**Исследование процесса деформирования непрерывнолитых слитков на стадии неполной кристаллизации**

Волков Артем Геннадиевич

Технология получения прямоугольной сортовой заготовки в гладких валках, называемая также бескалибровой прокаткой (БКП), заключается в том, что прокатываемая полоса обжимается последовательно гладкими горизонтальными и вертикальными валками или только горизонтальными валками с кантовкой раскатов на 90 градусов после каждого прохода или через один проход во всех клетях стана кроме чистовых, имеющих калибры, соответствующие по форме и размерам готовому прокату [16, 21, 22]. Окончательное формирование профиля необходимого поперечного сечения производится в последующих получистовых и чистовых проходах прокаткой в калибрах. Способы реализации бескалибровой прокатки

Из существующих и наиболее применимых в настоящее время следует отметить следующие разновидности бескалибровой прокатки (БКП), различающиеся величинами обжатий по проходам:

"квадрат-полоса" - способ прокатки, где сечению полосы через каждые два прохода придается форма квадрата [16];

RER-процесс - способ, в котором свободная поверхность полосы во всех проходах во время прокатки имеет форму одинарной бочки [22];

TRIPLET- способ, при котором в каждом проходе подкатом является прямоугольная полоса [14, 23, 24]. Перечисленные схемы бескалибровой прокатки могут реализовываться на существующих реверсивных и непрерывных станах [14, 15]. В последнее время за рубежом наметилась тенденция строительства прокатных станов, изначально предназначенных для деформирования в гладких валках.

Фирмой "Morgan Construction" (США) изготовлен четырехклетевой прокатный стан для прокатки по схеме RER полос 76-76 мм и 50-100 мм из заготовки 180?180мм в клетях с чередующимися горизонтальными и вертикальными валками [24]. Такое техническое решение снизило габариты стана на 85% (для освоения этого производства требовался шестиклетевой прокатный стан традиционной компоновки) [25].

На заводе Едельштальверк (Венгрия) работает мелкосортный стан фирмы СКЕТ, состоящий из 18 чередующихся вертикальных и горизонтальных клетей. В пяти клетях черновой группы технологией БКП способом БКП из заготовки 100?84 мм получают раскаты 52?51 мм [26]. В последующих группах клетей традиционной прокаткой получают круглые профили диаметром 8?50 мм, квадратные со стороной 10-41 мм, полосовые шириной 20-70 мм и толщиной 5-30 мм и арматурная сталь диаметром 10?40 мм. В работе отмечается хорошее качество проката и существенное снижение износа валков, что повышает эффективность работы стана. В работе [27] отмечается, что применение технологии БКП повышает выход бездефектного проката на 8 – 10%, что подтверждается результатами дефектоскопии металла. Обзорная информация показывает, что в сортамент материалов, прокатываемых в гладких валках, входят углеродистые, легированные стали и сплавы. С применением БКП производят заготовку, сортовой прокат простой формы, катанку и арматурные профили для железобетонных конструкций. Бескалибровая прокатка освоена и широко применяется за рубежом фирмами " Process Metallurgy ", " Scandinavian Engineering", " Morgan Construction ", "Кавасаки сэйтэцу". Из квадратных заготовок со сторонами от 42 до 250 мм за разное число проходов (от 3 до 17) получают готовый прокат круглого или квадратного сечения в размерном диапазоне от 8 до 150 мм. Отмечается, что при переходе от прокатки в калибрах на БКП, количество проходов не увеличивалось [25-29].

В Российской металлургии для условий действующего оборудования разработана технология бескалибровой прокатки для стана 300-2 завода «Мечел» (г. Челябинск) и стана 250/150 ПО "ИЖСТАЛЬ" (г. Ижевск) без уменьшения сортамента стана, а также для производства мелких профилей из сплавов титана на сортовых станах ВИЛС (г. Москва) и ВСМПО (г. Верхняя Салда) [22]. С 1991 года бескалибровая прокатка используется в обжимной группе клетей стана 150 ОАО «БМК» (г. Белорецк) [9, 19]. Во всех случаях отмечается ряд реальных технических, организационных и экономических преимуществ БКП по сравнению с традиционной технологией [9, 11, 21, 22], однако сведения о сравнении объемов производства проката в калибрах и с применением БКП в литературе отсутствуют.

