



Г.М. Шульгин



А.Г. Маншилин



С.М. Жучков



А.В. Кекух



В.Ф. Губайдулин



Д.П. Кукуй



М.А. Бабенко



А.А. Коринь



Л.В. Кулаков



Зарегистрирован
в Госкоминформ политики,
телевидения и радиовещания
Украины
КВ № 6985 от 18 февраля 2003 года.
Издаётся с июня 1993 года.

МЕТАЛЛ И ЛИТЬЕ УКРАИНЫ

Ежемесячный научно-технологический деловой журнал

№3-4'2003

Учредитель: Физико-технологический институт металлов и сплавов Национальной академии наук Украины (директор академик В.Л.Найдек, тел.424-35-15)

Издатели: Физико-технологический институт металлов и сплавов Национальной академии наук Украины. Институт черной металлургии Национальной академии наук Украины, Ассоциация литейщиков Украины, Украинская Ассоциация сталеплавильщиков

Г.М. Шульгин, А.Г.Маншилин, С.М.Жучков, А.В. Кекух, В.Ф. Губайдулин, Д.П.Кукуй, М.А.Бабенко, А.А.Коринь, Л.В. Кулаков

Создание и промышленная реализация высокоэффективных ресурсосберегающих технологий, основанных на применении процесса – многоручьевая прокатка-разделение

1. Современный уровень и тенденции развития производства заготовки, сортового и проволочного проката	3
2. Мировой опыт применения процесса прокатки-разделения сортовых профилей	4
3. Анализ, разработка и исследование способов продольного разделения многониточного раската в прокатных валках	6
4. Исследования течения металла при прокатке в многоручьевом калибре	19
5. Формоизменение и энергосиловые параметры при прокатке металла в многоручьевых калибрах	22
6. Теоретическое и экспериментальное исследования прокатки металла в многоручьевых калибрах	28
7. Расчет калибровок валков при двухручьевой прокатке-разделении	31
8. Исследование и реализация в промышленных условиях процесса прокатки-разделения	32
9. Перспективы применения процессов многоручьевой прокатки сортовых профилей и прокатки-разделения раскатов	44

редакционная коллегия

- Б.М.Бойченко** д.т.н, проф., зав. кафедрой Национальной металлургической академии Украины,
- В.И.Большаков** д.т.н., директор Института черной металлургии НАН Украины,
- С.С. Бродский** к.т.н., заслуженный работник промышленности, президент Украинской Ассоциации сталеплавателей,
- В.Б.Бубликов** д.т.н., проф., зав. отделом Физико-технологического института металлов и сплавов НАН Украины,
- М.И.Гасик** акад. НАН Украины. Национальная металлургическая академия Украины,
- С.П.Дорошенко** д.т.н., заслуженный проф. НТУУ "КПИ",
- С.С.Затуловский** д.т.н., проф., зав. отделом Физико-технологического института металлов и сплавов НАН Украины,
- Б.А.Кириевский** д.т.н., проф., зав. отделом Физико-технологического института металлов и сплавов НАН Украины,
- Г.Е. Клевцова** директор-издатель,
- Ю.В.Коновалов** д.т.н., проф. Донецкого Национального технического университета,
- В.Л. Мазур** д.т.н., проф., главный научный сотрудник Физико-технологического института металлов и сплавов НАН Украины,
- В.Л.Найдек** акад. НАН Украины, д.т.н., профессор, директор Физико-технологического института металлов и сплавов НАН Украины, председатель редколлегии журнала "Металл и литье Украины",
- В.А. Петренко** к.т.н., член-корр. АИН Украины, помощник ген. директора ОАО "ДМЗ им. Петровского",
- М.А.Поживанов** д.т.н., нач. главного управления внешнеэкономических связей и инвестиций Киевской государственной администрации,
- А.П.Прядко** к.и.н., главный редактор,
- Н.И.Тарасевич** д.т.н., зав. отделом Физико-технологического института металлов и сплавов НАН Украины,
- О.И.Шинский** д.т.н., профессор, зам. директора Физико-технологического института металлов и сплавов НАН Украины, президент Ассоциации литейщиков Украины

редакция

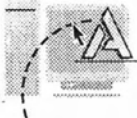


Главный редактор
Прядко
Анатолий Павлович



Директор-издатель
Клевцова Галина Евгеньевна

Макет
Сергей Цихмайстренко



Верстка
Диана Шкловская

адрес редакции и типографии

Ул. Хорива, 29, Украина, Киев, 04071
Тел./Факс: (044) 416-60-44
E-mail: uhlpress@nbi.com.ua

Формат 64 x 90/8
Печать
Тираж
Подписано
в печать
Заказ

Г.М. Шульгин доктор техн. наук, профессор, **А.Г. Маншилин**, генеральный директор НПО "Доникс", **С.М. Жучков**, докт. техн. наук, зав. отделом прокатного производства ИЧМ НАН Украины, **А.В. Кекух**, кандидат техн. наук, начальник технического управления КГГМК "Криворожсталь", **В.Ф. Губайдулин**, кандидат техн. наук, зам. проректора по научной работе ДонНТУ, **Д.П. Кукуй**, кандидат техн. наук, технический директор НПО "Доникс", **М.А. Бабенко**, главный прокатчик КГГМК "Криворожсталь"; **А.А. Коринь**, начальник Криворожского отделения НПО "Доникс", **Л.В. Кулаков**, кандидат техн. наук, ст. научн. сотр. ИЧМ НАН Украины

Создание и промышленная реализация высокоэффективных ресурсосберегающих технологий, основанных на применении процесса – многоручьевая прокатка-разделение

Описан эффективный ресурсосберегающий процесс, заключающийся в формировании в многоручьевых калибрах рабочих валков прокатного стана раската, состоящего из нескольких заготовок любой простой формы поперечного сечения, соединенных вдоль относительно толстой перемышкой. Продольное разделение многониточного раската осуществляется в разделяющем калибре прокатных валков или неприводном деформационно-делитальном устройстве. Показаны преимущества новой технологии прокатки-разделения перед "слиттинг-процессом". Представлены данные многолетних теоретических и экспериментальных исследований процесса прокатки-разделения в промышленных условиях и его эффективности. Приведены сведения о дальнейшем развитии процесса и расширении использования его в условиях прокатных цехов металлургических предприятий.

1. Современный уровень и тенденции развития производства заготовки, сортового и проволочного проката

Основной тенденцией развития производства заготовки для сортовых станов является получение ее на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Для ведущих производителей стали доля непрерывной разливки в общем объеме производства стальной заготовки составляет, % [1]:

Япония	96-97	Индия	42-43
США	93-94	Страны СНГ	35-37
Китай	54-55	Россия	45-50
Страны ЕС	95-96	Украина	20-22
Бразилия	72-74		

В настоящее время марочный сортамент разливаемых на МНЛЗ сталей охватывает практически всю продукцию прокатного производства: от рядовых до легированных и специальных сталей для изготовления рядового и конструкционного сортового проката, труб, рельсов, колес и т. д. Стремление повысить массу мотка привело к повышению массы заготовки за счет увеличения ее сечения и длины. Диапазоны размеров разливаемых квадратных заготовок для конкретных МНЛЗ обычно находятся в пределах: от 100x100 до 150x150мм, или от 120x120 до 200x200мм. Строительство МНЛЗ для литья заготовок со стороны сечения менее 100мм практически прекращено.

Высокое качество отливов на МНЛЗ заготовок обеспечивается наличием устройств защиты струй металла, вытекающих из сталеразливочного и промежуточного ковшей; применением в обоих ковшах устройств для взвешивания металла; согласованными режимами качения кристаллизатора; траектори-

ей возвратно-поступательного движения кристаллизатора; использованием в кристаллизаторе электромагнитного перемешивания жидкой сердцевинки отливаемых заготовок; пропорциональным обжатием заготовок при правке; равномерным охлаждением заготовок на холодильнике.

Производство сортового проката из непрерывнолитых заготовок, по сравнению с катаным, обеспечивает экономию металла до 20%, сокращение численности работающих, снижение сроков окупаемости при сооружении или модернизации новых предприятий, снижение энергозатрат. Усредненные показатели расхода ресурсов при производстве непрерывнолитых (слева от косой черты) и катаных (справа от косой черты) заготовок таковы, кг/т: жидкой стали 1050/1270; огнеупоров 9/15; условного топлива 10/75 [2].

Несмотря на это в ряде стран, в том числе и в Украине, сохраняется достаточно большая доля катаной заготовки, особенно для проволочных станов [3]. Технология традиционна: разливка стали в изложницы, нагрев слитков в нагревательных колодцах, прокатка либо в обжимно-заготовочных станах, либо на блюмингах и непрерывно-заготовочных станах.

Применяют технологии получения заготовки из непрерывнолитых слябов. Возможен простой способ получения заготовок из слябов - огневая продольная резка слябов. Он имеет два основных недостатка. Во-первых, дополнительные потери (до 1% от массы разрезаемого металла [2]) металла. Во-вторых, выход скоплений ликватов, раскатанных пор и неметаллических включений на поверхность раскатов. Кроме того, продольная резка крупногабаритных слябов связана с дополнительными энергетическими затратами и применением специального оборудования. По этим причинам описанный способ широкого распространения не получил.

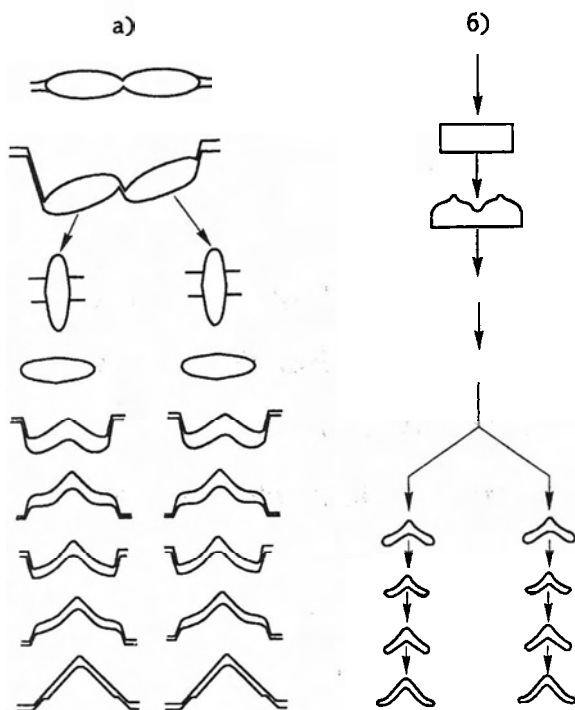


Рис. 1. Схема двухручьевого прокатки-разделения угловых профилей с продольным разделением раската на заготовки простой (а) или сложной (б) формы сечения.

вать только короткие слябы, а методических печей на блюмингах, на которых производят редуцирование слябов, нет. Ко всему этому процесс редуцирования требует дополнительных затрат энергии, труда, а главное – сохранения блюмингов. То-есть эта технология перспектив реализации не имеет.

Однако нельзя не учитывать то, что емкость сталеплавильных агрегатов продолжает увеличиваться. Это диктует необходимость применения шести- и даже восьмиручьевого МНЛЗ, оборудованных громоздкими промежуточными ковшами, что обуславливает разницу в температурах разливки стали по ручьям до 20°С. Поэтому полностью исключить вариант получения сортовых заготовок из непрерывнолитых блюмов большого сечения нельзя. В пользу этого свидетельствует опыт Белорусского металлургического завода [6].

2. Мировой опыт применения процесса прокатки-разделения сортовых профилей

Многоручьевая прокатка-разделение включает формирование из заготовки профилей, соединенных перемычкой (в калибрах, состоящих из двух и более расположенных рядом ручьев) и их последующее разделение в потоке прокатного стана. Разделенные профили могут, либо далее прокатываться одновременно в нескольких нитках в готовые профили, либо являться товарной продукцией данного стана.

Многочисленные схемы и варианты многоручьевого прокатки-разделения (МНР) по назначению можно разделить на три основные группы ее использования:

- для сочетания МНЛЗ с прокатным станом;
- для повышения производительности обжимных и заготовочных станов при прокатке слитков, отлитых в изложницы;
- для повышения производительности сортовых и проволочных станов, а также для производства несимметричных профилей в спаренном виде.

2.1. Спаренная прокатка несимметричных профилей в сдвоенном виде

Основная цель прокатки несимметричных профилей в сдвоенном виде - стабилизировать процесс прокатки, улучшить условия работы валков и прокатной клетки в целом.

В работе [7] сделан анализ этого процесса и представлены результаты освоения технологии на сортопрокатных станах ОАО "Донецкий металлургический завод". На этих станах был освоен процесс прокатки девяти несимметричных профилей в сдвоенном виде. Шесть из них освоено на стане 400. В частности, на этом стане освоена прокатка полособульбового профиля №6 с продольным разделением в горячем состоянии в валках чистой клетчи.

Освоение процесса спаренной прокатки, в сравнении с традиционной технологией, позволило в два раза увеличить массу заготовки и производительность стана, уменьшить расход валков и электроэнергии, стабилизировать процесс прокатки и захват металла. Однако, в настоящее время описанная технология прокатки не используется из-за необходимости выполнения дополнительных операций - правки проката, зачистки мест разделения и т.п.

2.2. Многоручьевая прокатка мелкого сорта, катанки и арматурных профилей

Известны две схемы двухручьевого прокатки-разделения раската. Первая схема предусматривает разделение раската на простые профили, в частности, овальные (рис. 1а), вторая - на сложные профили, приближающиеся по форме к готовому профилю проката (рис. 1б). Далее при использовании обеих схем разделенные профили пониточно прокатывают в готовый профиль. Реализация таких схем прокатки на существующих двухниточных мелкосортных станах с продольным разделением рас-

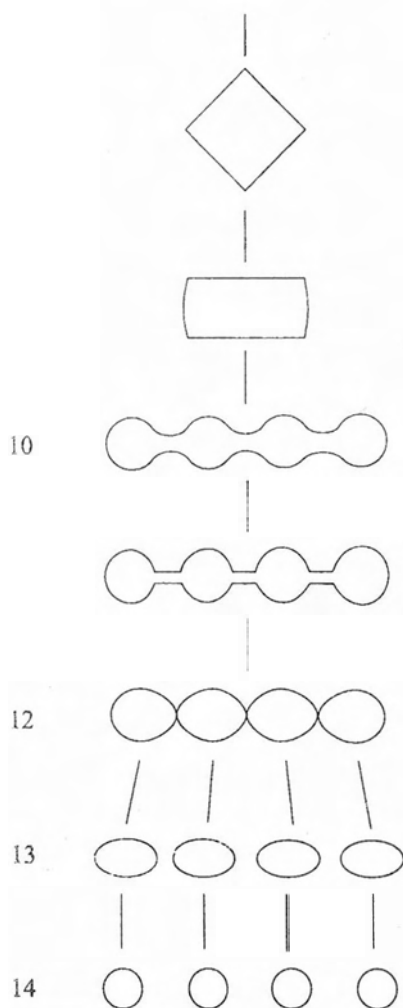


Рис. 2. Схема подготовки и деления раскатов по клетям (цифры на рисунке) стана.

Более перспективен способ предварительного создания перемычек на раскате в последующих местах разделения с помощью специальных гребней на валках [3]. Само разделение фигурного раската производят огневой резкой. Способ позволяет существенно снизить потери металла. Можно прогнозировать, что этот способ тоже широко распространения не получит, хотя в работе [4] указывается на его промышленное опробование.

Возможно получение сортовых заготовок редуцированием слябов [5]. Характерной особенностью редуцирования слябов является наличие значительных концевых накатов, что вызывает дополнительные потери металла. Кроме того, не решена проблема нагрева слябов. В колючках можно нагре-

РКН

5

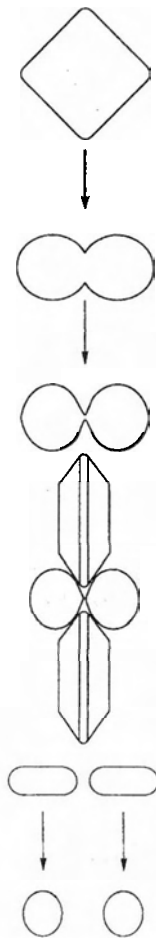


Рис. 3. Схема двухручьевого "слиттинг-процесса" арматурных профилей: 1 + 5 - номера пропусков (клетей); РКН - разделительные конические ролики.

Схема подготовки к делению и непосредственно деление раскатов в чистой группе клеток показана на рис. 2.

Технология многоручьевого прокатки-разделения сортовых профилей в сравнении с традиционной технологией может иметь следующие преимущества: снижение удельного расхода энергии; увеличение производительности прокатного стана при использовании максимально возможной скорости прокатки и, следовательно, уменьшение условно постоянных расходов по переделу, уменьшение удельного расхода валков и др. Удельный расход электроэнергии при двухручьевого прокатке-разделении арматурных профилей уменьшается на 12÷25 %, при четырехручьевого - до 30% [9].

