

**С.А.Воробей, А.Н.Степаненко, Г.В.Левченко, Т.В.Грицай**

## **РАЦИОНАЛЬНЫЕ СХЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА ТОНКИХ ГОРЯЧЕКАТАНЫХ ПОЛОС ИЗ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ**

*Институт черной металлургии им. З.И.Некрасова НАН Украины,  
ГП Укрспромез*

Целью работы являлся выбор рациональных схем производства тонких горячекатаных полос с необходимой структурой и свойствами на широкополосных станах горячей прокатки. Приведены результаты исследования различных схем производства тонких горячекатаных полос из низкоуглеродистой стали для холодной штамповки. С позиции получения микроструктуры предложены рациональные схемы производства горячекатаных полос в зависимости от их толщины и типа стана горячей прокатки.

**широкополосные станы горячей прокатки, низкоуглеродистая сталь, структура, свойства, холодная штамповка**

### **Современное состояние вопроса.**

Институт черной металлургии НАН Украины многие годы обеспечивает научное сопровождение технического перевооружения широкополосных станов горячей прокатки (ранее – в СССР, в настоящее время – в Украине). Разрабатывались новые технологии, обеспечивающие эффективное производство тонких горячекатаных полос и подката для станов холодной прокатки, развивались методы расчета параметров горячей прокатки и прогнозирования показателей качества продукции [1,2]. На основе полученных результатов Институт разрабатывал технологические задания на проектирование новых и реконструкцию действующих станов горячей прокатки. В частности, широкополосных станов горячей прокатки (ШСГП) 1450, 2500 и 2000 Магнитогорского металлургического комбината, 1700 Карагандинского металлургического комбината, комбинированного стана 2800/1700 Череповецкого металлургического комбината и др. Эта работа проводилась в сотрудничестве с металлургическими комбинатами, проектными организациями и Новокраматорским машиностроительным заводом.

В частности, Институт в сотрудничестве с Укрспромезом разрабатывал технологические задания и технико-экономические обоснования реконструкции ШСГП 1680 ОАО «Запорожсталь», строительства нового стана 2000 и литейно-прокатного модуля на этом комбинате, строительства литейно-прокатного модуля на Днепропетровском металлургическом заводе им. Петровского, реконструкции и строительства ряда широкополосных станов за рубежом (Ливия, Пакистан и др.). Не все из этих проектов реализованы. В тоже время осуществляется реконструкция ШСГП 1680 в соответствии с разработанными технологическими заданиями на реконструкцию чистовой группы клетей и на реконструкцию головной части стана для перехода на

прокатку непрерывнолитых слябов. Второе задание разработано совместно с НПО «ДОНИКС».

**Постановка задачи.** В настоящее время наиболее перспективным направлением развития производства горячекатаных полос является обеспечение высокого качества тонкого проката (0,8–2,0 мм), который может использоваться взамен более дорогого холоднокатаного. Применение тонких горячекатаных полос в качестве подката при производстве сверхтонких холоднокатаных полос, позволяет значительно удешевить себестоимость последних (минимум на 20%) [3,4]. Однако такого рода замена возможна лишь в том случае, когда горячекатаный прокат будет полностью удовлетворять ряду технологических требований, в частности, иметь удовлетворительную микроструктуру и требуемый уровень механических свойств.

Микроструктура горячекатаных полос толщиной 2 мм и менее, произведенных на отечественных станах, зачастую характеризуется значительной разнотернистостью (крупное зерно на поверхности), что приводит при использовании такого металла для холодной штамповки к образованию так называемой «апельсиновой корки». Разнотернистость снижает пластичность металла. Например, относительное удлинение снижается примерно в 1,2 раза [5]. Основной причиной разнотернистости тонких полос является окончание деформации при температурах, соответствующих двухфазной аустенитно–ферритной области (ниже  $A_{T3}$ ).