В реальных промышленных условиях производство прямоугольной заготовки может реализовываться несколькими способами, имеющими различие как в режимах прокатки, так и в составе применяемого оборудования. Согласно патентам [30-33] прокатывать полосу в гладких валках следует с начальным соотношением сторон и с таким обжатием, чтобы у полученного раската достигалось такое же соотношение сторон. Оптимальным является соотношение сторон 2, 1, а использование валковой арматуры специальной конструкции предотвращает потерю устойчивости полосы. В патенте [34] кроме обжатия, обеспечивающего соотношение сторон полосы до и после прокатки <1, 5, для предотвращения возможного двойного бочкообразования регламентируется отношение диаметра валка D к межвалковому зазору t, которое должно составлять .

В работах [35, 36] обоснованы рекомендации производить деформацию полосы до размеров, определяемых из соотношения b1/h1 = (1, 6 – 2, 6)×b0/h0 при отношении D/h0 = 2, 3 – 5, 0, что позволяет получить максимально возможную вытяжку полосы за один проход. В патенте ЧССР [37] предложена схема прокатки: квадрат – прямоугольник “на ребро” – прямоугольник “плашмя” – прямоугольник “на ребро”… Реализация такой схемы осуществляется в чередующихся вертикальных и горизонтальных клетях с гладкими валками, причем перед клетями, в которых прямоугольная полоса имеет соотношение , для удержания полосы установлены проводки с фасонными роликами. Патентом отмечается возможность прокатки металла любого исходного сечения без ограничений по размерам. Аналогичное решение предложено в работе [38], где рекомендуется прокатка исходной полосы с соотношением сторон . Прокатка производится в реверсивной клети с горизонтальными рабочими валками, снабженной на входе и на выходе поддерживающими вертикальными валками, причем диаметры всех валков и расстояния между их осями определяются исходя из высоты обжимаемой полосы. С целью исключения кантовки полосы при прокатке сортовой заготовки способом БКП, в работе [39] предлагается производить прокатку в клетях с коническими валками. В линии стана клети с углом наклона образующей к оси валка 45° чередуются с клетями с углом наклона - 45°. По патенту [40] заготовка прокатывается последовательно в гладких валках и в валках с закругленным дном определенной конфигурации. В гладких валках соотношение сторон исходной заготовки составляет , после прокатки - (обжатие при этом может превышать 50%). В ребровом положении полоса прокатывается от до . В работе [41] предложено перед прокатной клетью устанавливать неприводные гладкие валки (ролики) для формирования плоской грани на бочкообразной боковой поверхности заготовок, что предотвращает их скручивание при последующей прокатке.

Анализ способов реализации технологии бескалибровой прокатки показывает, что практически все они основаны на комбинации соотношения сторон полосы на входе и выходе из валков, а также на соотношении диаметра валков и размеров проката. Однако, нет единого мнения по поводу назначения этих соотношений (рекомендуемый диапазон соотношений сторон полосы, например, составляет от 1, 5 до 5, 0). Не описана связь режимов обжатий с такими параметрами как диаметр валков, углы захвата, разнотолщинность и ромбичность заготовки, ромбичность готового проката и т.д. Во всех литературных источниках указывается на необходимость применения специальной удерживающей проводковой арматуры, однако, недостаточно подробно представлены описания конкретных конструкций. Не представлена как методика расчетов деталей удерживающей проводковой арматуры, так и принципы ее конструирования. В ряде работ [14-15, 28-29, 42-46] на основании лабораторных и промышленных исследований выявлены закономерности уширения при реализации бескалибровой прокатки.

Увеличение срока службы валков в 3 - 6 раз в связи с:

более эффективным (на 20...30%) использованием ширины бочки валка и его радиального размера;

меньшим износом валков из-за более рациональной схемы деформации и меньшего (на 5...10 %) усилия прокатки;

увеличением периодов между восстановлениями валков благодаря значительному повышению их твердости из-за возможности проведения их термообработки и шлифования при ремонте.