2.3. Способы продольного разделения раскатов в горячем состоянии

Стремление увеличить производительность прокатного стана, снизить энергозатраты, а следовательно, и себестоимость продукции без значительных капитальных затрат на прокатных станах привело к созданию нового технологического приема, который получил название "слиттинг-процесс". Он разработан фирмой "Стил Интернэшнл" (Канада) [10]. Процесс усовершенствован фирмой "Ниппон Кокан" [11]. "Слиттинг-процесс" состоит из двух отличных от обычного процесса операций: подготовка раската к разделению (описана выше) и само разделение.

По технологии "слиттинг-процесс" продольное разделение раската, состоящего из двух круглых профилей, соединенных тонкой перемычкой (рис. 3), может осуществляться разрывом или разрезанием перемычки специальным устройством, уста-

навливаемым на выходе раската из валков (на рис. 3 - разделительные конические ролики).

Продольное разделение раската происходит под действием выталкивающей силы, создаваемой прокатными валками.

После разделения производится прокатка круглых раскатов в готовые профили за два пропусков. Продольное разделение трехниточного раската может осуществляться путем одновременного взаимного перемещения крайних профилей в поперечном направлении [11] или поочередным отделением ниток трехниточного раската [12].

На рис. 4 показаны разделительные устройства различной конструкции. Они состоят из коробки, в боковых стенках которой на подшипниках качения размещены оси холостых разделяющих роликов. Для последовательного разделения четырехниточного раската используют устройство, содержащее три пары клиновидных роликов (см. рис. 4). Эту технологию используют на заводах фирмы "Лэйк Онтарио Стил" (Канада), "Ширнес Стил" (Великобритания), "Шапарол Стил" и "Норс Стар Стил" (США), "Тосин-Сэйко" (Япония) и др. [13].

Технология, основанная на "слиттинг-процессе", входила в комплект поставки при строительстве стана 320/150 Белорусского металлургического завода в г. Жлобин [14; 15]. Технология предусматривает производство арматурных профилей №№10÷16 из непрерывнолитых заготовок сечением 125×125мм.

Вообще, при реализации "слиттинг-процесса" громадное значение имеют как точная задача раската в валки и удержание его при двух или многониточном раскате, так и положение вводной разделительной проводки. Фирмой "Моргардсхаммер" разработаны специальные роликовые проводки (двух или четырехроликовые), ролики которых установлены на держателях [16].

Недостатками технологии "слиттинг-процесс" являются:

- наличие шейки разрыва перемычки в месте разделения раската может привести к закату;
- для обеспечения стабильного разделения возникает необходимость в формировании на многониточном раскате очень тонкой перемычки (около 0,8мм), что снижает срок службы валков (низкая стойкость формирующего калибра);
- наличие разделяющего устройства сложной конструкции;
- низкая стойкость разделяющих клиновидных роликов;
- низкая продольная устойчивость раската, особенно при прокатке кругов малых размеров ($\varnothing 6\div 10$ мм);
- сложность регулировки вводной привалковой арматуры.

В основе другой схемы процесса многоручьевого прокатки-разделения лежит принцип продольного разделения раската, состоящего из двух плоских овальных профилей, соединенных тонкой перемычкой, коническими (рис. 5а) или профильными ро-

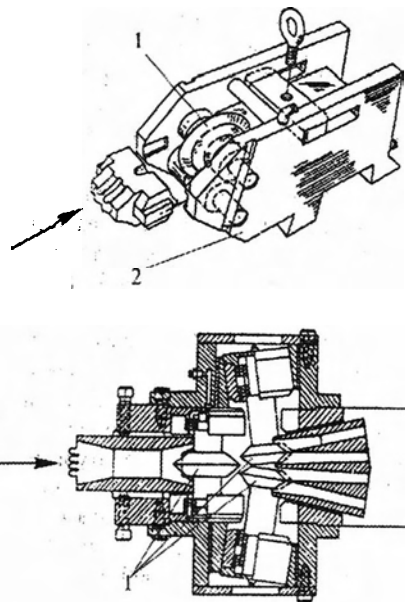


Рис. 4. Устройства для продольного разделения двух- и трехниточного (а), а также четырехниточного (б) раскатов: 1 - разделяющие конические ролики; 2 - коробка. Стрелками показано направление движения раската при прокатке.

ликами (рис. 5б) за счет неравномерно обжатия раската по ширине. После продольного разделения овалынные полосы прокатывают в готовый профиль. Этому способу двухручьевого прокатки-разделения присущи те же недостатки, что и "слиттинг-процессу".

Частично вышеперечисленные недостатки при продольном разделении раската устраняют с помощью устройства, эксплуатируемого фирмой "Кобе Сэйкосе" на заводе в г.Кобе (Япония), показанное на рис. 6. Роликовое делительное устройство для продольной резки проката на две части установлено на выходе из чистовой группы клетей и используется в производстве арматурных профилей №№10÷6 [17]. Вначале дисковыми ножами раскат надрезают по толщине с формированием тонкой перемычки между правой и левой частями.

Далее перемычку разрушают продольным изгибом правой части раската относительно его левой части с помощью двух пар разнесенных по высоте делительных роликов и двух пар тянущих роликов, создающих напряжение в перемычке.

Продольное разделение многониточного раската может быть осуществлено разрезанием перемычек дисковыми ножницами. Для уравнивания разделенных частей раската за ножницами следует устанавливать специальное устройство. Однако отсутствие самоцентрирования раската по отношению к острым гребням ножниц может способствовать асимметричному разделению раската с усложнением последующей ниточной прокатки разделенных полос. Кроме того, в местах разделения профилей возникают заусенцы, что может привести к появлению дефекта "закат".

Подводя итог, следует отметить, что в мире наблюдается возрастающий интерес к технологии многоручьевого прокатки-разделения, как в условиях обжимных, так мелко- и мелкосортно-проволочных станов, позволяющей без значительных капитальных затрат повысить производительность прокатных станов, снизить материальные и энергетические затраты по переделу, рационально сочетать его с непрерывной разливкой стали. При этом сам процесс существенно отличается от традиционного процесса прокатки как при подготовке раската к разделению (характеризуется значительной высотной неравномерностью

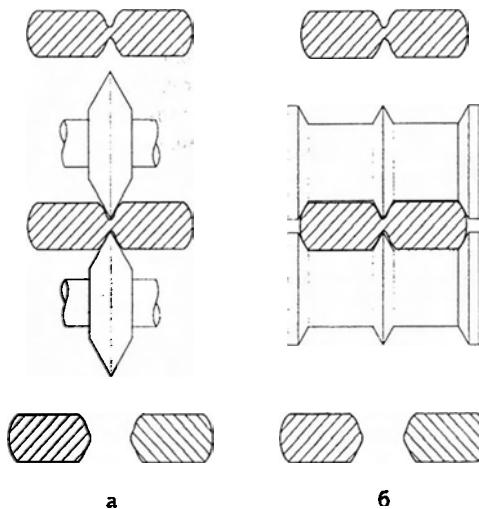


Рис. 5. Схемы продольного разделения раската коническими (а) и профилированными (б) роликами.

деформации по ширине раската, характер же развития продольной и поперечной деформации определяется взаимодействием более или менее обжимаемых участков раската), так и продольному разделению раската различными способами.

Наряду с этим, в литературе чрезвычайно мало сведений о теоретическом анализе этих двух аспектов технологии. То есть можно говорить о недостаточной изученности процесса прокатки-разделения, что затрудняет проектирование технологии на конкретном стане, а в ряде случаев и выбор механического оборудования для реализации процесса прокатки-разделения. Нами сделана попытка если и не полностью закрыть этот пробел, то, по крайней мере, максимально приблизиться к этому.

3. Анализ, разработка и исследование способов продольного разделения многониточного раската в прокатных валках

Анализ существующих методов продольного разделения многониточного раската в горячем состоянии в прокатных валках показал, что их можно свести к одному из следующих способов разрушения перемычки: срез, разрыв и разрезание. В Донецком политехническом институте (ныне Донецкий национальный технический университет – ДонНТУ), Институте черной металлургии им. З.И. Некрасова ИАН Украины (ИЧМ) и ИПО "Дониик" разработано множество комбинаций и модификаций способов, применение которых вызвано их назначением, конкретными условиями работы прокатного стана, типом стана, его сортаментом и т.д. Ниже рассмотрены основные способы продольного разделения многониточного раската, наиболее рациональные к использованию в условиях реверсивной, последовательной или непрерывной прокатки, показаны их преимущества и недостатки.

3.1. Разделение раската срезом перемычек

Наиболее качественное состояние поверхности заготовок в месте разделения обеспечивают способы продольного разделения раската путем создания в зоне перемычки напряжений сдвига.

Сущность этих способов состоит в том, что многониточный раскат формируют состоящим из разноосных заготовок, соединенных между собой вдоль одной из граней "фиктивной" перемычкой (рис. 7). Срез перемычек осуществляют поворотом заготовок вокруг продольных осей (рис. 8) или взаимным смещением заготовок навстречу друг другу вдоль граней, совмещенных в плоскости (рис. 9). Под "фиктивной" подразумевается перемычка, имеющая толщину h_n и, практически, не имеющая ширины Δ (см. рис. 7).

В случае разделения раската поворотом прямоугольных заготовок вокруг продольных осей, их соединяют по узким граням А (см. рис. 7а), а при разделении раската взаимным смещением заготовок - по широким граням В (см. рис. 8б). При формировании многониточного раската толщину "фиктивной" перемычки выполняют равной 10÷30% от ширины соединяемых граней заготовок $[h_n = (0,1 \div 0,3)A]$ или

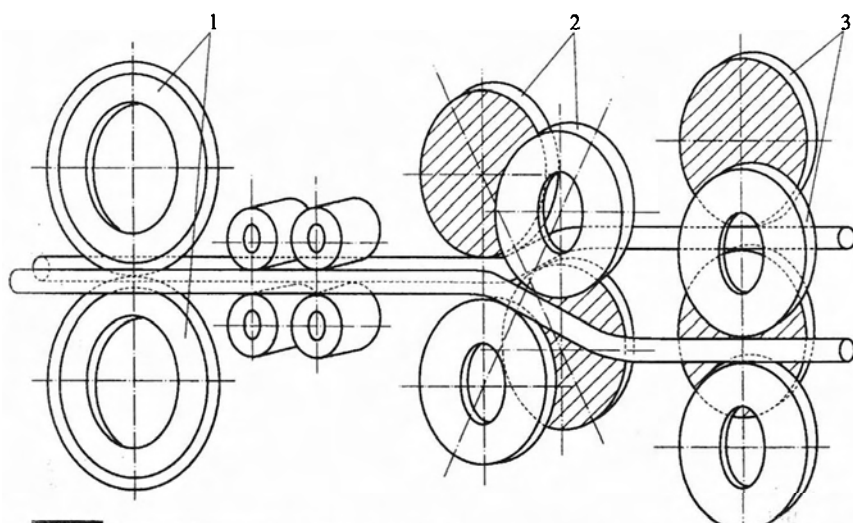


Рис. 6. Продольное разделение раската с использованием устройства Фирмы "Кобе Сэйкосе": 1 - дисковые ножницы; 2 - делительные ролики; 3 - тянущие ролики.

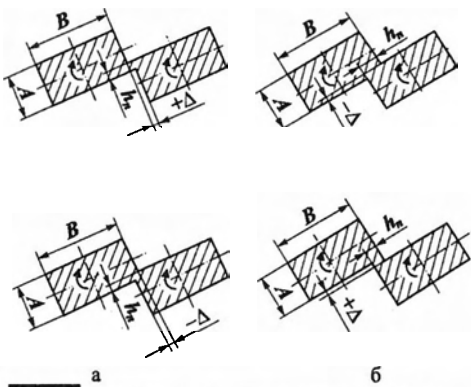


Рис. 7. Варианты совмещения прямоугольных профилей в двухниточном раскате: а - по узким граням; б - по широким граням, с положительным (+) и отрицательным (-) перекрытиями.

продольных осей многониточный раскат формируют состоящим из прямоугольных заготовок, соединенных между собой у вершин "фиктивной" перемычкой (см. рис. 7а). Крутящий момент $M_{кр}$, обеспечивающий поворот заготовок, создают путем прило-

$h_n = (0,1+0,3)B]$, а ширину перемычки - не более 20% от ее толщины $\Delta \ll 0,2h_n$. В этом случае соединяемые грани смежных заготовок находятся, практически, в одной плоскости.

Для осуществления продольного разделения раската путем поворота заготовок вокруг

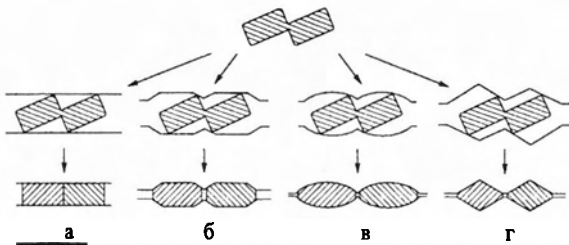


Рис. 8. Разделение двухниточного раската поворотом сочлененных прямоугольных профилей вокруг продольных осей при прокатке в гладких валках (а) и двухручьевых калибрах шестиугольной (б), овальной (в) и ромбической (г) формы.

жения к расположенным по диагонали вершинам заготовок усилий со стороны прокатных валков (рис. 9). Разделение многониточного раската может осуществляться на гладкой цилиндрической (см. рис. 8а) или конической бочке валков, либо в многоручьевых калибрах (см. рис. 8б, в, г). В последнем случае одновременно с разделением прямоугольных заготовок, их обжимают в полосы с овальным, шестиугольным или ромбическим сечением. Возможны и другие варианты формирования и продоль-

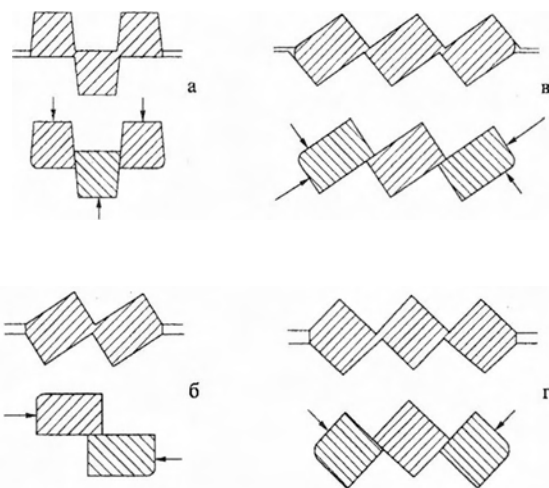


Рис. 9. Варианты разделения многониточных раскатов взаимным смещением прямоугольных профилей вдоль смещенных граней: а - в "шахматом"; б - в двухручьевом; в, г - в трехручьевых калибрах смещением крайних профилей относительно среднего профиля.

ного разделения многониточного раската этим методом.

При захвате двухниточного раската валками (рис. 10а) на вершины заготовок действуют нормальные силы P_1 и P_2 (составляющие силы прокатки), создающие крутящие моменты $M_{кр}$, которые стремятся повернуть заготовки вокруг их продольных осей

$$M_{кр} = 0,5m(P_1 + P_2) \quad (1)$$

где $m = B \cos \varphi - A \sin \varphi$; $\varphi = \arctg \frac{A}{B} (1 - \frac{h_n}{A})$; A и B - высота и ширина прямоугольных заготовок, соответственно; φ - угол наклона широких граней заготовок к образующей валков.

Повороту заготовок вначале препятствуют моменты от сопротивления заготовок пластическому скручиванию и от возникающих под действием моментов $M_{кр}$ в зоне перемычки растягивающей F и сдвигающей Q сил

$$M_w = \tau_s W_p; \quad (4) \quad F = q_n \sigma; \quad Q = q_n \tau, \quad (5)$$

где $q_n = 0,5h_n l_n$ - срезаемая площадь сечения перемычки; l_n - длина зоны среза перемычки.

Для прямоугольного сечения момент пластического сопротивления заготовки при скручивании

$$W_p = (3B-A)A^2/6. \quad (6)$$

По мере прохождения раската в межвалковом зазоре происходит смятие вершин заготовок и, как следствие, смещение точек приложения равнодействующих сил P_1 и P_2 к центру заготовки и уменьшение плеча m (см. уравнение 2) момента $M_{кр}$.

Пренебрегая возможным скруглением вершин заготовок и принимая площадь контакта треугольной формы, получаем, что усредненное по длине контакта плечо момента $M_{кр}$ будет равно

$$m_{кр} = m - (\Delta Z_1 + \Delta Z_2) (\text{ctg} \varphi - \text{tg} \varphi) / 3, \quad (7)$$

где ΔZ_1 и ΔZ_2 - высота смятия вершин заготовок (см. рис. 10б).