Поскольку станы горячей прокатки существенно различаются между собой по конструкции (по количеству и расположению клетей, моталок, длине промежуточных и отводящих рольгангов, мощности главных приводов и др.), технология производства на них листовой продукции даже одинакового сортамента неодинакова. Технологические решения, эффективные для одного стана, часто оказываются неприемлемыми для другого [6].

**Целью данной работы** является выбор рациональных схем производства тонких горячекатаных полос с необходимой структурой и свойствами с учетом особенностей конструкции различных широкополосных станов горячей прокатки.

**Методика исследования.** Все существующие в настоящее время основные конструкции станов горячей прокатки широких полос можно разделить на три типа (рис.1):

1. Широкополосные станы горячей прокатки, включающие черновую группу клетей различной конструкции и чистовую непрерывную группу, состоящую из пяти, шести или семи клетей.
2. Станы с печными моталками (Стеккеля).
3. Литейно–прокатные агрегаты различной конструкции.

В зависимости от типа стана горячей прокатки возможны различные схемы производства тонких горячекатаных полос. Основные проанализированные схемы приведены в табл.1.

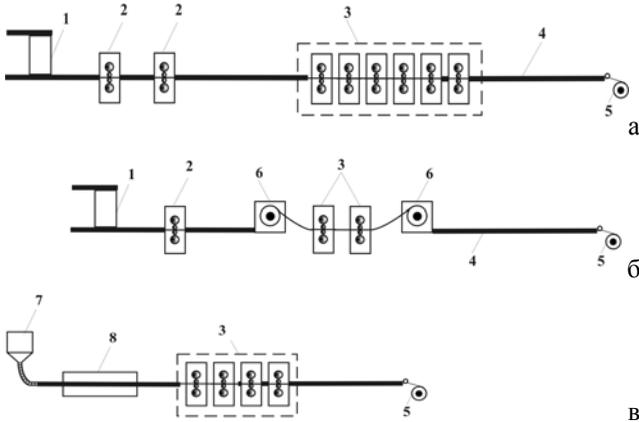


Рис.1. Основные типы станов горячей прокатки полос. а – широкополосный стан, б – стан с печными моталками, в – литейно–прокатный агрегат. 1 – нагревательные печи, 2 – клети черновой группы, 3 – клети чистовой группы, 4 – отводящий рольганг, 5 – моталка, 6 – печные моталки, 7 – установка непрерывной разливки тонких слябов, 8 – печь для выравнивания температуры слябов.

Таблица 1. Схемы производства тонких горячекатаных полос

| Номер схемы | Основные технологические операции                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I           | Прокатка полос на станах горячей прокатки различного типа с окончанием деформации в аустенитной области                                                                                                                                                                                     |
| II          | Прокатка полос на станах горячей прокатки различного типа с окончанием деформации в двухфазной аустенитно–ферритной области → нормализация                                                                                                                                                  |
| III         | Прокатка полос на станах горячей прокатки различного типа с окончанием деформации в двухфазной аустенитно–ферритной области с повышенными обжатиями в последних проходах и применением технологической смазки → отжиг                                                                       |
| IV          | Прокатка полос до промежуточной толщины на станах горячей прокатки различного типа с окончанием деформации в аустенитной области → прокатка до конечной толщины в верхнем температурном интервале ферритной области в клетях, установленных в линии станов за отводящим рольгангом, → отжиг |
| V           | Прокатка полос до промежуточной толщины на станах горячей прокатки различного типа с окончанием деформации в аустенитной области → прокатка до конечной толщины в верхнем температурном интервале ферритной области в клетях, установленных вне линии станов, → отжиг                       |
| VI          | Прокатка полос до промежуточной толщины на станах с печными моталками с окончанием деформации в аустенитной области → прокатка до конечной толщины в верхнем температурном интервале ферритной области в чистовой группе клетей этого же стана → отжиг                                      |

При анализе схем использовали установленные в Институте черной металлургии основные закономерности формирования структуры и текстуры тонких полос после их деформации в аустенитной, двухфазной аустенитно–ферритной областях и верхнем температурном интервале ферритной области (650–700<sup>0</sup>С), в том числе с последующей термической обработкой [7,8]. Кроме того, применяли математические модели температурно–скоростных и энергосиловых параметров прокатки и прогнозирования показателей качества проката [2,9,10]. Расчеты выполнены для полос шириной 1000 мм из стали 08пс с содержанием углерода 0,05%. Для полос иной ширины температурные режимы не изменяются, а энергосиловые параметры прокатки изменяются пропорционально ширине. Для других марок стали необходимо учитывать влияние химического состава на температуру  $A_{r3}$ .