Более высокий коэффициент использования стана из-за сокращения суммарных простоев при перенастройках на другие типоразмеры, при перевалках и при смене калибров. Значительное сокращение машинного времени и расходов на изготовление и восстановление валков. Значительное сокращение парка валков и деталей проводковой арматуры. Бескалибровая прокатка может быть адаптирована к применению на существующих заготовочных и сортовых станах при небольших капитальных затратах. Наряду с очевидными достоинствами прокатка высоких прямоугольных полос на гладкой бочке имеет ряд недостатков. В работах [27, 49] отмечается, что полоса при выходе из гладких валков имеет более острые углы, чем при прокатке в калибрах. При задаче такой полосы в овальный калибр острые углы загибаются, что в дальнейшем приводит к образованию закатов. Кроме того, острые углы могут стать причиной образования поперечных трещин термического происхождения. Двойная бочка [28], возникающая при прокатке высокой полосы с низкими обжатиями также может приводить к образованию дефектов. Наиболее значительный недостаток бескалибровой прокатки – низкая устойчивость высокой полосы при прокатке, недостаточная изученность которой сдерживает более широкое применение БКП.

Проблемы устойчивости полосы Как отмечалось выше, широкое распространение технологии производства прямоугольной полосы в гладких валках сдерживается рядом несовершенств этой технологии, из которых наиболее существенна недостаточная устойчивость высокой полосы при прокатке ее в гладких валках. Одним из основоположников идеи применения бескалибровой прокатки можно считать А.Ф. Головина, отмечавшего, что при должном обеспечении устойчивости «…прокатка в гладких валках, несомненно, вытеснит прокатку в ручьях» [50].

Недостаточная устойчивость полосы, характеризующаяся изменением заданного положения полосы, приводит к образованию разности диагоналей поперечного сечения раската, к его скручиванию [14, 19, 51-52]. Проблемы повышения устойчивости полосы в разное время изучались в работах [9-11, 13-19, 21-41, 50-71, 76]. Значительный вклад в изучение вопросов устойчивости полосы при бескалибровой прокатке и способов ее повышения внесли: А.Ф. Головин, И.М. Павлов, А.П. Чекмарев, Б.П. Бахтинов, М.М. Штернов, В.В. Швейкин, В.А. Тягунов, Ю.М. Чижиков, П.И. Полухин, Б.В. Мерекин, Н.Ф. Грицук, М.Я. Бровман, В.Н., Т. Янадзава, Чжан Вэйган, В.Н. Выдрин, Ф.С. Дубинский, К.Г. Шиколенко, Ф. Флеминг, В.С. Берковский, В.К. Смирнов, В.А. Шилов, Ю.В. Игнатович, В.А. Харитонов, Б.А. Никифоров, А.А. Морозов, Л.Е. Кандауров и другие отечественные и зарубежные исследователи. Проблема устойчивости полосы актуальна для любого способа прокатки, однако, при прокатке высокой полосы в условиях блюмингов и заготовочных станов она приобретает особо важное, определяющее значение. Понятию «высокая полоса» дается определение в работах [19, 54, 72-73]. Потеря устойчивости на готовой полосе выражается перекосом формы поперечного сечения (ромбичностью), которой предшествуют сваливание, а затем свертывание [54]. В работах [54, 63, 74] приведена классификация, описывающая состояние полосы с точки зрения ее потенциальной энергии при прокатке.

Устойчивость полосы при прокатке может быть:

естественной (если полоса имеет минимум потенциальной энергии), что достигается созданием соответствующих калибровок и режимов прокатки;

частичной или неполной, зависящей от сочетания конкретных условий прокатки;

искусственной (при максимуме потенциальной энергии), при которой устойчивое положение полосы достигается применением специальных устройств – валковой арматуры.

В большинстве исследований показателем устойчивости полосы при прокатке в гладких валках является ромбичность раскатов. Для ее оценки и анализа при различных условиях прокатки рядом авторов предложено несколько показателей. На рис.1.2. показаны геометрические параметры поперечного сечения полосы, позволяющие численно выразить приведенные ниже показатели.