При создании условий, обеспечивающих достижение касательными напряжениями в сечении перемычки напряжений текучести при сдвиге ($\tau = \tau_s$), начнет происходить поворот заготовок вокруг продольных осей со сдвигом металла в районе перемычки. Повороту заготовок также препятствует момент $M_{кр}$, создаваемый силами трения T_1 и T_2 (см. рис. 10б) от действия касательных напряжений t_n на поверхности контакта.

$$M_{mp} = 0,5n_{cp} \tau_n (F_{k_1} + F_{k_2}), \quad (8)$$

где $n_{cp} = n - 2(\Delta Z_1 + \Delta Z_2) / 3$; F_{k_1} и F_{k_2} - площадь смятия вершин заготовки; $n = B \sin \varphi + A \cos \varphi$.

Для определения значений технологических параметров процесса продольного разделения раската рассмотрено условие равновесия суммы моментов относительно центра заготовок

$$\sum M_i = 0; M_{кр} - M_{mp} - M_w - 0,5BQ - 0,5(A - h_n)F = 0. \quad (9)$$

Преобразовывая равенство (9) с учетом зависимостей (1)-(5), получим

$$P_1 + P_2 = \frac{1}{m} \{ 2W_p \tau_s + n_{cp} \tau_n (F_{k_1} + F_{k_2}) + q_n [B \tau_s + (A - h_n) \sigma] \} \quad (10)$$

Сумму сил P_1 и P_2 можно записать в следующем виде

$$P_1 + P_2 = \sigma_n (F_{k_1} + F_{k_2}), \quad (11)$$

где σ_n - нормальные напряжения на контактной поверхности.

Зоны пластической деформации металла, образующиеся при смятии вершин прямоугольных заготовок, значительно меньше основной центральной недеформированной части раската, что сдерживает течение смещенных по высоте объемов металла в продольном направлении (вытяжка отсутствует). Поэтому в поперечном сечении раската принята плоская схема напряженно-деформированного состояния металла. Для нахождения нормального напряжения σ_n на контактной поверхности BN использован метод построения и расчета полей линий скольжения. Для расчета нормальных напряжений контактной поверхности σ_n и в зоне перемычки $\sigma_{X(M)}$ получены уравнения

$$\sigma_n = -k [1 + \frac{3}{2} \pi / 2 - 2\zeta - \arccos \omega] + k \sin(\arccos \omega); \quad (12)$$

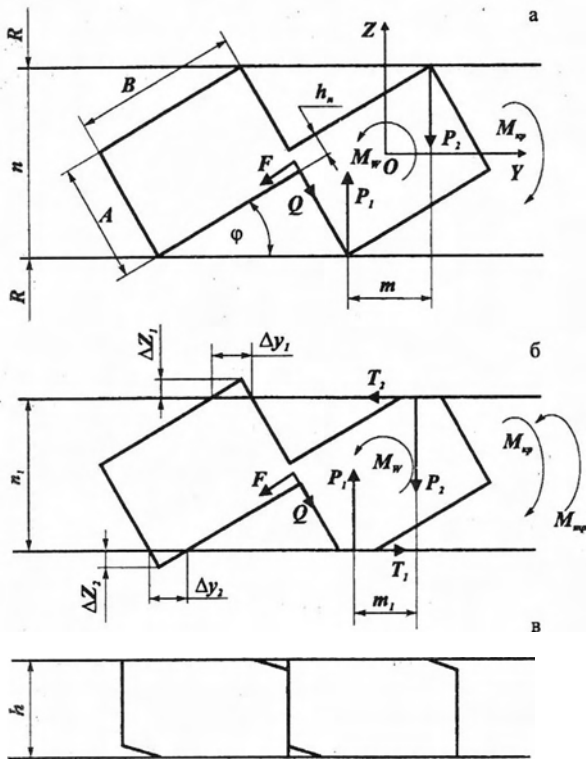


Рис. 10. Схема продольного разделения двухниточного раската, состоящего из прямоугольных профилей, прокаткой в гладких валках: а, б, в - поперечные сечения раската по длине очага деформации

$$\sigma_{X(M)} = -k(1 + \pi/2), \quad (13)$$

где ζ - угол наклона контура BN к оси X ; ω - коэффициент ($0 < \omega \leq 1$).

Площади контакта в равенстве (11) можно принять равными (см. рис. 10)

$$Fk_i = 0,5 \Delta y_i l d_i, \quad (14)$$

где Δy и $l d$ - ширина и длина площади смятия вершин заготовок соответственно; i - индекс площадки смятия;

$$l d_i = \sqrt{2 R \Delta Z_i}, \quad \Delta y_i = \Delta Z_i (\operatorname{ctg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi). \quad (15)$$

где $n = B \sin \varphi + A \cos \varphi$ (см. рис. 10)

Преобразовывая уравнение равновесия сил на вертикальную ось OZ получаем: $P_1 - P_2 - Q \cos \varphi - F \sin \varphi = 0$.

С учетом представленных выше зависимостей нашли

$$\bar{\pi}_{k1} - F_{k2} = \frac{q_n [\cos \varphi + (1 + \pi/2) \sin \varphi]}{1 + 3\pi/2 - 2\varphi - \arccos n - \sin(\arccos n)}, \quad (16)$$

где $n = B \sin \varphi + A \cos \varphi$ (рис. 10)

Из равенства (16) с учетом зависимостей (14) и (15) найдем

$$\Delta Z_2 = \left[0,5 \Delta Z_1^2 - \frac{q_n [\cos \varphi + (1 + \pi/2) \sin \varphi]^2}{(1 + 3\pi/2 - 2\varphi) (\operatorname{ctg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi) \sqrt{2R}} \right]^{1/2}. \quad (17)$$

Допустимая величина смятия вершин заготовок найдена в виде неравенства из условия, обеспечивающего срез перемычки

$$n - h \geq n_n \times h_n \cos \varphi + \Delta Z_1 + \Delta Z_2, \quad (18)$$

где n_n - коэффициент надежности, кратный толщине перемычки.

Принимая зазор между валками на выходе из очага деформации $h=A$, из равенства (18) находим предельно допустимое значение смятия вершин заготовок

$$\Delta Z_1 + \Delta Z_2 = (n - A - n_n h_n \cos \varphi). \quad (19)$$

Длина зоны среза перемычки определена по зависимости

$$l_n = \sqrt{n_n h_n R}.$$

Преобразовывая равенство (19) с учетом зависимости (17), получено

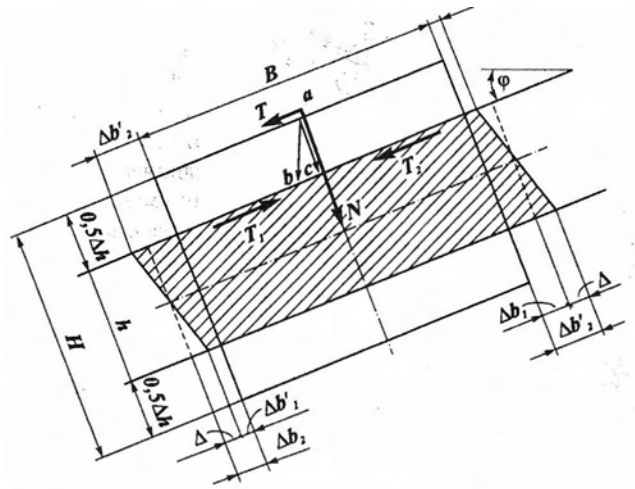


Рис. 11. Схема деформации прямоугольной полосы в конических валках.

$$\left(1 + \frac{3\pi}{2} - 2\varphi - \frac{\pi}{180}\right) \frac{\Delta Z_1}{A} (\operatorname{ctg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi) \sqrt{\frac{2\Delta Z_1 R}{A^2} - \frac{q_n}{A^2} [\cos \varphi + (1 + \frac{\pi}{2}) \sin \varphi]} - \frac{2W_p}{A^3} + \frac{q_n}{A^2} \left[\frac{B}{A} - (1 - \frac{h_n}{A})(1 + \frac{\pi}{2}) \right] = 0 \quad (20)$$

Решение полученного нелинейного уравнения (20) относительно параметров: h_n/A ; $\Delta Z_1/A$ и $\Delta Z_2/A$ осуществлено методом Ньютона. Сочетание значений входных факторов: B/A ; R/A ; f и n_n , при которых решено уравнение (20), определено с использованием аппарата математического планирования эксперимента. В результате обработки расчетных значений методами регрессионного анализа получены уравнения регрессии для определения предельной относительной толщины перемычки h_n/A и смятия вершин прямоугольной заготовки $\Delta Z_1/A$ и $\Delta Z_2/A$ при разделении двухниточного раската в гладких валках, действительные в диапазоне значений факторов: $B/A \in (2+4)$; $R/A \in (10+40)$; $f \in (0,2+0,6)$; $n_n \in (0,7+1,3)$:

$$h_n/A = 1,02 - 0,0165R/A - 0,146f - 0,375n_n + 0,03Bf/A + 0,0016Rn_n/A - 0,0018(B/A)^2 + 0,0001(R/A)^2 + 0,0869n_n^2; \quad (21)$$

$$\Delta Z_1/A = 0,116 - 0,0502 B/A - 0,0007 R/A + 0,1119f + 0,0443n + 0,0001(B/A)(R/A) - 0,028 Bf/A - 0,0058 Bn/A - 0,0004 Rn/A + 0,0074 (B/A)^2; \quad (22)$$

$$\Delta Z_2/A = 0,0588 - 0,03 B/A - 0,0004 R/A - 0,0188 Bf/A - 0,0004 Rf/A + 0,0047 (B/A)^2 + 0,125f^2. \quad (23)$$

Статистические данные анализа уравнений регрессии (21)-(23) по коэффициенту множественной корреляции, крите-

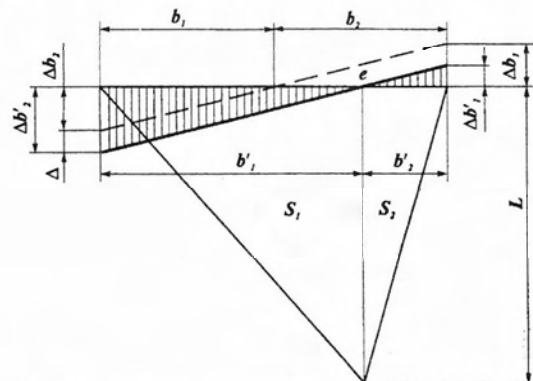


Рис. 12. К определению эпюры поперечных перемещений металла в конических валках

риям Фишера и Стьюдента, остаточной сумме квадратов показали адекватность уравнений регрессии исследованного факторного пространства.

Для подтверждения достоверности полученных уравнений свинцовые образцы прокатывали на полупромышленном стане 250. Сравнение экспериментальных значений отношений сторон (B/A) , прямоугольных профилей клиновидного двухниточного раската, соответствующих его разделению при прокатке в цилиндрических валках радиусом $R=100\text{мм}$, с отношением сторон (B/A) , показывает их удовлетворительную сходимость. Погрешность расчетных и экспериментальных значений отношений сторон B/A находится в пределах от $-14,5\%$ до $+2,3\%$.

Уравнения (21), (22) и (23) позволяют оценить влияние входных факторов на условия продольного разделения раската и определить силу прокатки при разделении, и использованы для расчета калибровок валков при двухручьевой прокатке-разделении сортовых профилей.

Процесс продольного разделения многониточного раската в конических валках (наклонных калибрах) отличается от разделения в гладких цилиндрических валках различными силовыми условиями контактного взаимодействия металла и валков. Одним из характерных признаков прокатки прямоугольной полосы в наклонном калибре является получение параллелограмного поперечного сечения.

В случае прокатки прямоугольной полосы в конических валках (рис. 11) деформированные частицы металла перемещаются по нормали к поверхности валка и в связи с несовпадением вектора \vec{ac} их перемещения с вектором \vec{ab} перемещения поверхности валка, проскальзывают (перемещаются) относительно последней в направлении вершины конусной поверхности вдоль вектора \vec{bc} . Величина этого проскальзывания такова: $\Delta = 0,5\Delta h \times \text{tg}\varphi$, $\Delta h = H - h$ - обжатие полосы по нормали к поверхности конического валка; φ - угол наклона образующей поверхности валка к его оси. Кроме этого, имеет место попереч-

ное перемещение металла вследствие уширения.

Эпора поперечного перемещения металла на поверхности конического валка является суммой эпюр поперечного перемещения металла в результате его уширения в цилиндрических валках с составляющими уширения $\Delta b_1 = \Delta b_2 = 0,5\Delta b$ (Δb - уширение металла в цилиндрических валках) и проскальзывания металла на конической поверхности валка Δ (рис. 12). Результирующие составляющие уширения металла у контактной поверхности конического валка со стороны большего диаметра валков увеличиваются, а со стороны меньшего диаметра валков - уменьшаются на величину Δ :

$$\Delta b'_1 = 0,5(\Delta b + \Delta h \times \text{tg}\varphi); \quad \Delta b'_2 = 0,5(\Delta b - \Delta h \times \text{tg}\varphi)$$

Линия нулевых перемещений металла на контактной поверхности смещается от продольно-вертикальной оси симметрии конусной поверхности (точка "e") на величину

$$de = \frac{\Delta b}{\Delta h} b = 0,5b \frac{1}{C} \text{tg}\varphi,$$

где $C = \Delta b / \Delta h$ - показатель уширения металла.

В связи со смещением линии нулевых перемещений появляется неуравновешенная поперечная составляющая силы трения T (см. рис. 11), направленная в сторону большего диаметра валка. При значении угла $\varphi \geq \text{arctg} C$ имеет место одностороннее проскальзывание металла в направлении вершины конусной поверхности валка и равенство результирующей поперечной составляющей силы трения $T = fN$ (f - коэффициент поперечного трения), направленной в противоположную сторону этому проскальзыванию. При $\varphi < \text{arctg} C$ значение $T < fN$.

Полагая, что результирующая поперечная составляющая силы трения пропорциональна разности площадей контакта зон разнонаправленного поперечного перемещения металла, соотношение значений реально действующей результирующей поперечной составляющей силы трения T и максимально возможной составляющей fN можно представить в виде коэффициента пропорциональности:

$$K = \frac{T}{fN} = \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} = \frac{S_1 - S_2}{S},$$

где S_1 и S_2 - площади контакта зон разнонаправленного поперечного перемещения металла; S - площадь контактной поверхности в очаге деформации.

Считая, что зоны поперечного перемещения металла имеют одинаковую длину, равную длине очага деформации L (рис. 12), можно записать

$$K = (b_1 - b_2) / b, \quad (24)$$

где b_1 и b_2 - ширина зон разнонаправленного поперечного перемещения металла в конических валках; b - общая ширина контактной поверхности.

Соотношение ширины зон разнонаправленного поперечного перемещения металла в конических валках равно

$$\frac{b'_1}{b'_2} = \frac{\Delta b'_1}{\Delta b'_2} = \frac{\Delta b + \Delta h \times \text{tg}\varphi}{\Delta b - \Delta h \times \text{tg}\varphi} \quad (25)$$

Преобразовав уравнение (24) с учетом (25), получим

$$K = (\Delta b_1 / \Delta b_2 - 1 + 2 \Delta h \text{tg}\varphi / \Delta b_2) (\Delta b_1 / \Delta b_2 + 1)^{-1}. \quad (26)$$

Схема деформации двухниточного раската в конических валках показана на рис. 13. Для упрощения рисунка силовое взаимодействие раската и валков показано на одной заготовке. При захвате раската валками (см. рис. 13а) в местах контакта заготовок и поверхности валков возникают нормальные силы N_1 и N_2 . Под действием этих сил создается крутящий момент $M_{\text{кр}}$, стремящийся повернуть заготовки вокруг их продольной оси

$$M_{\text{кр}} = 0,5m(N_1 + N_2), \quad (27)$$

где $m = B \cos \gamma - A \sin \gamma$ - плечо сил N_1 и N_2 .

Этому повороту, в отличие от деформации в цилиндриче-

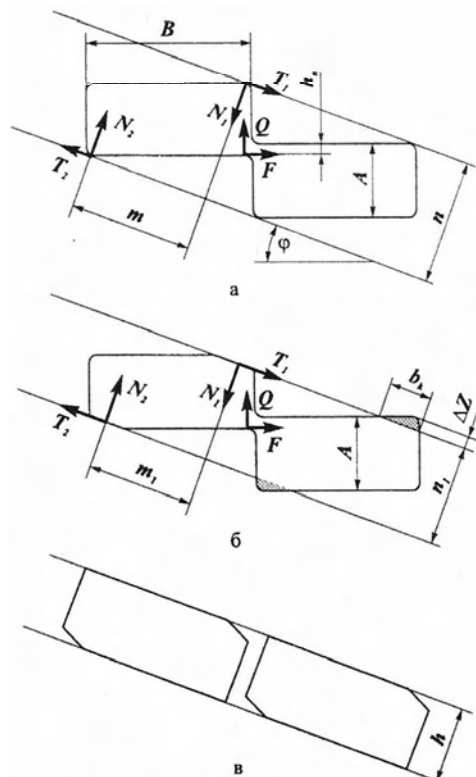


Рис. 13. Схема продольного разделения двухниточного раската в конических валках: а, б и в - поперечные сечения раската по длине очага деформации.

