

**№ 2120**

А.Д. Зобнин  
Н.А. Чиченев

# **Технологические основы проектирования прокатных комплексов**

Технология производства отдельных  
видов проката

Учебное пособие

Кафедра инжиниринга технологического оборудования

А.Д. Зобнин

Н.А. Чиченев

# **Технологические основы проектирования прокатных комплексов**

Технология производства отдельных  
видов проката

Учебное пособие

Допущено учебно-методическим объединением по образованию  
в области металлургии в качестве учебного пособия  
для студентов высших учебных заведений, обучающихся  
по направлению Металлургия



Москва 2013

УДК 621.742  
3-78

Рецензент  
д-р техн. наук, проф. *В.А. Трусов*

**Зобнин, А.Д.**

3-78      Технологические основы проектирования прокатных комплексов : технология производства отдельных видов проката : учеб. пособие / А.Д. Зобнин, Н.А. Чиченев. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2013. – 154 с.  
ISBN 978-5-87623-651-7

Дана общая характеристика прокатного производства, приведен сортамент и назначение прокатных изделий. Рассмотрены особенности технологии и оборудования для производства заготовок, горячекатаных и холоднокатаных полос. Дан анализ факторов, влияющих на режим деформирования при прокатке. Даны примеры выбора технологии и расчетов силовых параметров прокатки.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальности 150404 «Металлургические машины и оборудование» и направлениям подготовки бакалавров 150400 «Металлургия» и 151000 «Технологические машины и оборудование». Оно может быть использовано при проведении практических занятий и выполнении курсовых и дипломных проектов, а также полезно инженерам-технологам для разработки рациональных режимов получения качественного проката и для инженеров-механиков, занимающихся эксплуатацией прокатных станов.

**УДК 621.742**

**ISBN 978-5-87623-651-7**

© А.Д. Зобнин,  
Н.А. Чиченев, 2013

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |     |
|---|-----|
| Предисловие.....  | 4   |
| Условные обозначения.....   | 5   |
| Введение.....   | 6   |
| 1. Характеристика прокатного производства.....  | 7   |
| 2. Сортамент и назначение прокатных изделий .....   | 11  |
| 3. Технология и оборудование для производства заготовок .....                             | 18  |
| 3.1. Подготовка исходных материалов к прокатке.....                                       | 18  |
| 3.2. Нагрев слитков перед прокаткой .....   | 21  |
| 3.3. Производство блюмов и слябов .....   | 28  |
| 4. Технология и оборудование для производства горячекатаных<br>полос и листов.....        | 38  |
| 4.1. Общие сведения .....   | 38  |
| 4.2. Исходные материалы и нагрев их перед прокаткой.....                                  | 39  |
| 4.3. Прокатка листов и плит на толстолистовых станах .....                                | 44  |
| 4.4. Прокатка листовой стали на непрерывных<br>и полунепрерывных станах.....              | 54  |
| 4.5. Перспективы развития широкополосных станов<br>горячей прокатки .....                 | 59  |
| 5. Тонкослябовые литейно-прокатные агрегаты (ЛПА)<br>для производства стальных полос..... | 63  |
| 5.1. Предпосылки создания ЛПА .....   | 63  |
| 5.2. Проблемы совмещения процессов непрерывного литья<br>и прокатки .....                 | 65  |
| 5.3. Классификация тонкослябовых ЛПА .....  | 66  |
| 5.4. Варианты технологических линий тонкослябовых ЛПА .....                               | 73  |
| 5.5. Литейно-прокатные агрегаты с прямым литьем полосы .....                              | 82  |
| 6. Технология и оборудование для производства<br>холоднокатаных полос .....               | 87  |
| 6.1. Подготовка исходных материалов к прокатке.....                                       | 87  |
| 6.2. Холодная прокатка тонколистовой стали .....  | 90  |
| 6.3. Термическая обработка и отделка холоднокатаных полос.....                            | 95  |
| 7. Качество проката и технический контроль .....  | 98  |
| 8. Факторы, влияющие на режим деформирования при прокатке...                              | 102 |
| 9. Примеры выбора технологии и расчет силовых<br>параметров прокатки.....                 | 111 |
| 9.1. Расчет режима деформации на широкополосном стане<br>горячей прокатки .....           | 111 |
| 9.2. Примеры расчета усилия и момента прокатки .....                                      | 123 |
| Библиографический список .....  | 153 |