В работе [66] отмечается особая роль скрещивания осей валков на возникновение ромбичности полосы, однако аналитические зависимости отсутствуют. Также следует отметить, что современные конструкции прокатных клетей, подшипниковых узлов, а также методы контроля практически исключают скрещивание осей валков. И.М. Павлов [55] и В.Е. Грум-Гржимайло [81], анализируя потерю устойчивости полос, в качестве первопричины выдвигают неравномерный нагрев слитков по длине и по поперечному сечению, что обуславливает неоднородные пластические свойства и, как следствие, неравномерное уширение. Б.Е. Хайкин экспериментально изучал влияние неоднородности материала и дефектов полосы на ее устойчивость в очаге деформации, однако присутствие этих факторов на практике учесть практически невозможно. Кроме того, уровень современного развития технологии металлургии наличие современных методов входного контроля прокатки позволяет влияние этих факторов не учитывать. Авторы многих исследований однозначно отмечают негативное влияние на устойчивость высокой полосы при прокатке в гладких валках исходной ромбичности полосы, однако количественные характеристики в различных работах имеют значительные расхождения.

Влияние факторов второй группы на искажение формы поперечного сечения полосы в литературе оценивается неоднозначно и поэтому, вызывая особый интерес, требует более подробного рассмотрения. При этом следует учитывать, что их влияние на устойчивость полосы в калибре, а следовательно и на искажение формы поперечного сечения полосы, как правило, рассматривается не суверенно, а в комплексе из группы факторов. Влияние отношения высоты подката H к его ширине B (H/B) на ромбичность полосы рассмотрено в работах [14, 31, 32, 78, 48, 82]. В перечисленных работах для обеспечения устойчивого положения полосы в валках рекомендуется вести прокатку при H/B=1, 5…2, 5. В то же время в работах [33, 47] на основании экспериментальных данных делается вывод, что полоса теряет устойчивость при Н/В>1, 5. Также отмечается, что при H/B>>1, 5 возможно двойное бочкообразование, приводящее в дальнейшем к появлению морщин в последующих проходах.

По патенту [40] соотношение сторон заготовки в промежуточных проходах может достигать В/Н=3, 5…6, однако ее прокатка в ребровом положении должна вестись с применением мелкого закругленного калибра от соотношения Н/В=3, 5..6 до соотношения h/b=1, 5..3, 5. В работе [42] рекомендованное соотношение Н/В составляет 2..5. Обжатия, как единичные так и суммарные, назначаемые при бескалибровой прокатке, соответствуют соотношению сторон поперечного сечения полосы до и после прокатки. В работах [19, 83] описаны реализованные режимы БКП с единичным обжатием e=46…49%. При этом получены раскаты правильной геометрической формы. В работе [40] рекомендуются обжатия 60 и более процентов. Вместе с тем, исследования качества металла полученного прокаткой высоких полос в гладких валках показали, что «…обжатия не должны превышать 40..45%, в противном случае на свободной поверхности возникают растягивающие напряжения, способствующие развитию дефектов» [9]. По рекомендациям работы [19] единичные обжатия не должны превышать 43%.

С целью обеспечения устойчивой прокатки высокой полосы в гладких валках в работе [42] рекомендуется при соотношении сторон Н/В=2, 0..5, 0 производить прокатку в валках, у которых диаметр составляет D=0, 8Н. Отмечается, что наряду с хорошим качеством раскатов при таком диаметре валков прокаткой до h/b=0, 2..1, 0 достигается величина вытяжки до 2, 5. В работе [84] диаметр D рекомендуется выбирать по эмпирическим зависимостям исходя из конкретных размеров полосы без учета соотношения H/B. Влияние кривизны контактной поверхности подката на устойчивость полосы, а, следовательно, и на ромбичность проката оценивается крайне неоднозначно. Если в работах [14, 85, 19] отмечается значительное влияние (но в разной степени) этого фактора, то в [73, 75] влияние этого фактора не обнаружено. Настройка валковой арматуры сводится к обеспечению зазора между полосой и удерживающими элементами арматуры. Большинство исследователей [18, 14, 16, 86] полагают, что зазор между свободной поверхностью полосы и удерживающими элементами арматуры должен составлять минимально возможную величину. Критическим считается зазор, позволяющий заготовке поворачиваться относительно продольной оси более чем на 3°-5°.