ских валках, способствует момент сил трения M_{mp} , и препятствует момент сопротивления сечения заготовок пластическому скручиванию M_w (см. уравнение 4)

$$M_{mp} = 0,5n(T_1 + T_2), \quad (28)$$

где $T_1 = fN_1K$; $T_2 = fN_2K$; $n = B \sin \varphi + A \cos \varphi$.

Одновременно под действием крутящего момента M_{mp} в зоне перемычки возникают растягивающая сила F и сдвигающая сила Q (см. уравнение 5), также препятствующие повороту заготовок вокруг продольных осей.

По мере прохождения раската в межвалковом зазоре происходит смятие вершин заготовок (см. рис. 13б). При смятии вершин точки приложения сил N_1 и N_2 плечи m и n крутящих моментов M_{mp} и M_{mp} смещаются к центру заготовок и уменьшаются до значений: $m_1 = m - (4/3)\Delta Z(\operatorname{ctg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi)$; $n_1 = 2\Delta Z$.

При создании условий, обеспечивающих равенство касательных напряжений в сечении перемычки напряжениям среза ($\tau_n = \tau_{cp}$), произойдет продольное разделение раската со срезом перемычки.

Для определения параметров двухниточного раската, обеспечивающих его стабильное продольное разделение, рассмотрено условие равновесия моментов относительно продольной оси заготовки

$$\sum M_0 = 0; \quad M_{mp} + M_{mp} - M_w - 0,5BQ - 0,5(A - h_n)F = 0. \quad (29)$$

Преобразовывая равенство (29) с учетом зависимостей (27) и (28), получили

$$N_1 + N_2 = [2M_w - BQ + (A - h_n)F] / (m_1 + KfN_1). \quad (30)$$

Из уравнения равновесия проекций сил на оси OX и OY найдены выражения для сил F и Q , возникающих в перемычке

$$F = (N_1 - N_2)(\sin \varphi - Kf \cos \varphi);$$

$$Q = (N_1 - N_2)(\sin \varphi - Kf \cos \varphi); \quad (31)$$

Отношение сил F и Q с учетом выражений (31) равно

$$K_f = F/Q = (\operatorname{tg} \varphi - Kf) / (1 + Kf \operatorname{tg} \varphi). \quad (32)$$

С учетом зависимостей (5) и (32) равенство (30) принимает вид

$$N_1 + N_2 = \{2W_p \tau_s + \tau_n q_n [B + (A - h_n)Kf] / (m_1 + KfN_1)\}, \quad (33)$$

Допуская равномерность распределения контактных напряжений на поверхности контакта металла и валков и равенство их пределу текучести ($p = \sigma_s$), при делении равенства (33) на σ_s получено

$$F_1 + F_2 = \{2W_p (\tau_s / \sigma_s) + 0,5(\tau_n / \sigma_s) q_n [B + (A - h_n)Kf] / (m_1 + KfN_1)\}, \quad (34)$$

где F_1 и F_2 - площадь контакта смятия вершин заготовок с валками.

Преобразовывая уравнение равновесия крутящих моментов относительно центра перемычки имеем

$$N_2(B \cos \varphi - 0,5h_n \sin \varphi) - N_1 d \cos \varphi + (T_1 + T_2) dx \cos \varphi - M_w = 0$$

с учетом зависимости (28), получено

$$N_2 = (N_1 C + W_p \tau_s / \sigma_s) / D, \quad (35)$$

где $d = A - 0,5h_n$; $C = d(\sin \varphi - Kf \cos \varphi)$;

$$D = B \cos \varphi - 0,5h_n \sin \varphi + dK \cos \varphi.$$

Разделив уравнение (35) на σ_s , получим

$$F_2 = (F_1 C + W_p \tau_s / \sigma_s) / D. \quad (36)$$

Представив площадь F_1 в аналитическом виде

$$F_1 = 0,5[\Delta Z(\operatorname{tg} \varphi + \cos \varphi)] \sqrt{R h_n},$$

приняв отношение $\tau_s / \sigma_s = 1/\sqrt{3}$, и решая совместно равенства (34) и (36), получим

$$\frac{\Delta Z}{A} \sqrt{\frac{RAZ}{2A^2 \cos \varphi}} (\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{ctg} \varphi) \left(1 + \frac{C}{D}\right) + \frac{W_p}{D\sqrt{3}} =$$

$$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{W_p}{A^3} + \frac{1}{2\sqrt{3}} \frac{h_n}{A} \sqrt{\frac{R h_n}{A A}} \left[\frac{B}{A} + \left(1 - \frac{\Delta h}{A}\right) K \right] \quad (37)$$

$$m_1 / A + KfN_1 / A$$

Для обеспечения стабильности процесса разделения раската величина взаимного смещения заготовок должна превышать толщину перемычки

$$n - h - 2\Delta Z \geq n_n h_n \cos \varphi, \quad (38)$$

где h - зазор между валками на выходе из очага деформации; $n_n = 1 + 1,5$ - коэффициент надежности.

Допустимая величина смятия вершин заготовок найдена из условия (38), принимая $A = h$. Имеем $\Delta Z = 0,5(n - A - n_n h_n \cos \varphi)$.

Решение нелинейного уравнения (37) относительно h_n / A и $\Delta Z / A$ осуществлено численным методом при различных сочетаниях значений входных факторов процесса разделения: $X_1 = f$; $X_2 = B / A$; $X_3 = \sqrt{R / A}$; $X_4 = \operatorname{tg} \varphi$; $X_5 = n_n$, определяемых с использованием аппарата математического планирования эксперимента.

После обработки результатов расчета методом регрессионного анализа получены следующие уравнения регрессии, действительные при следующих значениях факторов: $f \in (0,3 + 0,5)$; $B/A \in (1,5 + 2,5)$; $R/A \in (10 + 50)$; $\operatorname{tg} \varphi \in (0,15 + 0,55)$; $n_n \in (1 + 1,5)$

$$h_n / A = 0,4084 + 0,3709B / A + 0,0525\sqrt{R / A} - 0,9426n_n -$$

$$- 0,606fB / A - 0,0056(B / A)\sqrt{R / A} + 0,2385f^2 -$$

$$- 0,0578(B / A)^2 - 0,0029(R / A) + 0,0957\operatorname{tg}^2 \varphi + 0,3019n_n^2;$$

$$\Delta Z / A = 0,3373 - 0,0698B / A - 0,0448\sqrt{R / A} +$$

$$+ 0,0521fB / A + 0,0029(B / A)\sqrt{R / A} - 0,2f^2 +$$

$$+ 0,0028R / A - 0,0127\operatorname{tg}^2 \varphi.$$

Сравнение экспериментальных значений отношений сторон (B / A) , прямоугольных профилей клиновидного двухниточного раската, соответствующих его разделению при прокатке на лабораторном стане в конических валках со средним радиусом $R = 100$ мм, с расчетным из преобразованного уравнения (40) отношением сторон $(B / A)_p$, показывает, что погрешность не превышает -14,5%.

Анализ влияния входных параметров X_1, X_2 на моделируемые h_n / A и $\Delta Z / A$ показал, что увеличение значений всех входных параметров X_1, X_2 способствует увеличению предельного значения относительной толщины перемычки n , следовательно, улучшению условия продольного разделения раската.

Наиболее активным фактором, влияющим на предельную толщину перемычки, n , следовательно, определяющим условия продольного разделения двухниточного раската, состоящего из заготовок прямоугольного сечения, является отношение сторон прямоугольных заготовок B/A . При возрастании соотношения сторон от 1,23 до 2 наблюдается рост максимально возможной толщины перемычки. При дальнейшем увеличении фактора B/A интенсивность роста предельной относительной толщины перемычки h_n / A снижается и при значениях $B/A = 2,8$ практически прекращается. Это говорит о достижении предельного значения относительной толщины перемычки $h_n / A = 0,39$.

Вторым по значимости является параметр R/A . По мере увеличения относительного радиуса валков увеличивается площадь контактной поверхности, и, следовательно, уменьшается смятие вершин заготовок (см. рис. 13), что способствует увеличению взаимного смещения прямоугольных заготовок и способствует разделению более толстой перемычки.

Влияние параметров $X_4 = \operatorname{tg} \varphi$ и $X_5 = n_n$ на изменение относительной толщины перемычки прямо пропорционально во всем исследуемом диапазоне. Наименьшее влияние на значение относительной толщины перемычки оказывает коэффициент поперечного трения f .

Продольное разделение многониточного раската срезом перемычек путем поворота вокруг продольных осей разноосных профилей прокаткой в калибрах показано на рис. 14 и 15. При этом "фиктивные" перемычки на многониточном раскате фор-

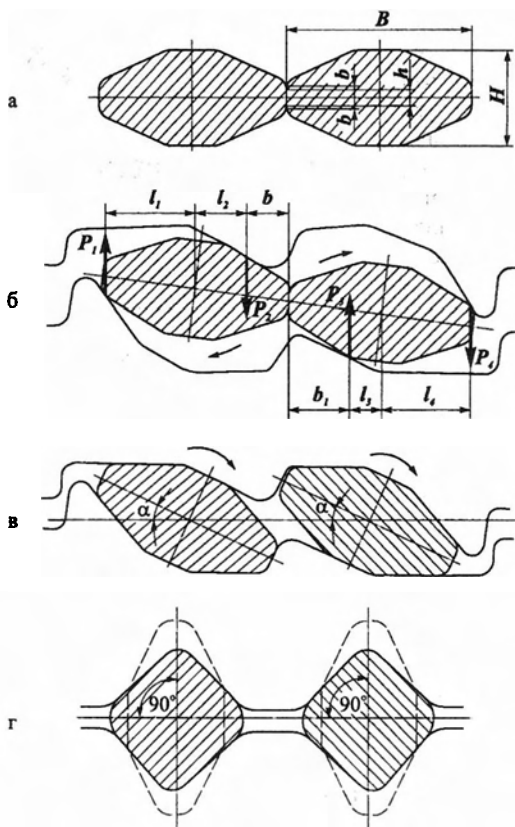


Рис. 14. Схема продольного разделения двухричного раската путем поворота шестиугольных профилей вокруг продольных осей в двухручьевом калибре с ручьями, наклоненными к осям валков.

мируются, как правило, путем неравномерного обжатия по ширине профилей раската с поперечным перемещением металла в район перемычек и образованием двухсторонних закатов.

В процессе скручивания шестиугольных профилей вокруг продольных осей происходит срез перемычек аналогично вышеописанному способу. Однако после выхода разделенных профилей из валков они продолжают скручиваться вокруг продольных осей в межклетевом промежутке. Угол скручивания зависит от угла α наклона ручьев разделяющего калибра к горизонтальной оси валков и устанавливаемого зазора между буртами

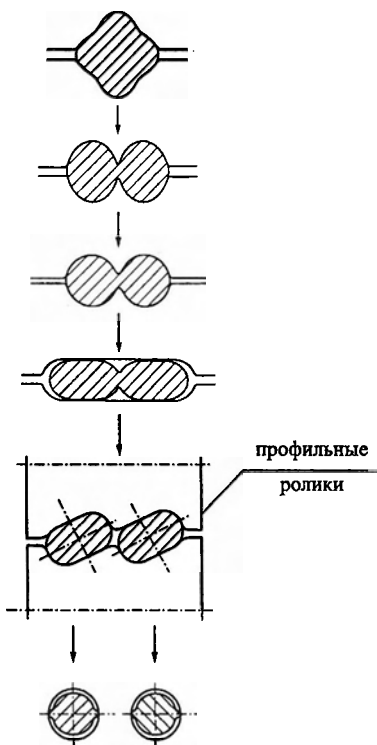


Рис. 15. Схема двухручьевой прокатки-разделения арматурных профилей с продольным разделением раската поворотом плоских овальных профилей в двухручьевом калибре.

валков. Угол скручивания задают таким, чтобы разделенные профили скрутились в межклетевом промежутке на 90° и были прокатаны в калибрах следующей клетки на ребро (см. рис. 14г).

Схема продольного разделения двухричного раската в двухручьевом калибре с наклонными ручьями в соответствии с технологической схемой на рис. 15 показана на рис. 16. При захвате валками двухричного раската, состоящего из двух плоских овальных полос, соединенных "фиктивной" перемычкой по большим осям, в месте контакта возникают нормальные силы N_1 и N_2 , создающие крутящие моменты $M_{кр}$, стремящиеся повернуть овальные полосы вокруг их продольных осей. С учетом смятия вершин овальных полос в месте контакта с валками

$$M_{кр} = 0,5m_{кр}(N_1 + N_2)\cos\varphi, \quad (41)$$

где $m_{кр} = a - (\Delta Z_1 + \Delta Z_2)\sin\varphi/3$; a - ширина прямоугольной части овального профиля; ΔZ_1 и ΔZ_2 - смятие вершин профилей вдоль оси OZ ; φ - угол наклона образующих ручьев двухручьевого калибра к оси валка.

Повороту полос вначале препятствуют моменты от сопротивления профилей пластическому скручиванию M_w и моменты от возникающих под действием $M_{кр}$ в зоне перемычки растягивающей F и сдвигающей Q сил. Момент пластического сопротивления плоских овальных профилей при скручивании, приводя форму сечения к прямоугольной, определен соглас-

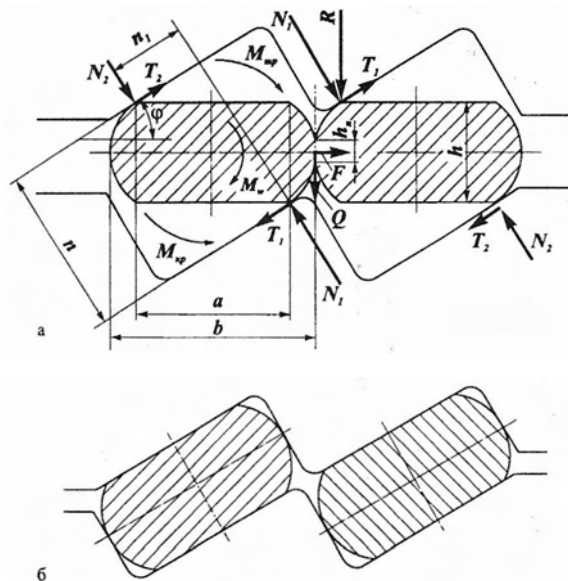


Рис. 16. Схема продольного разделения двухричного раската поворотом плоских овальных профилей вокруг продольных осей в двухручьевом калибре: а - захват раската валками; б - сечение на выходе из очага деформации.

но зависимости (6) с учетом обозначений рис. 16

$$W_p = (3b - h)h^2/6 \quad (42)$$

При достижении касательными напряжениями в сечении перемычки напряжений текучести при сдвиге ($\tau = \tau_c$), начнет происходить поворот заготовок вокруг продольных осей со сдвигом металла в районе перемычки, которому дополнительно начнет препятствовать момент $M_{кр}$, создаваемый силами трения T_1 и T_2 (см. рис. 16) на поверхности контакта

$$M_{кр} = 0,5n_{кр}\tau_n(F_{k1} + F_{k2}), \quad (43)$$

где $n_{кр} = n - (2/3)(\Delta Z_1 + \Delta Z_2)\cos\varphi$; F_{k1} и F_{k2} - площадь смятия вершин профиля.