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Развитие экономики России требует повышения уровня производства металлов при одновременном улучшении их качества. Успешное решение этой проблемы во многом зависит от эффективных технологий металлургического производства и применяемого для их осуществления механического оборудования. Поэтому подготовка специалистов в области металлургических машин и оборудования является стратегически важной задачей, необходимой для обеспечения национальной безопасности страны.

При подготовке инженеров-механиков по специальности 150404 «Металлургические машины и оборудование» проблемы по выбору рациональной конструкции прокатных станов и определению оптимальных технологических режимов пластического формоизменения металла рассматриваются в дисциплинах, посвященных теории и технологии процессов прокатки. Данное учебное пособие написано в соответствии с программой курса «Технологические основы проектирования прокатных комплексов», которые авторы читают в НИТУ «МИСиС» в течение нескольких лет.

Дана общая характеристика прокатного производства, приведен сортамент и назначение прокатных изделий. Рассмотрены особенности технологии и оборудования для производства заготовок, горячекатаных и холоднокатаных полос. Дан анализ факторов, влияющих на режим деформирования при прокатке. Даны примеры выбора технологии и расчетов силовых параметров прокатки.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальности 150404 «Металлургические машины и оборудование» и направлениям подготовки бакалавров 150400 «Металлургия» и 151000 «Технологические машины и оборудование», и может быть использовано при проведении практических занятий и выполнении курсовых и дипломных проектов.

## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

|                  |   |                                    |
|------------------|---|------------------------------------|
| $A$              | – | площадь                            |
| $a$              | – | плечо крутящего момента прокатки   |
| $B, b$           | – | ширина                             |
| $C$              | – | коэффициент (общее обозначение)    |
| $D, d$           | – | диаметр                            |
| $F$              | – | усилие                             |
| $f$              | – | коэффициент трения                 |
| $H, h$           | – | толщина                            |
| $L, l$           | – | длина                              |
| $M$              | – | момент                             |
| $p$              | – | давление                           |
| $R, r$           | – | радиус                             |
| $T, t$           | – | температура                        |
| $U, u$           | – | скорость деформации                |
| $v$              | – | скорость                           |
| $\alpha$         | – | угол захвата полосы валками        |
| $\beta, \varphi$ | – | угол                               |
| $\varepsilon$    | – | относительное обжатие              |
| $\eta$           | – | коэффициент обжатия                |
| $\lambda$        | – | коэффициент вытяжки                |
| $\mu$            | – | коэффициент трения                 |
| $\xi$            | – | коэффициент уширения               |
| $\sigma$         | – | нормальное напряжение              |
| $\tau$           | – | касательное напряжение, время      |
| $\psi$           | – | коэффициент плеча момента прокатки |

## **ВВЕДЕНИЕ**

Листовая и сортовая сталь являются основными конструкционными материалами, которые широко применяются в различных отраслях народного хозяйства, таких как машиностроение, строительство, транспорт, авиация и др. Поэтому в современных условиях становится понятной важность задач и ответственность металлургической промышленности за обеспечение предприятий и организаций страны высококачественной металлопродукцией.

Перед прокатчиками поставлена цель значительного расширения сортамента, увеличения производства низколегированных сталей и сплавов со специальными свойствами, а также цветных металлов и сплавов, увеличения выпуска холоднокатаного проката, обладающего высокоточными размерами и эффективными служебными характеристиками. В планах развития металлургической промышленности намечено строительство новых цехов и отделений прокатки листовой и сортовой стали, а также реконструкция ряда действующих прокатных станов с целью внедрения более эффективных способов производства.