В работах [18, 19, 87], описан эксперимент, проведенный с целью оценки влияния на устойчивость полосы технологических параметров и вводной проводковой арматуры. Опытная прокатка, в которой принимал участие автор настоящей работы, проводилась на лабораторном прокатном стане. На первом этапе прокатывались клиновые свинцовые образцы при h0/b0=1…2, 25 и D/h0=6, 67…15, 04. Максимальные обжатия достигали e=0, 69. Экспериментальная прокатка клиновых свинцовых показала положительное влияние удерживающей проводковой арматуры, однако, закономерности, позволяющие конструировать поводковую арматуру, получены не были. На втором этапе экспериментов на лабораторном прокатном стане с диаметром бочки валков D=255 мм с использованием планируемого эксперимента прокатывались стальные образцы. Варьируемые факторы изменялись в следующих пределах: h0/b0=1, 2…2, 8, Dh/h0=0, 2…0, 4, D/h0=5…11, h0/r=0, 0…0, 4, t/h0=0, 015…0, 078. Прокатка проводилась с применением удерживающей проводковой арматуры специальной конструкции. Полученные экспериментальные данные второго этапа позволили получить регрессионное уравнение для прогнозирования перекоса сечения полос, прокатываемых методом БКП. Закономерности, позволяющие конструировать проводковую арматуру, в перечисленных работах не описаны. Приведенные выше условия устойчивой прокатки полосы, обеспечивающие прокатку качественной продукции с применением БКП, получены для разного количества факторов. В ряде работ остается неясным диапазон их изменения. Наиболее информативными можно считать работы Л.Е. Кандаурова [18, 19, 87]. В них исследовался процесс БКП при e=0, 2…0, 4. Указанный диапазон ниже применяемого в промышленных условиях и рекомендованного в целом ряде источников. Изложенное позволяет считать необходимым проведение дополнительных экспериментов с расширенным диапазоном обжатий.

2. Существующие конструкции валковой арматуры для реализации бескалибровой прокатки

Как отмечалось ранее, прокатка высоких полос в гладких валках производится с применением специальной удерживающей проводкой арматуры. В работе [28] отмечается, что "...разработка режимов бескалибровой прокатки не вызывает трудностей, но получение качественного проката невозможно без применения специальной удерживающей вводной проводковой арматуры, обеспечивающей устойчивое положение полосы при прокатке". Такая же роль вводной проводковой арматуре отводится и в исследованиях [9, 85].

Конструкции проводковой арматуры, применяемые при прокатке высоких полос в гладких валках достаточно полно описаны в работе [91] и характеризуются тем, что все обычные требования, такие как обеспечение соосности оси раската с линией прокатки и предотвращение поворота полосы относительно оси прокатки, присущие традиционной прокатке в калибрах [19, 51, 86, 91], должны выполняться более тщательно, точно и надежно. При традиционной прокатке в калибрах высокой полосы ее устойчивое положение обеспечивают боковые стенки калибра, взаимодействующие с полосой непосредственно в очаге деформации. Отсутствие ручьев при БПК восполняется дополнительными конструктивными элементами вводной проводковой арматуры: удерживающими элементами, расположенными непосредственно в межвалковом зазоре и взаимодействующими с прокатываемой полосой, чем достигается устойчивое и стабильное положение раската непосредственно в очаге деформации. Отсутствие удерживающих элементов приводит к потере устойчивости полосы, ведет к серьезным искажениям формы поперечного сечения раскатов и даже делает дальнейшую прокатку невозможной. Большинство применяемых в настоящее время конструкций являются проводками скольжения, которые можно не только максимально приблизить к очагу деформации, но и устанавливать непосредственно в межвалковом зазоре.