Для определения значений технологических параметров процесса продольного разделения раската рассмотрено условие равновесия суммы моментов относительно центра заготовок и проекции сил на ось OZ

$$\sum M_o = 0; M_{кр} - M_{кр} - M_w - 0,5bQ = 0; \quad (44)$$

$$\Sigma P_z = 0; (N_1 - N_2) \cos \varphi - (T_1 - T_2) \sin \varphi - Q = 0. \quad (45)$$

В результате преобразования равенства (44) с учетом уравнения (45) и зависимостей (41)-(43), получено

$$0,5[X_1(1 + 0,5X_2\sqrt{n_n X_2 X_3}) - 1/3] - (m_{cp}/h)(\cos \varphi - f \sin \varphi)(S/h^2 + 2F_{k2}/h^2) \cos \alpha = 0, \quad (46)$$

$$\text{где } m_{cp}/h = X_1 - 2X_4 - (\Delta Z_2/h + \Delta Z_1/h) \sin \varphi / 3;$$

$$S/h^2 = 0,2875 X_2 \sqrt{n_n X_2 X_3} / (\cos \varphi - f \sin \varphi) \cdot \cos \alpha;$$

$$\frac{F_{k2}}{h^2} = 0,5 \frac{\Delta y_2}{h} \frac{ld_2}{h}; X_1 = \frac{b}{h}; X_2 = \frac{h_n}{h}; X_3 = \frac{R}{A}; X_4 = \frac{c}{h};$$

$$\frac{\Delta Z_1}{h} = \left[\left(\frac{\Delta Z_2}{h} \right)^2 + \frac{0,1016}{A(\cos \varphi - f \sin \varphi)} X_2 \sqrt{n_n X_2} \right]^{2/3};$$

$$A = 1 / \sin \varphi + 2X_4 \cos \varphi + 2X_4 \sin \varphi \times \operatorname{tg}(\beta + \varphi);$$

$$\beta = \arctg 2X_4; \Delta y_2/h = A \Delta Z_2/h; ld_2/h = \sqrt{2X_3 \Delta Z_2/h};$$

$$\cos \alpha = 1 - (0,5/X_3)(1 - 1/\cos \varphi + X_5 \operatorname{tg} \varphi).$$

Угол φ наклона образующей ручья двухручьевого калибра, обеспечивающий стабильное продольное разделение раската обеспечивается неравенством

$$[a(\cos \varphi + \sin \varphi) - h] \cos \varphi \geq n_n h_n + \Delta Z_1 + \Delta Z_2 \quad (47)$$

где n_n - коэффициент надежности, кратный толщине перемычки.

Решение полученного уравнения (47) осуществлено численным методом. В результате обработки расчетных значений методами регрессионного анализа получены уравнения регрессии для определения предельной относительной толщины перемычки h_n/h и относительного смятия вершин овальных профилей $\Delta Z_1/h$ и $\Delta Z_2/h$ при разделении двухниточного раската в двухручьевом калибре с наклонными ручьями, действительные в диапазоне значений факторов: $\varphi \in (10^\circ \div 30^\circ)$; $f \in (0,1 \div 0,5)$; $X_1 = b/h \in (2 \div 4)$; $X_2 = h_n/h \in (0,1 \div 0,3)$; $X_3 = R/A \in (15 \div 35)$ при $X_4 = c/h = 0,3$ и $n_n = 1$

$$\Delta Z_1/h = 0,0524 + 0,182 \operatorname{tg} \varphi - 0,0156 f - 0,0042 b/h + 0,0576 h_n/h - 0,0004 R/h + 0,133 f \times \operatorname{tg} \varphi - 0,0023 (R/h) \operatorname{tg} \varphi; \quad (48)$$

$$\Delta Z_2/h = 0,0592 + 0,175 \operatorname{tg} \varphi - 0,0156 f - 0,0044 b/h + 0,0144 h_n/h - 0,0004 R/h + 0,127 f \times \operatorname{tg} \varphi - 0,024 (R/h) \operatorname{tg} \varphi. \quad (49)$$

Предельное значение относительной толщины перемычки, при которой произойдет продольное разделение двухниточного раската при заданных параметрах раската и разделяющего двухручьевого калибра, можно определить из условия (47)

$$\frac{h_n}{h} \leq \frac{1}{n_n} \left[1 - \frac{\Delta Z_1}{h} - \frac{\Delta Z_2}{h} + \cos \varphi \left(\frac{b}{h} - 2 \frac{c}{h} \right) \sin \varphi - 1 \right]. \quad (50)$$

Решением совместно уравнений (50), (48) и (49) найдено предельное значение относительной толщины перемычки

$$\frac{h_n}{h} = \frac{1}{0,072 + n_1} \left\{ \begin{aligned} &0,8884 + [(b/h - 0,6) \sin \varphi - 1] \cos \varphi - \\ &- 0,357 \operatorname{tg} \varphi + f(0,312 - 0,26 \operatorname{tg} \varphi) + \\ &+ (R/h)(0,008 + 0,0047 \operatorname{tg} \varphi) + 0,0086 b/h \end{aligned} \right\} \quad (51)$$

Изменяя угол образующей ручья двухручьевого калибра φ можно изменять угол скручивания разделенных профилей вокруг продольных осей и использовать этот эффект для кантовки профилей при задаче их в валки следующей клетки.

Схема прокатки сортовых профилей с использованием технологии двухручьевого прокатки с продольным разделением раската путем скручивания прямоугольных профилей вокруг продольных осей показана на рис. 17.

По сравнению с известными аналогами разработанный блок

способов имеет следующие преимущества: возможность продольного разделения раската в прокатных валках с одновременной деформацией разделенных профилей; качественное разделение раската путем создания в зоне разделения напряжений сдвига; незначительный врез в валки ручьев формирующего и разделяющего калибров; возможность продольного разделения многониточного раската с неограниченным числом совмещенных профилей; возможность осуществления скручивания разделенных профилей вокруг продольных осей при выходе из валков и контроля над ним.

Для осуществления продольного разделения раската срезом перемычек путем взаимного смещения заготовок много-

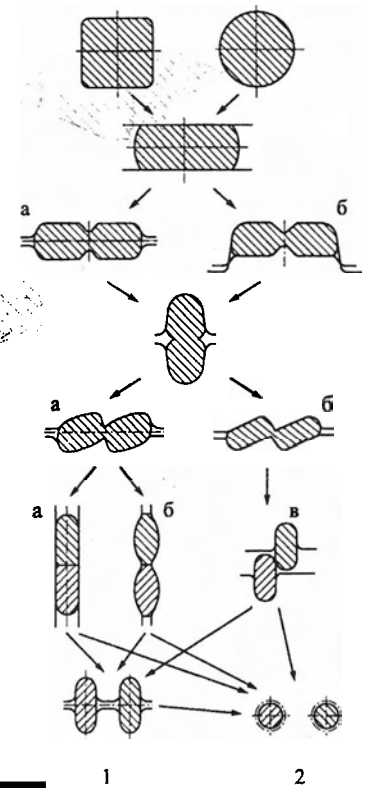


Рис. 17. Возможные схемы двухручьевого прокатки-разделения арматурных профилей с разделением двухниточного раската срезом перемычки: 1 - поворотом сочлененных профилей вокруг продольных осей; 2 - взаимным смещением профилей вдоль смещенной грани

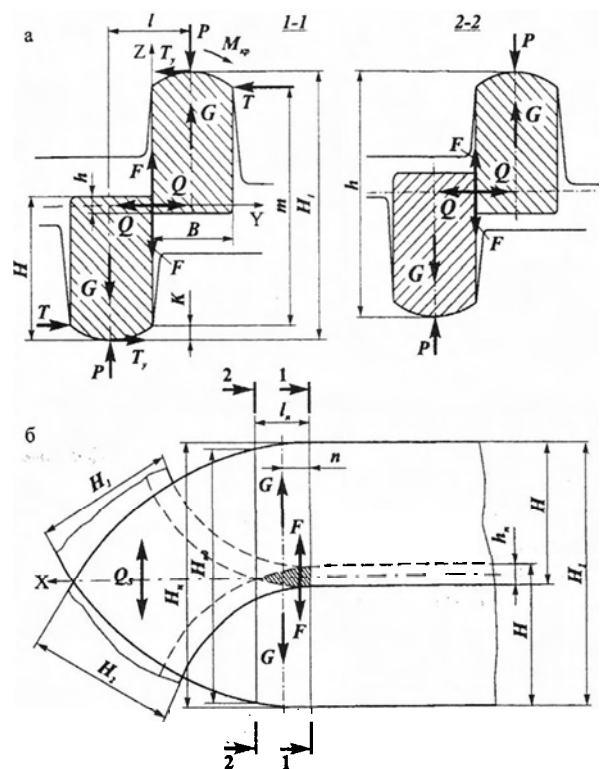


Рис. 18. Схемы действия сил на двухниточный раскат в очаге деформации при продольном разделении раската взаимным смещением прямоугольных профилей вдоль смещенных граней в поперечном (а) и в продольном (б) сечениях очага деформации

ниточный раскат обычно формируют состоящим из прямоугольных заготовок, соединенных "фиктивной" перемычкой вдоль широких граней (рис. 76). Некоторые варианты совмещения прямоугольных заготовок в многониточном раскате показаны на рис. 9.

Продольное разделение многоручьевого раската можно осуществлять практически при любом числе заготовок путем удерживания одних заготовок и смещения относительно их других заготовок. При этом могут удерживаться четные заготовки, а смещаться нечетные или удерживаться средняя заготовка, а крайние смещаться относительно ее в противоположном направлении с разной стороны, причем более удаленные от средней заготовки смещают на большую величину.

В случае продольного разделения трехниточного раската смещением крайних заготовок в противоположном направлении относительно средней возникает опрокидывающий момент относительно продольной оси раската, который достаточно проблематично компенсировать привалковой арматурой. Для его устранения целесообразно изменить направление сил, прикладываемых к смещаемым заготовкам, например, ребровым обжатием многониточного раската либо крайние заготовки смещать относительно средней во взаимно-перпендикулярном направлении.

При продольном разделении двухниточного раската (рис. 9б), его поворачивают вокруг продольной оси до положения, при котором совпадающие широкие грани заготовок становятся перпендикулярными продольной оси валков, а разделение производят в калибре со смещенными вдоль бочки валков прямоугольными ручьями (рис. 18).

В процессе обжатия раската валками под действием радиальных сил P происходит взаимное смещение прямоугольных заготовок вдоль широких граней с возникновением сдвиговой деформации металла в районе перемычки. При захвате двухниточного раската на контактной поверхности металла с валками возникают нормальные силы P , пропорциональные сопротивлению прямоугольных заготовок пластическому изгибу и сопротивлению перемычки срезу. В первоначальный момент захвата силы P преодолевают сопротивление заготовок пластическому изгибу, который равен

$$M_{изг} = \sigma_s W_{изг}, \quad (52)$$

где $W_{изг} = BH^2/4$ - момент сопротивления пластическому изгибу прямоугольной полосы.

На второй стадии захвата, с начала изгиба заготовок, возникает сопротивление перемычки сдвигу, выражаемое силой

$$F = t_s q_n. \quad (53)$$

Полагая, что контур продольного сечения перемычки в зоне сдвига ограничен параболой, площадь этого сечения можно записать в виде

$$q_n = 2l_n h_n / 3. \quad (54)$$

Преобразовывая формулу (53) с учетом (54) и с учетом $t_s = \sigma_s / 3$, получили

$$F = 2\sigma_s l_n h_n / 3\sqrt{3} \quad (55)$$

Полагая, что начало зоны пластического изгиба заготовок и начало зоны сдвига перемычки совпадают, можно записать

$$M_{изг} = M_{ср} = F l_{ср}, \quad (56)$$

где $l_{ср} = l_n / 3$ - плечо равнодействующей силы среза перемычки.

Из равенства (56) с учетом (52) определена длина зоны сдвига перемычки

$$l_n = 1,95H\sqrt{B/h_n}. \quad (57)$$

Тогда сила среза перемычки F будет

$$F = 2/3\sqrt{3}\sigma_s h_n 1,95H\sqrt{B/h_n} \approx 0,756\sigma_s H\sqrt{Bh_n}. \quad (58)$$

Равнодействующая сил сопротивления заготовок пластическому изгибу составит

$$G = \frac{M_{изг}}{l_n/3} = \frac{3\sigma_s BH^2}{1,95H\sqrt{B/h_n}} \approx 1,54\sigma_s \frac{BH}{\sqrt{B/H}} = 1,54\sigma_s H\sqrt{Bh_n}. \quad (59)$$

Под действием сил P , приложенных к узким граням заготовок, возникает момент $M_{скр} = Pl$ (здесь $l = B$ - расстояние между векторами сил P (см. рис. 18), который способствует скручиванию раската вокруг продольной оси. Этому моменту противодействуют моменты, создаваемые силами трения на контактной поверхности $T_f = Pf$, и силами противодействия скручиванию раската T , действующими со стороны стенок ручьев на вершины заготовки. Для определения значений этих сил использовано уравнение равновесия проекций сил на ось OY

$$\Sigma P_y = 0; Q - T_y - T_f = 0 \text{ или } Q - T_y - Pf = 0, \quad (60)$$

где Q - сила взаимного вдавливания прямоугольных заготовок в месте перемычки вдоль оси OY , возникающая как реакция от силы T .

При достижении нормальными напряжениями σ_z в зоне разделения перемычки предела текучести σ_s начнет происходить вмятие прямоугольных профилей друг в друга с прекращением процесса разделения и возрастанием скручивающего момента от силы P . Это в конечном итоге приведет к скручиванию двухниточного раската вокруг продольной оси в разделяющем калибре. В связи с этим предельно-допустимое значение силы Q будет

$$Q = 2/3 \times q_n \sigma_s = 0,867\sigma_s H\sqrt{Bh_n}. \quad (61)$$

Из (60) сила противодействия скручиванию раската со стороны валка

$$T_y = Q - fP. \quad (62)$$

Уравнение равновесия проекций сил на ось OZ таково

$$\Sigma P_z = 0; F + G - P - T_z = 0 \text{ или } F + G - P - T \sin\theta = 0. \quad (63)$$

Пренебрегая произведением $T \sin\theta$ (в связи с малостью угла выпуска стенки ручья θ) из уравнения (63) найдена результирующая сила P действия всех вертикально направленных сил: $P = F + G$.

Подставляя значения F и G из (55) и (59), найдем силу прокатки

$$P = 2,294\sigma_s H\sqrt{Bh_n}. \quad (64)$$

Для определения предельно допустимых значений толщины перемычки использовано уравнение равновесия моментов, действующих со стороны валка на прямоугольный профиль относительно продольной оси раската OX

$$\Sigma M_o = PB/2 - T_y(H - h_n/2 - \Delta h/2) - T_z B = 0, \quad (65)$$

где Δh - конечная величина взаимного смещения заготовок.

Решая уравнение (65) относительно толщины перемычки с учетом уравнений (62), (64) и (61) (с целью упрощения решения составляющей T_z пренебрегли), получена предельно допустимая относительная толщина перемычки

$$\frac{h_n}{H} = \frac{0,867 - 1,147B/H}{0,433 + 0,867\Delta h/h_n}. \quad (66)$$

Преобразованием зависимости (66), определена максимальная допустимая величина отношений сторон прямоугольных профилей в двухниточном раскате

$$B/H = 1,133 - (0,378 + 0,756\Delta h/h_n)h_n/H. \quad (67)$$

На основании анализа уравнения регрессии (66) и (67) установлен характер влияния факторов прокатки на h_n/H . Уравнения используют при разработке калибровок валков для двухручьевого прокатки (ДПР) арматурных профилей.

Принципиальная схема ДПР арматурных профилей с использованием способа продольного разделения раската взаимным смещением сочлененных прямоугольных профилей показана на рис. 7.

В случае трехручьевого прокатки-разделения раскат формируют таким образом, чтобы зоны сочленения смежных заготовок ("фиктивные" перемычки) лежали по одну сторону от горизонтальной диагонали средней заготовки (см. рис. 9г). Вследствие того, что силы прокатки со стороны валков на металл равны между собой, действуют навстречу друг другу и плечи приложения этих сил равны (см. рис. 176), момент, опрокидывающий раскат, отсутствует и разделение раската происходит ус-

тойчиво.

Основным параметром, определяющим разделение, является величина взаимного сдвига заготовок. При исследованиях [18], проведенных на свинцовых и стальных образцах при различных температурах металла в момент разделения, установлено, что для стабильного разделения необходимо обеспечить взаимное смещение заготовок на величину, равную двукратной толщине перемычки. Увеличение требуемой величины смещения заготовок, в сравнении с условиями идеального среза при сдвиге, связано с одновременным наличием в зоне разделения напряжений сдвига и растяжения.

Поворот смещаемых заготовок вокруг перемычек, возникающий при их сдвиге, можно уменьшить и полностью устранить за счет уменьшения плеча момента. Для этого целесообразно формировать локальные продольные утолщения клиновидной формы на гранях смещаемых заготовок, расположенных перпендикулярно направлению сдвига. В этом случае в момент захвата металла в чистовом калибре первоначальный контакт с валками осуществляется в местах утолщений. Наличие утолщений приводит к тому, что уменьшается плечо силы прокатки, и изменяется ее направление в поперечном сечении очага деформации так, что ее продолжение проходит через перемычку (рис. 19в). В этом случае отсутствует изгибающий момент при сдвиге заготовок, и реализуется схема, близкая к чистовому срезу при сдвиге.

Для проектирования разделяющего многоручьевого калибра требуется знание размеров и формы утолщений, которые определены путем условного деления процесса разделения перемычек на две стадии. Первоначально происходит смятие утолщений на гранях смещаемых заготовок, а затем деформация локализуется в зонах сочленения заготовок, и происходит сдвиг смещаемых заготовок относительно удерживаемых с разделением перемычек.