Производство проката высокого качества предопределяет глубокое понимание обслуживающим персоналом сущности теоретических основ обработки металлов давлением и осуществления технологии процесса прокатки. Это в не меньшей мере относится и к специалистам, которые занимаются проектированием прокатного оборудования. Поэтому в основную образовательную программу подготовки инженеров-механиков по специальности 150404 «Металлургические машины и оборудование» введена дисциплина «Технологические основы проектирования прокатных комплексов».

# 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Через прокатные цехи проходит почти вся сталь, выплавляемая в сталеплавильных цехах, и только небольшое ее количество – через литейные и кузнечные цехи.

Методом прокатки получают изделия самой разнообразной формы: тонкие и толстые листы, профили квадратного и круглого сечений, уголки, швеллеры, двутавровые балки, рельсы, трубы и многое другое. При прокатке листов применяются валки, рабочая часть (бочка) которых имеет форму круглого цилиндра без каких-либо вырезов и выступов. Прокатку в таких валках часто называют *прокаткой на гладкой бочке*.

При производстве рельсов, швеллеров, двутавровых балок и другого проката различной конфигурации применяют калиброванные валки, которые имеют вырезы по форме прокатываемого продукта. Такая прокатка называется *прокаткой в калибрах*.

Технологический процесс получения готового проката является завершающей стадией металлургического производства. Основной задачей этого процесса является получение проката заданных размеров и формы в максимально возможном количестве и с наименьшими затратами, а также высокого качества, которое характеризуется не только его физико-механическими свойствами, но и состоянием поверхности. Это может быть выполнено только при точном соблюдении режима всех технологических операций при производстве проката данного вида.

Число операций, входящих в технологический процесс прокатки, зависит от требований, предъявляемых к точности профиля, физико-механическим свойствам, состоянию поверхности, макро- и микроструктуре. Чем выше эти требования, тем сложнее и из большего числа операций состоит технологический процесс.

Основными операциями технологического процесса прокатного производства являются: подготовка исходных материалов к прокатке; нагрев этих материалов перед прокаткой; прокатка; отделка, включая резку, охлаждение, правку, удаление поверхностных дефектов, термическую обработку и др.

На рис. 1.1 приведены основные схемы производства проката из углеродистой и легированной стали в современных прокатных цехах.