### **Изложение основных материалов исследования.**

Результаты расчетов показали, что прокатка на типовых широкополосных станах (схема I) гарантирует окончание деформации в аустенитной области только полос толщиной 2,5 мм и более. Применение экранирования раскатов на промежуточном рольганге или технологии смотки раскатов на промежуточном рольганге (coilbox) позволяет обеспечить деформацию в аустенитной области полос толщиной более 2 мм. При прокатке полос меньшей толщины деформация в последних клетях будет осуществляться в двухфазной аустенитно–ферритной области. Таким образом, типовые широкополосные станы не позволяют прокатывать в аустенитной области полосы толщиной 1,2–1,5 мм, которые могут пользоваться наибольшим спросом для замены холоднокатаного металла.

Станы с печными моталками, в состав которых входит одна чистовая клеть, обеспечивают прокатку в аустенитной области полос толщиной более 2 мм. Однако станы с двухклетевой чистовой группой позволяют обеспечивать прокатку в аустенитной области полос толщиной 1,2–1,5 мм. Литейно–прокатные агрегаты вследствие малой толщины непрерывнолитых слябов (30–70 мм), а также высокой их температуры (1150–1250<sup>0</sup>С), позволяют производить прокатку в аустенитной области полос из низкоуглеродистой стали типа 08пс, 08Ю минимальной толщиной 1,0–1,2 мм.

Благоприятную для холодной штамповки структуру проката, деформированного в двухфазной аустенитно–ферритной области, можно получить путем его нормализации с температурой выдержки 1000<sup>0</sup>С (схема II). Однако расход энергии на эту термообработку составит ориентировочно 1200–1500 МДж/т. Для сравнения расход энергии на нагрев слябов перед прокаткой на широкополосном стане составляет 2000–3500 МДж/т, а на деформацию в клетях стана – 250–300 МДж/т.

Для обеспечения равномерной структуры проката, деформированного в двухфазной области, возможно также применение пониженных температур смотки (менее 500–450<sup>0</sup>С) или охлаждение проката на воздухе. Од-

нако для реализации низкотемпературной смотки потребуется реконструкция отводящего рольганга и моталок. В тоже время металл, полученный по данному варианту технологии, хотя и будет иметь равномерную структуру, однако найдет ограниченное применение из-за пониженной пластичности. Применение отжига для повышения пластичности данного металла нецелесообразно, так как приведет к возникновению разнородности.

Для формирования благоприятной структуры тонких полос после деформации в двухфазной области целесообразно применять повышенные обжатия в последних проходах и/или технологическую смазку (схема III). При прокатке полос на действующих широкополосных станах применяют пониженные обжатия в последних двух проходах (20–25% в предпоследней клетки и 10–17% в последней). Это связано с необходимостью регулирования плоскостности проката, а также ограничениями энергосиловых параметров оборудования. Применение повышенных обжатий в двух последних клетях приводит к увеличению энергосиловых параметров прокатки в 1,4–1,6 раза. Использование технологической смазки позволяет уменьшить значения энергосиловых параметров. Их увеличение по сравнению с базовым вариантом составит 1,2–1,4 раза. Однако, даже в этом случае потребуется реконструкция действующих клетей, а в некоторых случаях и замена их привода. Потребуется также установка более эффективных систем управления плоскостностью полос. Металл, произведенный по данной схеме, требует отжига. Ориентировочные затраты энергии на отжиг – 400–500 МДж/т.