Разделение раската срезом перемычек будет иметь место при удовлетворении неравенства: $P_{cp} \leq P_{св}$, здесь P_{cp} - сила, необходимая для разрушения перемычки при сдвиге заготовок; $P_{св}$ - проекция силы смятия утолщений на вертикальную плоскость.

Для того, чтобы сила $P_{св}$ постоянно действовала вблизи зоны сочленения заготовок, утолщения должны иметь треугольную форму с углами наклона граней утолщений к грани заготовки равными φ и θ , (см. рис. 19г). По мере продвижения переднего торца раската по очагу деформации происходит обжатие утолщений.

Теоретическое решение условий течения металла в очаге деформации получено уравнение

$$h_{ym} \geq (\tau_{cp} / \sigma_s) h_n \operatorname{tg} \varphi. \quad (68)$$

Как известно, отношение τ_{cp} / σ_s составляет $0,7 \div 0,8$, поэтому для практического применения формулу (68) удобно представить в виде полуэмпирической зависимости: $h_{cp} = (0,7 \div 0,8) h_n \operatorname{tg} \varphi$.

Для компенсации деформации удерживаемых заготовок необходимо на их гранях предварительно формировать местные продольные утолщения, толщина которых не превосходит половины толщины перемычки.

Исследование продольного разделения трехниточного раската произведено на полупромышленном стане 250. Экспери-

ментально установлено, что рационально производить прокатку-разделение при толщине перемычек менее 15% толщины заготовок, изменение размера стороны заготовки при этом составляет 2-4%. После достижения толщины между разделяемыми частями 40-60% первоначальной ее толщины утяжка заготовок

практически прекращается и реализуется непосредственно разделение. Для повышения устойчивости процесса разделения и компенсации утяжки при проектировании калибровки необходимо предусматривать обжатие смещаемых заготовок со степенью деформации 2-5%.

Разработаны и другие варианты продольного разделения многониточного раската срезом перемычек.

3. 2. Разделение раската разрывом перемычки

Продольное разделение многониточного раската можно обеспечить путем создания в зоне перемычки растягивающих напряжений за счет взаимного смещения соединенных заготовок под действием осевых сил, создаваемых прокаткой раската в калибрах с увеличенным расстоянием между осями ручьев, в клиновидных гребнях валов, поворотом разноосных профилей вокруг

их продольных осей в противоположные стороны или изгибом соединенных заготовок в поперечном направлении при выходе из валков путем ребрового обжатия многониточного раската. Далее рассмотрен наиболее простой в реализации первый способ.

В многоручьевых калибрах формируют раскат, состоящий из двух или трех заготовок ромбической, овальной, шестиугольной или круглой формы поперечного сечения, соединенных между собой перемычками вдоль малых диагоналей. Разделение многониточного раската, осуществляют путем его прокатки в многоручьевом калибре с увеличенным по сравнению с предыдущим калибром расстоянием между осями ручьев (рис. 20) или с помощью неприводных роликов, имеющих угол при вершине близкий к 90° .

Анализ схемы продольного разделения сочлененных заготовок путем разрыва перемычки поперечными растягивающими силами показывает, что весь процесс можно условно разделить на три стадии. Первоначально, по мере заполнения очага деформации, нарастают горизонтальные составляющие силы прокатки и происходит одностороннее смятие вершин заготовок (см. рис. 20а). После достижения растягивающими силами критической величины, вызывающей пластическое течение металла в зоне перемычки, происходит поперечное перемещение заготовок и растяжение перемычки вплоть до ее разрыва. Заключительная стадия процесса включает деформацию разделенных заготовок в калибрах и здесь не рассматривается. При захвате раската валками в местах контакта возникают нормальные силы N , под действием которых осуществляется пластическая деформация вершин заготовок. В связи с перемещением деформируемых частиц металла по нормали к поверхности валков при продвижении раската по очагу деформации происходит поперечное проскальзывание металла с возникновением сил трения $T=fN$.

Вертикальные P и осевые Q составляющие сил таковы (см. рис. 20а): $P = R \cos(\varphi - \beta)$; $Q = R \sin(\varphi - \beta)$. Здесь $R = N \sqrt{1 + f^2}$ - равнодействующая сил N и T ; $\beta = \arctg(f)$ - угол трения; φ - угол наклона гребня калибра.

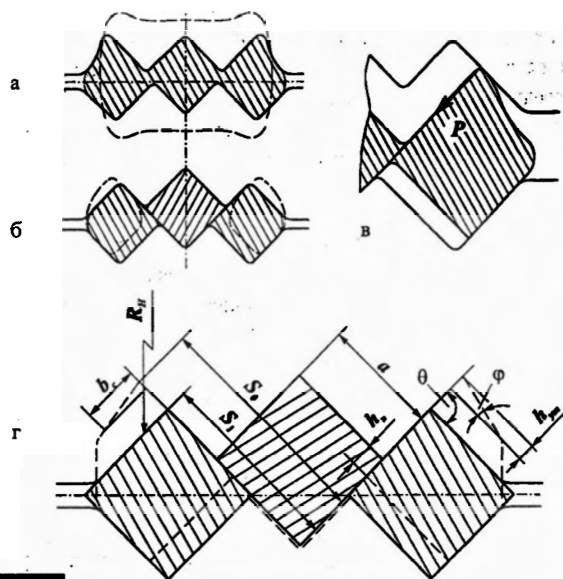


Рис. 19. Схема деформирования (а) и разделения (б) трехниточного раската взаимным сдвигом заготовок вдоль смещенных граней с компенсацией изгибающего момента (в) за счет формирования продольных утолщений (г)

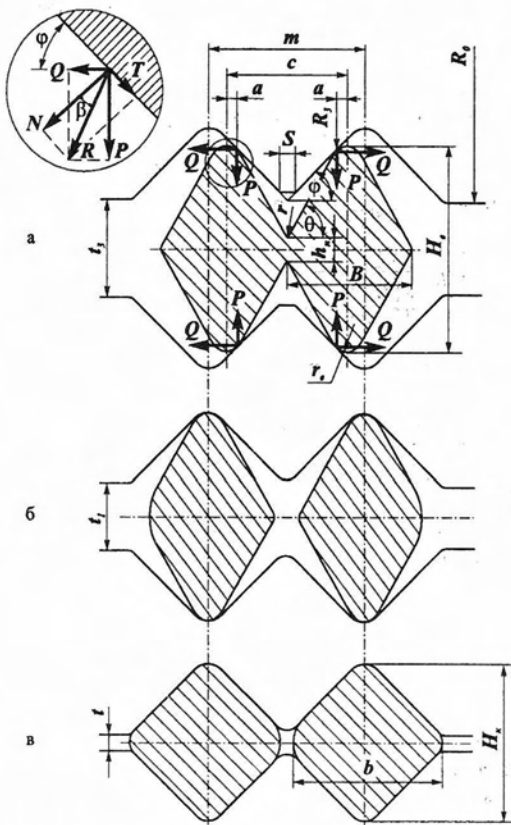


Рис. 20. Сечение очага деформации при продольном разделении раската в двухручьевом калибре разрывом перемычки: а - в момент захвата раската валками; б - после разрыва перемычки; в - на выходе из валков.

Для осуществления взаимного поперечного перемещения заготовок осевые силы Q должны обеспечить пластический изгиб заготовок в горизонтальной плоскости и преодолеть сопротивление перемычки растяжению, то есть: $Q = 0,5(G_1 + G_2)$, где G_1 и G_2 - силы сопротивления заготовки пластическому изгибу и перемычки растяжению соответственно: $G_1 = \sigma_s W_{u1} l_1^{-1}$; $G_2 = n_{\sigma_n} \sigma_{un} F_n l_2 l_1^{-1}$. Здесь l_1 - расстояние от начала зоны растяжения перемычки до точки приложения равнодействующей осевой силы Q на поверхности контакта; n_{σ_n} - коэффициент напряженного состояния металла перемычки при растяжении; σ_{un} - истинный предел текучести металла перемычки; F_n - площадь продольного сечения перемычки в зоне растяжения; l_2 - расстояние от начала зоны растяжения до точки приложения равнодействующей силы разрыва (рис. 21).

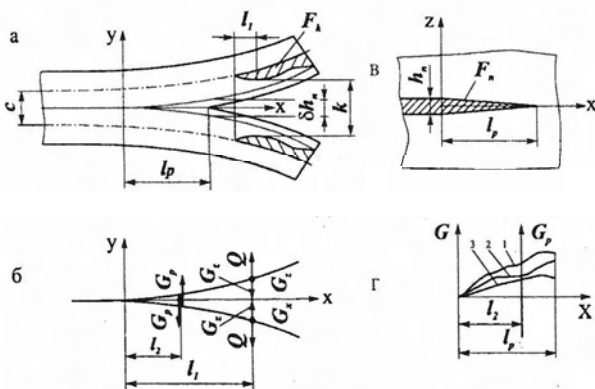


Рис. 21. Схема очага деформации при разделении раската гребнями валков: а - взаимное положение заготовок; б - схема поперечных сил; в - продольное сечение зоны растяжения перемычки; г - эпюры поперечных сил в зоне растяжения перемычки.

Экспериментальным путем установлено, что продольное сечение перемычки в зоне растяжения имеет форму близкую к форме равнобедренного треугольника: $F_n = 0,5 h_n l_p$, где l_p - длина зоны растяжения перемычки.

При захвате раската валками на первой стадии происходит преодоление сопротивления заготовок пластическому изгибу в горизонтальной плоскости с увеличением осевых сил Q до значения $0,5G_p$. При этом вертикальная составляющая сил P достигает значения

$$P_1 = 0,5 G_p \text{ctg}(\varphi - \beta). \quad (69)$$

В связи с тем, что при смятии вершин заготовок контактные напряжения достигают предела текучести можно записать

$$P_1 = 1,15 n_{\sigma_s} \sigma_s F_{k1}, \quad (70)$$

где 1,15 - коэффициент Лоде; F_{k1} - площадь контактной поверхности.

Из совместного решения уравнений (69) и (70) площадь контактной поверхности равна: $F_{k1} = 0,5 \frac{G_p \text{ctg}(\varphi - \beta)}{1,15 n_{\sigma_s} \sigma_s}$

С момента начала пластического изгиба заготовок в горизонтальной плоскости начинается растяжение перемычки вплоть до ее разрыва, что способствует увеличению вертикальной составляющей силы P на величину T : $P_2 = 0,5 G_2 \text{ctg}(\varphi - \beta)$.

За счет прироста силы P до величины P_2 увеличивается площадь смятия вершин заготовок до значения

$$F_{k2} = (P_1 + P_2) / 1,15 n_{\sigma_s} \sigma_s \quad (71)$$

Зная аналитическую зависимость для определения площади контактной поверхности F_k можно определить вертикальную составляющую смятия вершин заготовок на различных стадиях перемещения переднего торца раската по очагу деформации по зависимостям: $\Delta_1 = f(F_{k1})$; $\Delta_2 = f(F_{k2})$, а также длину зон смятия $l_{d1} = \sqrt{R_3 \Delta_1}$; $l_{d2} = \sqrt{R_3 \Delta_2}$, где R_3 - радиус валков в месте захвата раската.

В связи с тем, что растяжение перемычки обеспечивается перемещением заготовок в поперечном направлении, как жестких тел, то длина зоны растяжения перемычки определяется из равенства момента пластического сопротивления сечений заготовок изгибу и момента, создаваемого равнодействующей силы сопротивления перемычки разрыву

$$W_p \sigma_p = l_2 G_p = \psi_n l G_n, \quad (72)$$

где $\psi_n = 0,5 \div 0,7$ - плечо приложения равнодействующей силы разрыва G_p в зоне растяжения.

Совместно решив уравнения (72), (69) и (70) относительно l_p , получили длину зоны растяжения перемычки

$$l_p = \sqrt{(2W_p \sigma_p) / (n_{\sigma_n} \sigma_{un} h_n \psi_n)}$$

Максимальная длина зоны деформации раската с учетом искривления разделенных заготовок по параболическому закону составляет: $l_m = l_p \sqrt{k \delta^{-1} h_n^{-1}}$, где δ - коэффициент относительного удлинения перемычки при разрыве; k - величина перемещения разделенных заготовок в поперечном направлении на выходе из валков.

Радиус кривизны разделенных заготовок после выхода из валков при их свободном перемещении в горизонтальной плоскости нашли по аналогии с кривизной изогнутой балки

$$R_{kp} = (1 + \delta^2 h_n^2 / l_p^2)^{1,5} l_p^2 / \delta h_n$$

Сила прокатки при свободном перемещении разделенных заготовок в горизонтальной плоскости составит $P_{\text{общ}} = 2(P_1 + P_2) = (\sigma_s W_p / l_1 + 0,5 h_n l_p n_{\sigma_n} \sigma_{un}) \text{ctg}(\varphi - \beta)$, (73)

где l_1 - длина зоны деформации раската, изменяющаяся от l_p при захвате раската до l_m при установившемся процессе прокатки.

Из анализа зависимости (73) следует, что при захвате раската валками в связи с минимальным значением $l_1 = l_p$ сила прокатки $P_{\text{общ}}$ имеет максимальное значение, что способствует максимальному смятию вершин. По мере перехода к установившемуся процессу прокатки длина зоны деформации l увеличивается до значения l_m , в связи с чем уменьшается сила прокатки $P_{\text{общ}}$

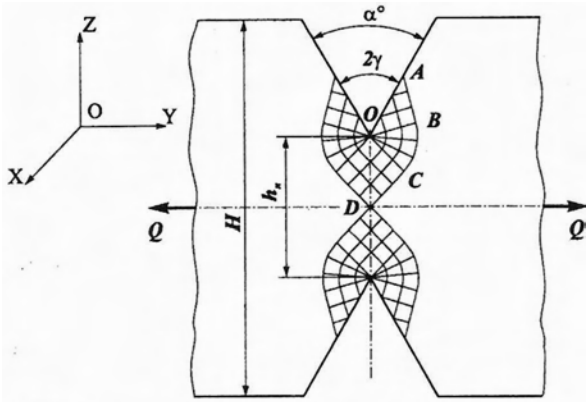


Рис. 22. Поле линий скольжения при растяжении полосы, ослабленной клиновидными двухсторонними вырезами.

и величина смятия вершин заготовок.

В связи с экстремальными условиями разделения переднего конца раската и, как правило, наличием наката на его торце, проектирование разделяющего калибра целесообразно производить по условиям разделения переднего конца, предусматривая некоторый запас поперечного перемещения заготовок

С целью математического описания процесса разрушения перемычки, в частности определения относительного удлинения перемычки δ , рассмотрена задача о растяжении полосы, ослабленной клиновидными вырезами (рис. 22).

Вспользуемся подходом Л.М. Качанова и построенными им полями линий скольжения в работе [19]. Предложенное в этой работе поле линий скольжения состоит из двух областей равномерного напряженного состояния (ΔAOB и ΔCOD) и соединяющего их центрированного веера BOC .

Из рис. 22 следует, что в ΔAOB угол наклона линии a к отрицательному направлению от Z равен $\theta = -\pi/4 - \gamma$. Главное напряжение σ_2 на площадке, параллельной границе AB , очевидно равно нулю. Из условия пластичности Треска следует, что второе главное напряжение $\sigma_1 = 2k$, где k - предел текучести на сдвиг. Отсюда получаем, что среднее напряжение $\sigma = 0,5(\sigma_1 + \sigma_2) = k$.

Таким образом, параметр ζ в ΔAOB таков

$$\zeta = \frac{\sigma}{2k} + \theta = \frac{1}{2} - \frac{\pi}{4} - \gamma. \quad (74)$$

В области ΔCOD : $\theta = -3\pi/4$.

Величина параметра ζ в этой области такая же, как и в ΔAOB . Отсюда для определения коэффициента жесткости напряженного состояния $\eta = (\sigma/k)_{\Delta AOB}$ в этой области имеем

$$\eta = 1 + \pi - 2\gamma. \quad (75)$$

Из рис. 22 следует, что пластическая область распространяется от плоскости симметрии $y = 0$ на расстояние порядка $h_n/4$ в положительном и отрицательном направлении оси OY (здесь h_n - текущее значение толщины перемычки).

Компоненты тензора скоростей деформаций определяются по формулам

$$\dot{e}_y = \frac{V}{h_n/2} = \frac{2V}{h_n}; \quad \dot{e}_z = -\dot{e}_y = -\frac{2V}{h_n}; \quad \dot{e}_x = 0, \quad (76)$$

где V - скорость растяжения по оси OX .

Интенсивность скорости деформации сдвига в области перемычки определяется соотношением

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{2}{3}(\dot{e}_x - \dot{e}_y)^2 + (\dot{e}_x - \dot{e}_z)^2 + (\dot{e}_y - \dot{e}_z)^2} = 4V/h_n.$$

Скорость изменения толщины перемычки \dot{h}_n определена с использованием соотношения: $\dot{e}_z = \dot{h}_n/h_n$.