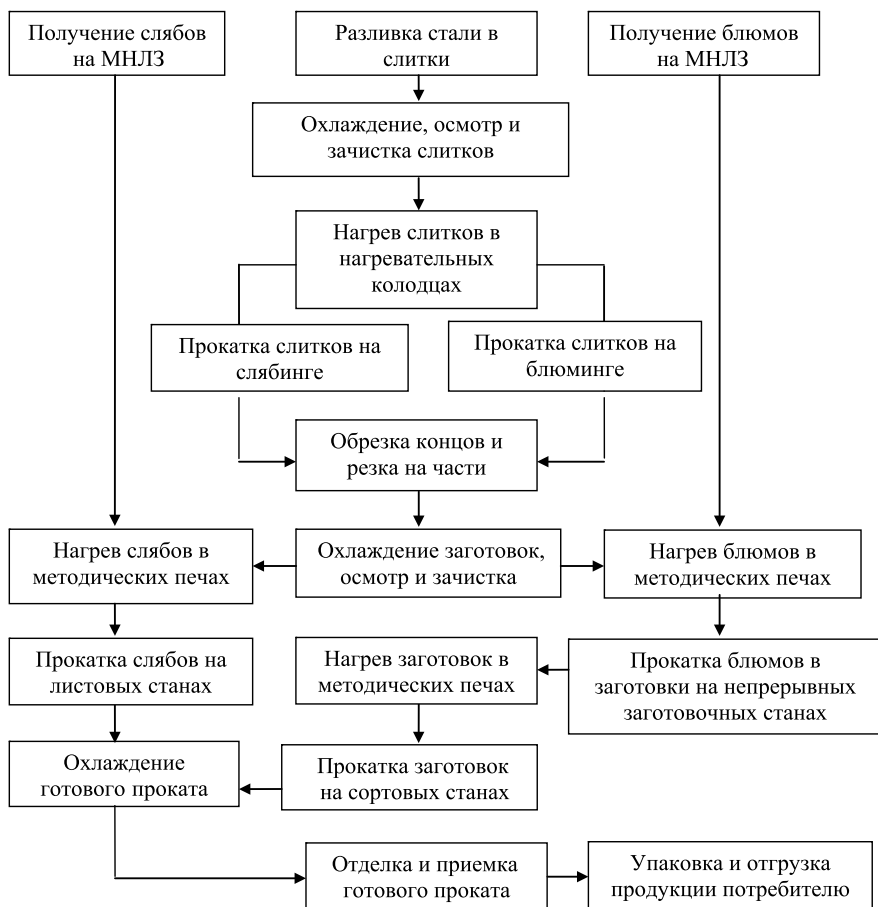


Рис. 1.1. Схема производства готового проката в прокатных цехах

Исходный материал для прокатного производства – слитки и литые заготовки, которые имеют поперечное сечение квадратной или прямоугольной формы, и в некоторых случаях – круглой (при производстве труб, колес и бандажей). Сталеплавильные цехи в этом случае являются непосредственным поставщиком исходного материала для большинства прокатных станов.

Экономические соображения заставляют сталеплавильные цехи отливать крупные слитки большой массы, что невыгодно для некоторых типов прокатных станов. В связи с этим сталеплавильщики передали роль поставщика исходного материала для каждого отдель-

ного стана прокатному цеху. В прокатном цехе при переходе на крупные слитки увеличилась производительность стана и выход годной заготовки, стал ниже угар металла при нагреве вследствие того, что окисляющаяся поверхность у больших слитков меньше. Таким образом, возникла необходимость установки мощных заготовочных станов, на которых поперечное сечение крупных слитков уменьшается до размеров исходного материала применительно к станам, выпускающим готовый прокат.

С 1970-х годов на металлургических заводах начали широко применять способ непрерывного литья, осуществляемый с помощью специального агрегата – машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Жидкую сталь из расположенного наверху ковша большой емкости непрерывно подают в два–четыре медных водоохлаждаемых кристаллизатора с квадратным или прямоугольным сквозным отверстием (рис. 1.2).

По выходе из кристаллизатора слитки вторично охлаждаются водой, их разрезают на мерные длины (6...12 м) и направляют в виде блюмов или слябов на склад или без дополнительного подогрева – на станы для дальнейшей прокатки.

Действующие МНЛЗ имеют от одного до восьми ручьев, чаще всего 2–4. Максимальные размеры сечений отливаемых заготовок: для слябов – до 350×2500 мм, для квадратных профилей 350×350 мм. Скорость выхода полосы составляет 0,5...5 м/мин; производительность МНЛЗ в пересчете на один ручей 300...500 т/ч.

Большие преимущества производства заготовок методом непрерывного литья перед слитками, отлитых в изложницах, заключаются в следующем:

- значительно сокращается весь производственный цикл, в плавильных цехах ликвидируется парк изложниц;
- устраняется сложное и дорогостоящее оборудование блюминга, слябинга и заготовочного стана;
- на 10...20 % увеличивается выход годного, так как устраняется концевая обрезь раскатов при прокатке слитков на обжимных станах;
- структура отливаемых заготовок получается более плотной и однородной, чем структура крупных слитков; в связи с этим повышаются и становятся более равномерными механические свойства изделий, прокатываемых из непрерывно-литой заготовки;
- получаемые на МНЛЗ заготовки по качеству поверхности значительно превосходят слитки, отливаемые в изложницы.