Схемы IV и V предусматривают прокатку полос до промежуточной толщины в аустенитной области с последующей их докаткой в верхнем температурном интервале ферритной области. Причем, по схеме IV деформация в ферритной области осуществляется в клетях, установленных в линии станов горячей прокатки за отводящим рольгангом. По схеме V деформация в ферритной области осуществляется в клетях, установленных вне линии станов горячей прокатки. Промежуточная толщина проката определяется типом стана горячей прокатки. Как показано выше, для типовых широкополосных станов она должна составлять не менее 2,0–2,5 мм что гарантирует окончание деформации их в аустенитной области. Для двухклетевых станов с печными моталками – не менее 1,4 мм, литейно-прокатных агрегатов – не менее 1,2 мм.

Преимущество отдельно стоящих клетей заключается в гибкости технологии, однако этот вариант требует установки печей-накопителей рулонов. Расположение клетей для ферритной прокатки в линии станов, в принципе, позволяет работать без накопителей рулонов, либо с их количеством, рассчитанным только для аварийных остановок стана. Однако при этом клетки для ферритной прокатки должны обеспечивать весьма высокие скорости прокатки, особенно на типовых широкополосных станах. Расчеты показали, что для реализации схем IV и V клетки для феррит-

ной прокатки должны обеспечивать параметры, приведенные в табл.2. Энергосиловые параметры рассчитаны для прокатки с применением технологической смазки. Станы с печными моталками позволяют применять в последнем проходе пониженную по сравнению с ШСГП скорость прокатки, что позволяет снизить мощность привода клетей для ферритной прокатки на 15–25%.

Таблица 2. Рассчитанные параметры клетей для ферритной прокатки

| Наименование параметров   | Отдельно стоящая клеть | Клеть, установленные в линии ШСГП (2 шт.) |
|---------------------------|------------------------|-------------------------------------------|
| Скорость прокатки, м/с    | 5–10                   | 20–30                                     |
| Усилие прокатки, МН/м*    | 20–30                  | 20–30                                     |
| Момент прокатки, МН·м/м*  | 0,3–0,4                | 0,3–0,4                                   |
| Мощность прокатки, МВт/м* | 7–10                   | 10–15                                     |

Примечание. \* – значения приведены на метр ширины полосы.

Литейно–прокатные агрегаты, в силу своей компактности и более низких по сравнению с широкополосными станами и станами с печными моталками скоростей прокатки, позволяют производить особо тонкие полосы с окончанием деформации в верхнем температурном интервале ферритной области. Выполненные расчеты позволяют рекомендовать следующую схему производства: прокатка в трехклетевой группе при температурах, соответствующих аустенитной области, до толщины 3–6 мм, охлаждение полос до температур 650–700 °С в установке ускоренного охлаждения, выдержка в течение 2–5 с во время транспортировки по рольгангу для выравнивания температуры по сечению проката, прокатка в трех– четырехклетевой группе до конечной толщины в верхнем интервале температур ферритной области. Рулоны проката подвергаются отжигу. Такая схема позволяет производить прокат минимальной толщиной 0,8–1,0 мм, в том числе из особо низкоуглеродистых сталей.

Станы с печными моталками при соответствующем дооборудовании можно использовать не только для прокатки полос в аустенитной области, но и для прокатки в верхнем температурном интервале ферритной области (схема VI). Для этого процесса в наибольшей степени подходят станы с двухклетевой чистой группой. Путем прокатки в ферритной области за один двоянный проход может быть достигнута минимальная толщина полос 0,8–1 мм. Для реализации ферритной прокатки необходимо предусмотреть накопители–термостаты рулонов, а также разматыватель, устанавливаемый перед чистой группой стана.

**Выводы.** Проведенный анализ показал, что для производства тонких горячекатаных полос из низкоуглеродистой стали в зависимости от их толщины и типа стана горячей прокатки можно рекомендовать технологические схемы, приведенные в табл.3.