Подставляя сюда \dot{e}_z из соотношения (76), получаем: $\dot{h}_n = -2V$.

Предположим, что при прохождении раската через калибр каждое его сечение, ортогональное оси прокатки, последовательно проходит стадии деформирования аналогичные рассмотрен-

ной выше задаче. Необходимо связать скорость растяжения V со скоростью прокатки и текущей координатой X сечения в очаге деформации.

В результате ряда преобразований получены уравнения для определения скорости растяжения

$$V = V_0 X \frac{dR(Y_A)}{dY} / 2\sqrt{X^2 + (H/2 - Z_0)^2}, \quad (77)$$

Для определения толщины перемычки

$$h_n = -\frac{1}{4} \int \frac{X^2 dY}{\sqrt{U + (H/2 - Z_0)^2}}, \quad (78)$$

где $R(Y)$ - зависимость радиуса вала от Y ; Z_0 - координата оси вала;

$$X_0 = -\sqrt{R^2(C/2) - (H/2 - Z_0)^2}.$$

Если калибр имеет коническую поверхность, то получаем

$$h_n = h_{n0} \frac{a}{2} \left[\sqrt{X_0^2 + \left(\frac{H}{2} - Z_0\right)^2} - \sqrt{X^2 + \left(\frac{H}{2} - Z_0\right)^2} \right]. \quad (79)$$

Для скорости деформации сдвига в произвольном сечении очага деформации

$$\dot{\gamma} = \frac{2V_0(-X)a}{\sqrt{X^2 + \left(\frac{H}{2} - Z_0\right)^2} \left[h_{n0} - \frac{a}{2} \left(\sqrt{X_0^2 + \left(\frac{H}{2} - Z_0\right)^2} - \sqrt{X^2 + \left(\frac{H}{2} - Z_0\right)^2} \right) \right]} \quad (80)$$

С целью определения координаты места разрыва определена величина Ψ исчерпания ресурса пластичности металла в области перемычки. С использованием работы [20] получено следующее выражение в безразмерных единицах

$$\Psi = 2a \int_{x'}^{x'_0} \frac{x' dx'}{\sqrt{(x')^2 + \left(\frac{1}{2} - Z_0'\right)^2} \left[h'_{n0} - \frac{a}{2} \left(\sqrt{(x'_0)^2 + \left(\frac{1}{2} - Z_0'\right)^2} - \sqrt{(x')^2 + \left(\frac{1}{2} - Z_0'\right)^2} \right) \right] A_p(x')} \quad (81)$$

В этом и последующих соотношениях штрихом обозначены линейные размеры, отнесенные к толщине полосы H .

В уравнении (81) приняты следующие обозначения:

A_p - пластичность металла, которая согласно [20] для углеродистых сталей в условиях горячей деформации определяется по формуле

$$A_p = e_{exp} \left(C_0 + C_1 \frac{T}{1000} + C_2 \eta + C_3 \ln \frac{\dot{\gamma}_0}{\sqrt{3}} + C_4 \frac{T}{1000} \eta + C_5 \eta \ln \frac{\dot{\gamma}_0}{\sqrt{3}} \right),$$

где T - температура деформации, $^{\circ}C$; $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$ - эмпирические коэффициенты, значения которых для разных сталей даны в работе [20]; η - параметр, величина которого определяется по формуле (75); $Z_0' = R_r + 0,5t$ (здесь R_r - радиус вала по гребню).

Выражение для интенсивности скорости деформации сдвига в безразмерных переменных имеет вид

$$\dot{\gamma} = \frac{2V_0(-x')a/H}{\sqrt{(x')^2 + \left(\frac{1}{2} - Z_0'\right)^2} \left[h'_{n0} - \frac{a}{2} \left(\sqrt{(x'_0)^2 + \left(\frac{1}{2} - Z_0'\right)^2} - \sqrt{(x')^2 + \left(\frac{1}{2} - Z_0'\right)^2} \right) \right]} \quad (82)$$

Координата места разрыва перемычки x'_p определяется как решение уравнения $\Psi(x'_p) = 1$.

Безразмерная толщина перемычки в месте разрыва h'_{np} определена с использованием соотношения (79) после подстановки в него $x' = x'_p$

$$h'_{np} = h'_{n0} - \frac{a}{2} \left[\sqrt{(x'_0)^2 + \left(\frac{1}{2} - Z_0'\right)^2} - \sqrt{(x'_p)^2 + \left(\frac{1}{2} - Z_0'\right)^2} \right]. \quad (83)$$

Результаты расчетов параметров разрушения перемычки при разрыве полосы с двухсторонними клиновидными вырезами показали, что разрушение перемычки происходит в самом начале очага деформации. Это связано с очень большой жесткостью напряженного состояния металла в пластически дефор-

мированной перемычке.

С целью проверки модели были выполнены экспериментальные исследования по разрыву плоских образцов с глубокими клиновидными вырезами, имеющими скругленные основания на испытательной машине типа ЦДМВ-30. Установлено, что экспериментальные значения показателя деформации перемычки лежат выше расчетных. Это связано с тем, что разработанная модель позволяет определить момент появления в перемычке первой макротрещины, а разрыв перемычки происходит несколько позднее. Для учета этого явления предложено ввести коэффициент g перед x_p . Сопоставление расчетных значений показателя деформации с его экспериментальными значениями позволило определить, что наилучшее согласие теории с экспериментом достигается при $g = 0,93$.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили сформулировать ряд важных для практики выводов.

С уменьшением радиуса сопряжения заготовок r уменьшается величина заусенца на заготовках при разрыве. Поэтому величину r следует принимать минимально возможной по условиям стойкости валков. Для получения качественных заготовок отношение r/h_n не должно превышать 0,5.

Учитывая, что при формировании раската в многоручьевом калибре величина радиуса гребней по мере износа валков возрастает, целесообразно производить уменьшение величины r до нуля путем обеспечения соприкосновения смежных граней заготовок в зоне сочленения в виде двухстороннего заката. Эта операция может быть осуществлена в предшествующем разделению калибре или в межклетевом промежутке, например, за счет ребрового обжатия раската или поперечной деформации металла при локальном обжатии вершин заготовок.

Для обеспечения стабильного разделения раската разрывом перемычки величина смещения заготовок должна быть больше $1,25h_n$. С целью улучшения качества мест разделения заготовок целесообразно продольное разделение двухниточного раската осуществлять при максимально возможной толщине перемычки.

Установлено также, что сила деформирования составляет 85-90% от суммарной силы прокатки. При прокатке разделенных заготовок наблюдается нарастание силы прокатки по мере заполнения очага деформации с постоянной скоростью.

В целом результаты анализа процесса прокатки-разделения на статических моделях подтвердили соответствие принятых положений при выводе теоретических зависимостей физическим особенностям процесса. Первоначально деформация локализуется в малых областях вершин заготовок. По мере прохождения переднего конца раската по длине очага деформации начинается растяжение перемычки. Окончательное разрушение перемычки происходит после достижения предельного поперечного перемещения заготовок. После разделения переднего торца раската разделенные заготовки изгибаются в горизонтальной плоскости, что приводит к дополнительным растягивающим напряжениям в зоне перемычки. Разрушение перемычки после начала стационарного процесса прокатки происходит за пределами геометрического очага деформации на его входе.

Продольное разделение многониточного раската может осуществляться с одновременным обжатием разделенных заготовок или без обжатия. Преимущества разработанного способа по сравнению с известными аналогами: возможность продольного разделения раската в прокатных валках с одновременной деформацией разделенных заготовок; гарантированный прямой выход разделенных заготовок из валков; качественное разделение раската в случае предварительной локальной поперечной деформации металла в районе перемычки; симметричная форма двухручьевых калибров и отсутствие осевых усилий, действующих на валки, упрощающих настройку валков; надеж-

ное самоцентрирование раската в прокатных валках.

3.3. Продольное разделение раската контролируемым разрывом

Продольное разделение многониточного раската контролируемым разрывом осуществляется путем создания в зоне перемычки растягивающих напряжений под действием осевых сил со стороны боковых поверхностей гребней многоручьевых калибров, внедряемых в металл (рис. 23). Путем изменения толщины перемычки задаваемого раската и зазора между гребнями валков разделяющего калибра можно менять радиус кривизны передних концов разделенных профилей на выходе из валков и на условия разделения раската. Отсутствие в месте разделения профилей шейки разрыва перемычки позволяет получить качественную поверхность готового профиля при минимальном числе последующих проходов с обжатием мест разделения. В связи с этим способ продольного разделения раската контролируемым разрывом рекомендован к использованию в чистовых группах клетей мелкосортных станов.

В многоручьевом калибре формируют раскат, состоящий из двух заготовок любой формы поперечного сечения (например, квадратной или шестиугольной), соединенных между собой вдоль одной из осей (диагоналей) относительно толстой перемычкой. Разделение двухниточного раската осуществляют в двухручьевом калибре с ручьями соответствующей формы. В отличие от способа продольного разделения раската разрывом перемычки углы наклона внутренних граней двухниточного раската θ и гребней разделяющего калибра ϕ выполняют равными или близкими друг другу. В связи с этим, в момент захвата раската валками и в период установившегося процесса прокатки контакт металла и валков осуществляется по всей ширине внутренних гребней раската, что способствует увеличению ресурса взаимного перемещения заготовок.

При захвате раската валками в месте контакта металла и

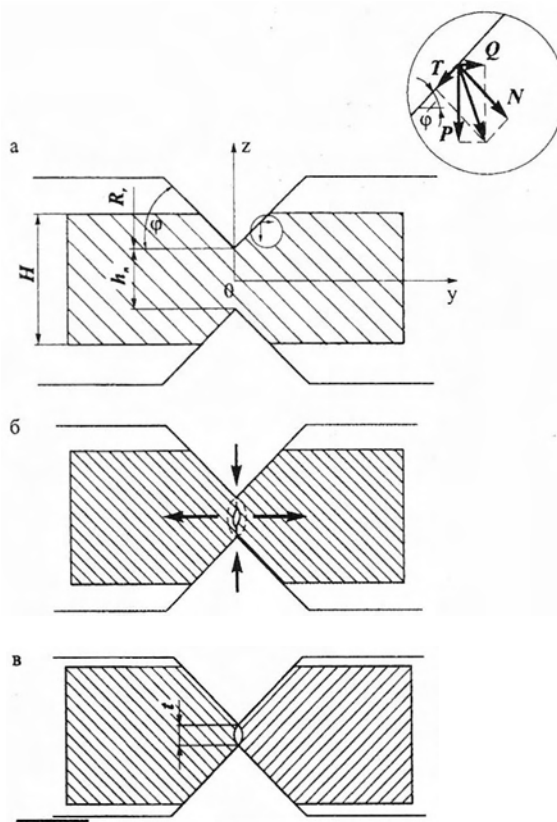


Рис. 23. Схема продольного разделения двухниточного раската контролируемым разрывом: а - момент захвата раската валками; б - формирование вогнутых поверхностей зарождающейся трещины в очаге деформации; в - разделенные профили при выходе из очага деформации

валков возникают нормальные силы N и соответствующие им силы трения $T = fN$, направленные к вершинам гребней. Составляющие вертикальных P и осевых Q сил определяются зависимостями: $P = R \cos(\varphi - \beta)$; $Q = R \sin(\varphi - \beta)$. Здесь $R = N \sqrt{1 + f^2}$ - равнодействующая сила; $\beta = \arctg f$ - угол поперечного трения; φ - угол наклона образующей гребня калибра к оси валков.

Осевые силы Q встречают сопротивление заготовок пластическому изгибу и сопротивление перемычки растяжению. Сила сопротивления квадратных профилей пластическому изгибу: $G = M_{изг} / l = \sigma_s W_{изг} / l$, где $W_{изг}$ - момент сопротивления сечения профилей пластическому изгибу; l - плечо приложения силы сопротивления. Сила сопротивления перемычки растяжению $F = \sigma_s q_n$ (здесь σ_s - среднее напряжение сопротивления перемычки растяжению; q_n - площадь продольного сечения перемычки в зоне ее растяжения).

В начале очага деформации в связи с тем, что $Q < G + F$, имеет место пластическая деформация раската с незначительным обжатием внутренних граней профилей у перемычки гребнями калибра. По мере утонения перемычки гребнями валков уменьшается сила сопротивления перемычки растяжению F и с момента, когда $Q > G + F$, начинается растяжение перемычки, сопровождаемое взаимным перемещением квадратных профилей в поперечном направлении. Одновременно с растяжением перемычки осуществляется ее обжатие гребнями валков, что способствует контролю ее формы и размеров. На выходе из очага деформации происходит разрушение перемычки.

С целью получения аналитических зависимостей, определяющих формоизменение и энергосиловые параметры в процессе продольного разделения двухниточного раската контролируемым разрывом, проведены экспериментальные исследования на полупромышленном прокатном стане 250. Исследовали продольное разделение двухниточных раскатов с квадратными профи-

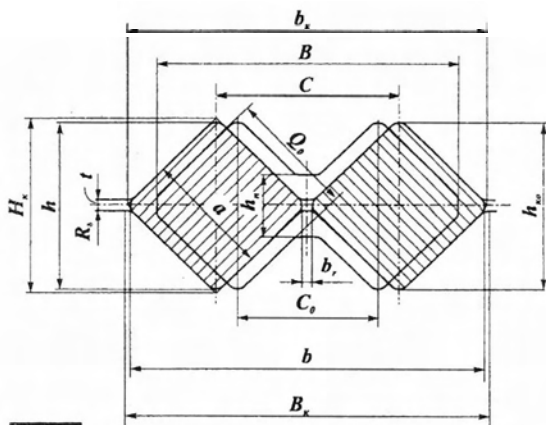


Рис. 24. Схема деформации двухниточного раската в разделяющем двухручьевом калибре.

лями, соединенными по диагонали перемычкой толщиной около половины ширины грани квадратного профиля.

Двухниточные раскаты, сформированные в двухручьевых калибрах, подвергали продольному разделению в разрезных калибрах. Схема продольного разделения раската в разделяющем калибре показана на рис. 24.

При продольном разделении раскатов исследовали: $h = a/a_0$ - относительное обжатие сторон квадратного профиля; μ - коэффициент вытяжки; $\psi = M/2Pl_d$ - коэффициент плеча равнодействующей силы прокатки; $n_\sigma = P/F_k s_\sigma$ - коэффициент напряженного состояния металла в калибре. Здесь $l_d = [(h_n - t)R\sigma]^{0,5}$ - максимальная длина очага деформации в разрезном калибре; $F_k = 0,5(C + C_0) l_d$ - площадь контакта (C и C_0 - соответственно расстояние между осями ручьев разделяющего калибра и квадратными профилями двухниточного раската).

Продольное разделение двухниточных раскатов осуществляли при разной величине зазора t между гребнями разрезного калибра. Обработку результатов экспериментального исследования производили методом регрессионного анализа на ЭВМ. Получены следующие уравнения регрессии

$$\mu = 1,092 - 0,5925t/a_0; \quad (84)$$

$$\eta = a/a_0 = 0,9564 + 0,923t^2/a \quad (85)$$

$$\psi = 0,4844 + 0,0308t^2/a_0^2 \quad (86)$$

$$n_\sigma = 1,0445 + 0,2182t^3/a_0^3 \quad (87)$$

1. Статистические оценки уравнений регрессии даны в табл. 1

Таблица 1
Статистические оценки уравнений (84) + (87)

Уравнение	Параметр	Коэффициент множественной корреляции k	Значения критерия Фишера		Остаточная сумма квадратичного отклонения $S_{ост}$
			расчетное	табличное	
84	μ	0,940	63,84	2,44	0,0009
85	η	0,904	53,32	2,44	0,0001
86	ψ	0,911	32,75	2,44	0,0043
87	n_σ	0,901	51,56	2,44	0,0001

Из приведенных данных видно, что полученные уравнения регрессии достаточно точны.

В процессе исследования продольного разделения двухниточного раската в разделяющем калибре (см. рис. 24) установлено, что в зависимости от величины зазора между гребнями валков t , происходит изменение кривизны передних концов разделенных квадратных профилей при выходе из валков. При малом значении зазора $t = 0,5$ мм между гребнями разрезного калибра происходит изгиб разделенных заготовок навстречу друг другу. С увеличением зазора наблюдается увеличение радиуса кривизны изгиба вплоть до прямолинейного выхода разделенных заготовок ($t = 1,4$ мм). При дальнейшем увеличении зазора, вплоть до прекращения разделения, происходит изгиб разделенных квадратных профилей в противоположные стороны. Такое поведение передних концов разделенных заготовок обусловлено соответствующим их силовым взаимодействием с боковыми стенками разделяющего калибра.