Для исключения налипания металла на рабочие поверхности продольных направляющих и удерживающих элементов (особенно при прокатке легированных сталей и сплавов) широко применяются материалы, мало подверженные налипанию и износу.

Существует конструкция [92] в которой положение подката стабилизируется "...с помощью струй воды надлежащей силы...". Причем одновременно происходит гидросбив окалины и охлаждение валков, что, по мнению авторов, приводит к повышению качества продукции. Существуют конструкции удерживающей арматуры, применяемые при реализации БКП на реверсивных [15] и непрерывных станах [33].

Валки реверсивного стана выполняются ступенчатыми в соответствии с обжатиями по проходам. Боковые направляющие имеют такую конфигурацию, что зазор между ними и периферийными поверхностями валков составляет 2..5 мм, а их внутренняя боковая поверхность соответствует форме боковой поверхности полосы. Расстояние между боковыми направляющими выставляется таким, что полоса располагается в арматуре с зазором 3мм (при прокатке квадрата со стороной 80?145 мм из квадратной заготовки 250 мм) [15]. У арматуры для непрерывных станов может быть предусмотрена возможность раздельной регулировки по ширине пропусков и продольных направляющих с удерживающими элементами. Зазор между удерживающими элементами и полосой обеспечивает поворот полосы не более 3?.

В удерживающей арматуре с целью правки и стабилизации переднего конца подката, а также для более точного его центрирования могут устанавливаться направляющие ролики с вертикальной или с горизонтальной [31] осью вращения, а также ролики, устанавливаемые в двух плоскостях [92]. Направляющие ролики могут иметь неглубокие врезы, причем такая арматура может использоваться и при прокатке в несколько ниток

Главным условием успешной работы описанных конструкции является наличие профилированных сообразно боковой поверхности полосы удерживающих элементов, размещенных непосредственно в очаге деформации. Профилирование рабочих поверхностей удерживающих элементов является весьма трудоемкой операцией и, кроме того, боковая поверхность полосы в процессе прокатки может часто изменяться из-за разноширинности полосы, неравномерного нагрева и т.д. Это обстоятельство также снижает функциональную надежность таких конструкций. В работе [19] наиболее полно представлены требования к проводковой арматуре для БКП, однако они носят, в основном, общий характер. В рекомендациях для проектирования и конструирования такой арматуры не прослеживается связь между конструктивными особенностями устройств и силовыми условиями прокатки высокой полосы в гладких валках, что может приводить или к нерациональному расходованию материалов при изготовлении арматуры или к недостаточной жесткости и прочности, обеспечивающих функциональную работоспособность. Все перечисленное значительно осложняет конструирование и проектирование проводковой арматуры конкретных технологических схем и конкретных прокатных станов. Таким образом, создание надежных и дешевых конструкций валковой арматуры для осуществления БКП является до настоящего времени актуальной задачей.

**Список литературы**

Токарев В.А., Марков А.Н. Прокатка в валках без калибров // Черная металлургия: Бюл. ин–та “Черметинформация”. – 1983. – № 18. – С. 11–16.

Применение бескалибровой прокатки на заготовочных станах / Т. Янадзава, Т. Танака, Т. Морита и др. // Transactions of the iron and steel institute of Japan. –1982. – V. 22. – № 3. – P. B–59.

Флеминг Ф., Кунс Р. Опыт прокатки заготовок на гладкой бочке // Металлургическое производство и теория металлургических процессов. 1993. – С. 98–102.

Прокатка заготовок на гладких валках / Fackber Hutenpran // Metall Weiter-verab.-1984.-V.22.-№5.-P.549-550.

Морозов А.А. Совершенствование технологии производства сортового проката с целью повышения его потребительских свойств. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Магнитогорск, 1998. – 161 с.

Кандауров Л.Е. Развитие теории и практики бескалибровой прокатки заготовки прямоугольного сечения. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. - Магнитогорск, 2002. – 267 с.

Увеличение срока службы валков при бескалибровой прокатке / Л.Е. Кандауров, Б.А. Никифоров, А.А. Макарчук и др. // Сталь. – 1991. – № 1. – С. 54–55.