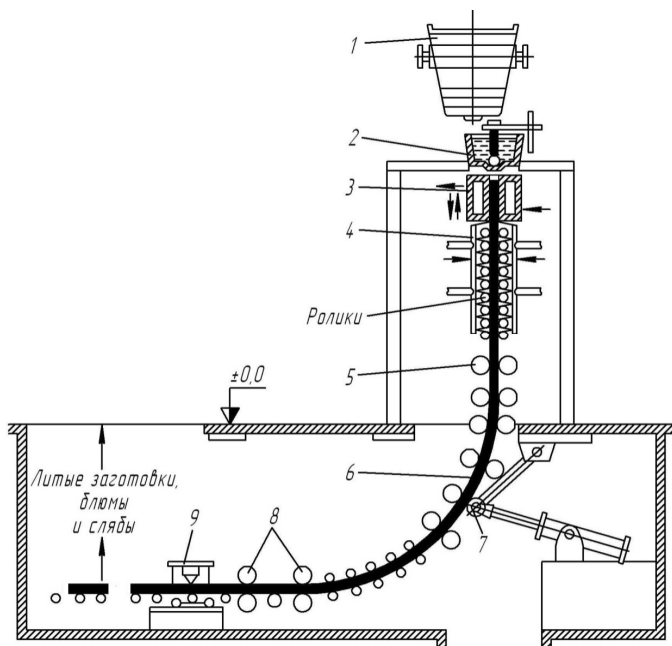


Рис. 1.2. Схема машины непрерывного литья заготовок радиального типа: 1 – ковш с жидким металлом; 2 – промежуточный ковш; 3 – медный водоохлаждаемый кристаллизатор; 4 – система вторичного охлаждения; 5 – поддерживающие и тянущие ролики; 6 – непрерывно литой слиток; 7 – изгибающий ролик; 8 – правильно-тянущие ролики; 9 – передвижное устройство для поперечной резки горячей заготовки

### ***Вопросы для самопроверки***

1. Какие виды прокатной продукции производятся на металлургических предприятиях?
2. Назовите основные задачи, которые ставятся на завершающей стадии получения готового проката?
3. Что является исходным материалом для производства прокатной продукции?
4. Что представляет собой машина непрерывного литья заготовок?
5. Какие заготовки льются на МНЛЗ и чем они предпочтительнее заготовок сталеплавильного передела?

## 2. СОРТАМЕНТ И НАЗНАЧЕНИЕ ПРОКАТНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Форма поперечного сечения прокатываемой полосы называется *профилем*, который по длине изделия может быть постоянным или переменным (периодическим). Совокупность форм и размеров профилей, получаемых прокаткой на данном стане или группе станов, называется *сортаментом*.

В Российской Федерации все изделия, изготавливаемые прокаткой, стандартизированы ГОСТами. Различают стандарты на сортамент проката и на технические условия его поставки.

В стандартах на *сортамент проката* приведены размеры, площадь поперечного сечения, масса 1 м длины профиля и допускаемые отклонения от номинальных размеров. В стандартах на *профили* (балки, швеллеры и др.), применяемые для изготовления различных конструкций, кроме указанных данных, приведены также справочные величины: момент сопротивления, момент инерции, радиус инерции и др. Во всех стандартах на сортамент проката приведены также данные о длине поставляемых полос, допускаемых отклонениях по длине и др.

По мере износа валков размеры калибра, а следовательно, и размеры профиля, увеличиваются; они могут выйти за пределы допуска. Размеры профиля при прокатке изменяются также вследствие колебаний усилий прокатки, изменения температуры прокатываемого металла и т.п. При прокатке длинных полос невозможно обеспечить постоянство размеров профиля даже по длине одной полосы. Таким образом, допуски позволяют получать годный прокат в непрерывно изменяющихся условиях прокатки.

Прокатка с плюсовыми допусками приводит к излишнему расходу металла. Поэтому с целью экономии металла выгодно весь прокат выпускать с минусовыми допусками (прокатка на минус).

