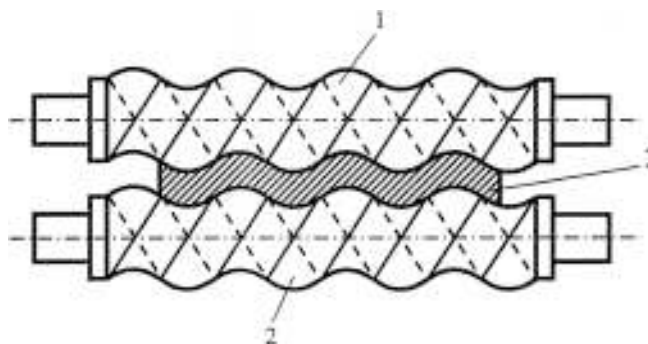
$$\varepsilon = \frac{2\delta}{H_0}, \quad (1)$$

где  $\delta$  — высота выступа (или глубина впадины);  $H_0$  — исходная толщина раската.

При прокатке эффективно измельчается структура в продольном и поперечном сечениях раската. При этом происходит смещение образующихся выступов и впадин по ширине раската, что создает дополнительные макросдвиги в его объеме и соответствующее измельчение структуры, т. е. способствует получению листового проката более высокого качества.

Для исследования напряженно-деформированного состояния металла в валках с винтовыми выступами использовали совместное решение уравнений равновесия и пластичности. В результате были получены зависимости осевых, тангенциальных и радиальных напряжений от параметров валков и режимов деформации. Было установлено, в частности, что радиальные напряжения у поверхности заготовки отсутствуют, а по толщине имеют отрицательную величину.

Расчеты использования ресурса пластичности позволили определить предельно допустимое значение относительного показателя изгиба  $\xi$  при горячей прокатке слябовых заготовок из низкоуглеродистой стали 08 [20]:



**Рис. 6. Комплект валков с винтовыми выступами [20]:**  
1 — верхний валок; 2 — нижний валок; 3 — деформируемая заготовка