Таблица 3. Рекомендуемые схемы производства тонких горячекатаных полос в зависимости от типов станов горячей прокатки.

| Тип стана горячей прокатки            | Толщина полос, мм | Рекомендуемые схемы производства |              |
|---------------------------------------|-------------------|----------------------------------|--------------|
|                                       |                   | Рациональные                     | Допустимые   |
| Широкополосный стан                   | $\geq 2,0$        | Схема I                          | –            |
|                                       | 1,5–2,0           | Схема V                          | Схема III    |
|                                       | 1,2–1,5           | Схема V                          | –            |
| Двухклетевой стан с печными моталками | $\geq 1,2–1,5$    | Схема I                          | –            |
|                                       | 0,8–1,2           | Схема VI                         | Схемы V и IV |
| Литейно–прокатный агрегат             | $\geq 1,0–1,2$    | Схема I                          | –            |
|                                       | 0,8–1,0           | Схема IV                         | Схема V      |
|                                       | 0,5–0,8           | Схема V                          | –            |

1. Воробей С.А. Основные направления развития производства горячекатаной широкополосной стали // Черная металлургия. Наука–технология–производство: Сб. научн. тр. – М.: Металлургия, 1989. – С. 229–231.
2. Надежность технологического процесса производства листового проката / В.Л.Мазур, С.А.Воробей, Д.Л.Романовский и др. – К.: Техника, 1992. – 170 с.
3. Повышение качества листового проката / В.Л.Мазур, А.П.Качайлов, В.Г.Иванченко и др. – К.: Техника, 1979. – 143 с.
4. Новейшая технология производства горячекатаной полосы / В.Бальд, Г.Кнеппе, Д.Розендаль и др. // Черные металлы, 2000. – №2. – С. 36–44.
5. Алдунин А.В. Основные принципы оптимизации процессов горячей прокатки полос по структуре и пластичности металла // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия, 2008. – № 5. – С.23–26.
6. Выбор технологических режимов горячей прокатки тонких полос / В.Л.Мазур, Л.А.Чмелев, В.А.Мазур и др. // Сталь, 1984. – № 3. – С. 37–40.
7. Особенности формирования структуры листового проката при деформации в двухфазной аустенитно–ферритной области // Г.В.Левченко, С.А.Воробей, А.М.Нестеренко и др. // Теория и практика металлургии. – 2007. – № 4–5. – С. 107–111.
8. Вплив режимів гарячої прокатки на структуру– і текстуроутворення в листовому прокаті низьковуглецевої сталі / Г.В.Левченко, С.О.Воробей, А.М.Нестеренко та ін. // Металознавство та обробка металів. – 2007. – № 4. – С. 24–29.
9. Воробей С.А., Левченко Г.В. Особенности расчета энергосиловых параметров горячей прокатки тонких полос // Теория и практика металлургии. – 2007. – № 2–3. – С. 86–91.
10. Воробей С.А. Прогнозирование размера зерен аустенита при горячей деформации стали // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр.ИЧМ. – Днепропетровск.– 2008. – Вып. 18. – С.222–232.

*Статья рекомендована к печати:  
ответственный редактор  
раздела «Прокатное производство»  
канд.техн.наук И.Ю.Приходько  
рецензент канд.техн.наук Л.Г.Тубольцев*

*С.О.Воробей, О.М.Степаненко, Г.В.Левченко, Т.В.Гріцай*

**Раціональні схеми виробництва тонких гарячекатаних смуг з низьковуглецевої сталі**

Метою роботи є вибір раціональних схем виробництва тонких гарячекатаних смуг з необхідною структурою та властивостями на ширококугових станах гарячого прокатування. Наведено результати дослідження різних схем виробництва тонких гарячекатаних смуг з низьковуглецевої сталі для холодного штампування. З позицій отримання мікроструктури запропоновано раціональні схеми виробництва гарячекатаних смуг залежно від їх товщини та типу стану гарячого прокатування.