Обычно прокатку осуществляют с плюсовыми и минусовыми допусками. Чем больше поле допуска для данного профиля (разница между максимальными и минимальными размерами профиля), тем легче осуществить прокатку, так как в этом случае не требуется частая смена калибров и перевалки валков, а настройка стана существенно упрощается. Однако потребители в различных отраслях народного хозяйства заинтересованы в получении проката с меньшими отклонениями от номинальных размеров. В связи с этими требова-

ниями проводится работа по сокращению поля допусков главным образом за счет уменьшения плюсовых допусков. Это стало возможным благодаря вводу в эксплуатацию новых и модернизации действующих станов, достижениям в области автоматизации и механизации станов, совершенствованию технологии, повышению качества валков, а также общему повышению культуры производства.

Одной из важнейших задач является экономия металла, которая может быть достигнута как за счет применения экономичных (облегченных) профилей, так и за счет производства проката с минусовыми допусками и повышенной точностью.

Все это дает не только экономию металла, но и позволяет также уменьшить массу машин, механизмов, металлических конструкций и снизить себестоимость проката.

В стандартах на *технические условия* содержатся требования, предъявляемые к химическому составу стали, механическим свойствам, термической обработке, макро- и микроструктуре стали, поверхности прокатанного металла и другим качественным показателям прокатной продукции, а также указаны правила приемки, методы испытания, маркировки и прочее.

Все прокатные изделия в зависимости от формы можно разделить на четыре основных группы: 1) сортовую сталь; 2) листовую сталь; 3) трубы; 4) прочие виды проката.

**Сортовая сталь** – один из важнейших видов проката, сортамент которого является наиболее обширным. Она находит применение в различных отраслях народного хозяйства для изготовления деталей машин, станков, строительных и железобетонных конструкциях и т.д. В зависимости от назначения сортовую сталь делят на профили простой геометрической формы (рис. 2.1), к которым относятся круглые, квадратные, овальные, шестигранные, полосовые и др., и фасонные профили общего, отраслевого и специального назначения.

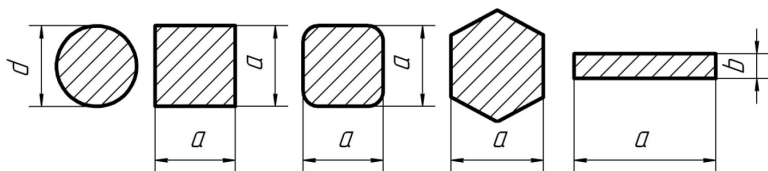


Рис. 2.1. Примеры сортовой стали общего назначения с простой геометрической формой

К *фасонным профилям общего назначения* относят угловую равнобокую и неравнобокую стали, швеллеры, балки и зетовый профиль (рис. 2.2, *а*). Эти профили широко применяют при изготовлении стальных конструкций, различных машин, промышленных сооружений, транспортных средств и т.д.

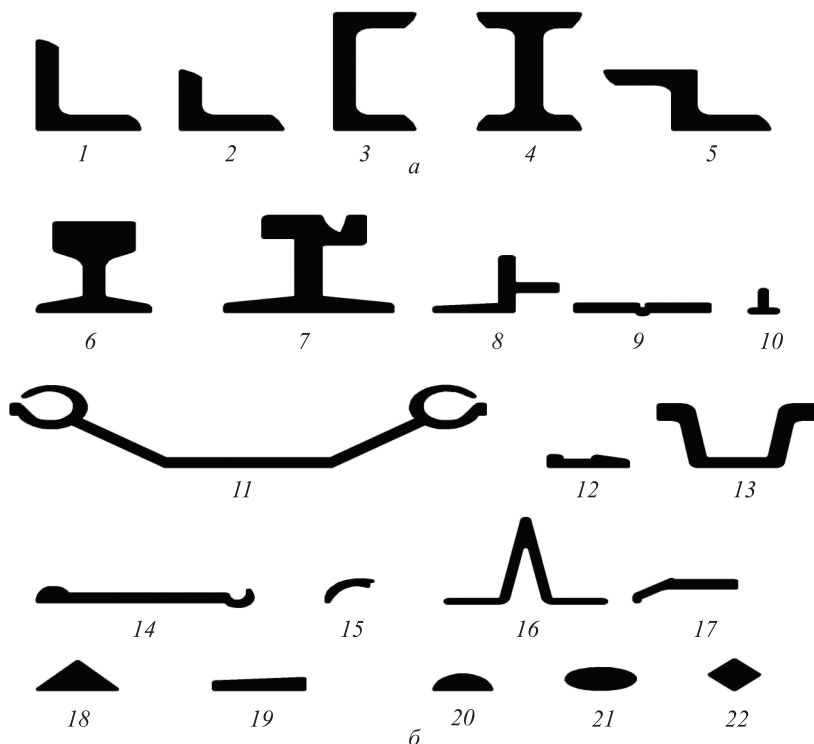


Рис. 2.2. Сортамент сортовой стали:

- а* – фасонная общего назначения, *б* – специального назначения;  
 1 – равнобокая угловая; 2 – неравнобокая угловая; 3 – швеллер;  
 4 – балка; 5 – зетовая; 6 – рельс железнодорожный; 7 – рельс трамвайный; 8 – зетобразный профиль; 9 – рессорный желобчатый;  
 10 – оконнорамный; 11 – шпунтовая свая; 12 – для колосниковых решеток; 13 – для шахтных креплений; 14 – для автомобильных ободов; 15 – для бортовых колес автомобилей; 16 – для тракторных шпор; 17 – для подбичников; 18 – трехгранный профиль;  
 19 – клиновидный; 20 – сегментный; 21 – овальный; 22 – ромбический

Большая часть профилей общего назначения не удовлетворяет требованиям отдельных отраслей промышленности, поэтому в каж-

дом конкретном случае разрабатывают такие профили, применение которых позволяет упростить конструкцию, уменьшить массу, сократить время и затраты на их изготовление.

К профилям *отраслевого назначения* относят рельсы для железнодорожного транспорта и профили, применяемые в автомобильной промышленности, тракторостроении, вагоностроении, строительстве и гидротехнических сооружениях, судостроении, сельскохозяйственном, химическом и нефтяном машиностроении, в энергетике и электротехнической промышленности и других отраслях. Примеры таких профилей приведены на рис. 2.2, б.

**Листовую сталь** в зависимости от толщины делят на две основные группы: толщиной более 4 мм относят к толстолистовой, а менее 4 мм – к тонколистовой стали.

*Толстолистовую сталь* толщиной от 4 до 160 мм из различных видов сталей и сплавов поставляют в горячекатаном состоянии для различных отраслей машиностроения, судостроения, предприятий авиационной промышленности, котлостроения, мостостроения, для железнодорожного транспорта и целого ряда других отраслей народного хозяйства. Ширина листов колеблется от 600 до 4000 мм. В некоторых случаях ширина листов может достигать 5200 мм при длине до 50 м.

Размеры холоднокатаной тонколистовой стали, регламентированные стандартом, отличаются от горячекатаных и изменяются по толщине от 0,2 до 4,0 мм. В стандарте также оговорены ширина и длина листов, а также допускаемые отклонения по толщине, ширине и длине листов.

Современными станами для горячей и холодной прокатки тонколистовой стали являются непрерывные станы. Толстолистовую сталь прокатывают на толстолистовых станах. Характерной особенностью листопрокатного производства является непрерывное увеличение доли холоднокатаной листовой стали в общем выпуске листовой стали.

Назначение тонколистовой стали весьма разнообразно.

Возросла потребность в холоднокатаной конструкционной тонколистовой стали толщиной 0,5...3,0 мм для автомобильной и тракторной промышленности. Эта листовая сталь подвергается глубокой вытяжке, поэтому она должна иметь бездефектную поверхность и достаточную ударную вязкость.

Наряду с общим увеличением производства листовой стали возрастает производство листовой нержавеющей стали, жести, трансформаторной стали и двухслойных сталей.