Принципиальная схема реализации разработанной технологии двухручьевого прокатки-разделения с продольным разделением раската контролируемым разрывом перемычки в условиях мелкосортного стана показала на рис. 25. Исходной заготовкой может служить промежуточный раскат прямоугольного или квадратного сечения. Из этой заготовки в двухручьевом калибре формируют двухниточный раскат, представляющий собой два квадратных профиля, соединенные между собой перемычкой. Наличие относительно большого зазора между гребнями валков формирующего калибра обеспечивает самоцентрирование задаваемой прямоугольной заготовки боковыми стенками калибра.

Продольное разделение раската осуществляют в симметричном разделяющем калибре, обеспечивающим самоцентрирование двухниточного раската гребнями валков. Разделенные квадратные заготовки после разведения в горизонтальной или вертикальной плоскости с помощью выводной двухканальной проводки пониточно прокатывают в готовый профиль в соответствии с рис. 25.

Возможные схемы реализации технологии двухручьевого прокатки-разделения с контролируемым разрывом перемычки в чистовых группах клетей современных мелкосортных станов

приведены на рис. 26. На рис. 26а и 26б показаны схемы двухручьевого прокатки-разделения для мелкосортных станов, включающих три группы клеток, в том числе чистовую группу из шести клеток с чередующимися вертикальными и горизонтальными валками. Конструкция клеток этих станов позволяет производить замену вертикальных клеток на горизонтальные, при наличии таковых. В противном случае на этих станах можно применить схему двухручьевого прокатки-разделения, показанную на рис. 26е (последние шесть клеток). На рис. 26в+26г показаны схемы двухручьевого прокатки-разделения в условиях мелкосортных станов, включающих две группы клеток, в том числе чистовую группу из восьми клеток с чередующимися вертикальными и горизонтальными клетками. Конструкция вертикальных клеток этих станов не позволяет произвести их замену на горизонтальные. При реализации двухручьевого прокатки-разделения в трех традиционно установленных горизонтальных клетках (рис. 26в) на место неиспользуемых вертикальных клеток устанавливаются транспортные желобы. С целью более компактного расположения вспомогательного оборудования продольное разделение раската может осуществляться в валках вертикальной клетки (см. рис. 26г) или двухниточная прокатка разделенных заготовок производится в предчистовой вертикальной клетки на двух горизонтальных уровнях (рис. 26д). На рис. 26е показана схема реализации двухручьевого прокатки-разделения с использованием всех клеток чистовой группы стана для прокатки очень мелких профилей, например арматурного профиля №8, или при увеличении сечения исходной заготовки.

Разработанный способ обладает следующими преимуществами перед известными аналогами: симметричная форма двухручьевых калибров и отсутствие осевых сил, упрощающие на-

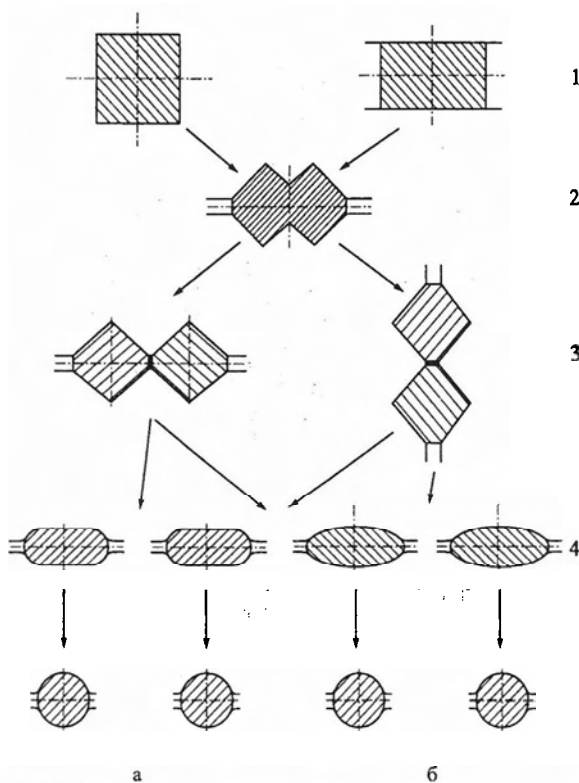


Рис. 25. Принципиальная схема двухручьевого прокатки-разделения арматурного профиля с продольным разделением двухниточного раската контролируемым разрывом.

1. широкий диапазон толщины перемычки при продольном разделении раската, способствующий уменьшению числа пропусков и увеличению срока службы валков; отсутствие шейки разрыва в месте разделения заготовок; надежное самоцентрирование раската в двухручьевом калибре; относительно неглубокий врез ручьев многоручьевого калибра в валки, способствующий снижению их расхода; относительно большой угол (преимущественно 90°) у вершин гребней двухручьевого калибра, повышающий срок службы валков; возможность контроля (управления) процессом разделения раската.

Исходя из анализа известных способов продольного разделения раската следует заключить, что разработанный способ продольного разделения раската контролируемым разрывом перемычки является наиболее приемлемым для реализации двухручьевого прокатки-разделения в условиях чистовых групп клеток мелкосортных станов.

На рис. 27 показаны возможные схемы реализации разработанных способов продольного разделения двухниточного раската на сортовых станах различного типа: непрерывных, полунепрерывных и линейных.

Таким образом, представленные материалы позволяют сделать вывод о том, что разработаны, систематизированы и проанализированы, теоретически и экспериментально исследованы следующие способы продольного разделения многониточных раскатов в прокатных валках: срезом перемычек путем поворота сочлененных разноосных профилей вокруг продольных осей или их взаимным смещением вдоль совмещенных граней; разрывом перемычек путем прокатки в калибрах с увеличенным расстоянием между осями ручьев по сравнению с расстоянием между осями разделяемых профилей; контролируемым разрывом. Оценены преимущества разработанных способов по сравнению с известными аналогами и их недостатки.

4. Исследования течения металла при прокатке в многоручьевом калибре

В зависимости от способа продольного разделения раската и технологических особенностей стана возможны различные формы поперечного сечения профилей и варианты их совмещения в многониточном раскате. При решении задач по определению формоизменения металла и энергосиловых параметров прокатки необходимо знать характер течения металла в очаге деформации.

Характер поперечной и высотной деформации в поперечных сечениях образцов исследованы с помощью составной координатной решетки с использованием составных слоистых образцов оригинальной конструкции. Информацию одновременно о трех взаимно перпендикулярных составляющих перемещения металла получали с использованием координатной сетки, образованной в наклоненной к продольной оси составного образца

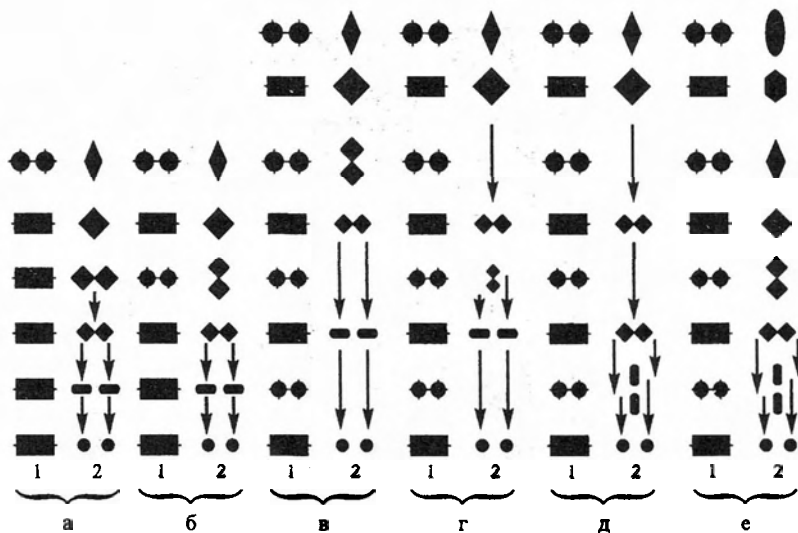


Рис. 26. Возможные схемы реализации двухручьевого прокатки-разделения контролируемым разрывом (а + е) в чистовых группах клеток мелкосортных станов: схемы расположения клеток (1) и калибровка валков (2)

плоскости сечения.

Составные образцы изготавливали плоскими или профильными с заданной формой поперечного сечения. После прокатки недеформированную часть образца и отпечаток очага деформации разрезали по длине дисковой фрезой на несколько поперечных темплетов. Полученные темплеты фотографировали и в увеличенном масштабе проецировали на миллиметровую бумагу. Накладывая семейства вертикальных и горизонтальных линий склейки одной плоскости поперечных сечений образцов, получали координатную сетку. Накладывая деформированную сетку (после прокатки) на недеформированную (до прокатки), получали перемещения узлов сетки в процессе деформации (рис. 28). Откладывая вертикальные и горизонтальные проекции перемещения узлов сетки от их начального положения, строили эпюры вертикальных и горизонтальных составляющих перемещений частиц металла (рис. 28). На основании полученных эпюр перемещений строили поля вертикальных и поперечных составляющих перемещений частиц металла в поперечных сечениях полосы (рис. 29).

Оценку точности координатной сетки производили по результатам измерений координат спаек одной или нескольких пластин составной части образцов относительно их продольной оси симметрии с использованием методов математической статистики. Относительная максимальная суммарная погрешность нанесения и измерения координатной сетки и изготовления координатной решетки не превышала $\pm 0,6\%$. Погрешность построения полей перемещений включает погрешность построения двух координатных сеток (до и после прокатки) и в зависимости от толщины линий и масштаба построения составляет $0,1 \div 2$ мм. Погрешность построения эпюр и затем полей перемещений составляет в целом также $0,1 \div 0,2$ мм. В конечном итоге относительная максимальная погрешность построения полей перемещений не превышала 15%, что вполне допустимо для их использования с целью анализа характера течения металла.

4.1. Течение металла в двухручьевом калибре с шестиугольными ручьями

Исследование течения металла осуществлено при прокатке в двухручьевом калибре с $h=14$ мм и $h_n=6,2$ мм (рис. 30а) слоистых прямоугольных свинцовых образцов с размерами $H \times B = 15 \times 39$ мм. На рис. 31 и 32 приведены результаты экспериментального исследования течения и деформации металла в трех поперечных сечениях очага деформации: а- $x/L=0,15$; б- $x/L=0,3,57$; в- $x/L=1,0$ (x - текущее значение длины очага деформации от его входа; L - длина очага деформации).

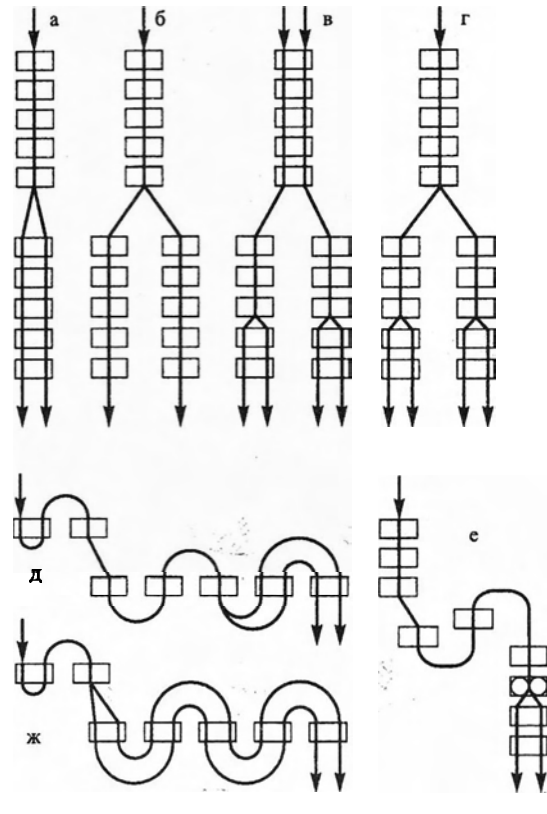


Рис. 27. Возможные схемы реализации двухручьевого прокатки-разделения сортовых профилей в условиях сортовых станков различного типа: а-ж - варианты реализации.

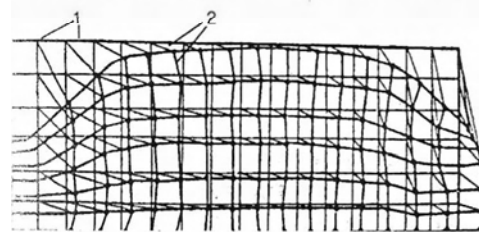


Рис. 28. Наложенные друг на друга координатные сетки до (1) и после (2) прокатки прямоугольного образца в двухручьевом калибре с шестиугольными ручьями

ординатных сеток (до и после прокатки) и в зависимости от толщины линий и масштаба построения составляет $0,1 \div 2$ мм. Погрешность построения эпюр и затем полей

речном сечении очага деформации имеют место схемы главных деформаций, представленные на рис. 33.

В объеме всего очага деформации в продольном направлении металл подвержен деформации растяжения. На выходе из очага деформации (см. рис. 33б) весь объем металла в вертикальном направлении испытывает деформацию сжатия. В поперечном направлении на более обжимаемых участках (*olmp, cdfe*, рис. 33) имеет место деформация растяжения, а на менее обжимаемых участках (*lefm*) - деформация сжатия. На входе в очаг деформации (см. рис. 33а), в отличие от предыдущего, металл в периферийных зонах необжимаемых участков (*el, mf*) в верти-

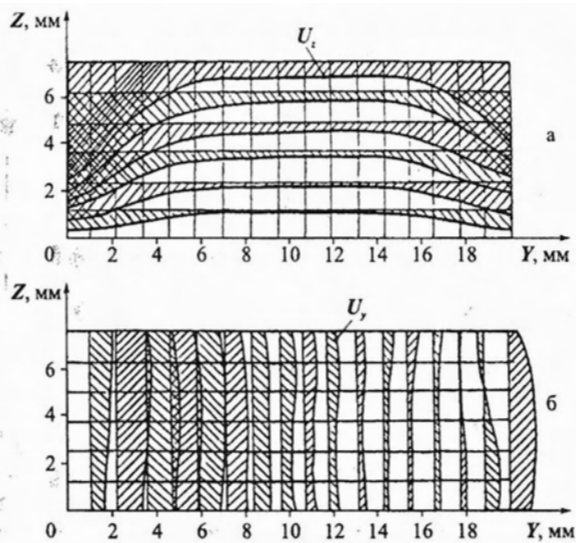


Рис. 29. Эпюры вертикальных (а) и горизонтальных (б) составляющих перемещений металла после прокатки прямоугольного образца в двухручьевом калибре с шестиугольными ручьями.

Анализ данных, представленных на рис. 31 и 32 показал, что характер поперечной деформации металла в двухручьевом калибре с шестиугольными ручьями определяется результатом взаимодействия более обжимаемых участков металла (в центральной части под гребнем и у кромок под наклонными стенками калибра) и менее обжимаемых участков, расположенных между более обжимаемыми. Более обжимаемые участки характеризуются поперечным растяжением металла, а менее обжимаемые (необжимаемые) участки - поперечным сжатием металла. На эпюрах поперечных перемещений границы этих участков совпадают с экстремумами линий эпюр. В начале очага деформации имеет место область отрицательных перемещений, противоположных направлению развития уширения, ограниченная линиями нулевых поперечных перемещений *l-l* и *d-d* и развитая по всей высоте раската. У выхода из очага деформации эта область выклинивается в небольшую приконтактную зону, ограниченную линией нулевых перемещений *l-d*.

Из анализа результатов исследования кинематики течения металла можно предположить, что в по-

кальном направлении практически не подвержен деформации.

4.2. Течение металла в двухручьевом калибре с диагональными квадратными ручьями

Деформацию прямоугольного образца сечением $H \times B = 19 \times 30$ мм производили в двухручьевом калибре с основными размерами $B_k = 34$ мм; $h_k = 17,7$ мм; $h_n = 5$ мм (рис. 30б). Образцы для исследования течения металла были выполнены в виде двух брусков, состоящих из пластин со взаимным их смещением относительно друг друга по длине образца. Получены поля перемещения металла и деформации ячеек. По форме графики аналогичны рис. 31 и 32 и нами не приводятся.

На основании анализа результатов исследования течения металла можно предположить, что в очаге деформации имеет место схема главных деформаций, показанная на рис. 34. Во всем объеме очага деформации металл подвержен высотной деформации сжатия и продольной деформации растяжения. В центральных областях ручьев калибра, ограниченных линиями $a-b, f-e$ и $l-k, c-d$ (см. рис. 34), металл подвержен поперечной деформации сжатия, а в районе перемычки (область, ограниченная линиями $e-f$ и $k-l$), и у боковых поверхностей полосы (области $a-b, c-d$) металл подвержен поперечной деформации растяжения. Зоны металла у вершин ручьев калибров ($m-n, o-p, r-s, t-y$) являются областями затрудненной высотной деформации.

4.3. Течение металла при прокатке двухштиточного раската в двухручьевом калибре с прямоугольными диагональными ручьями

Исследована пластическая деформация металла при прокатке двухштиточного раската, состоящего из круглых профилей соединенных перемычкой, в двухручьевом калибре с прямоуголь-

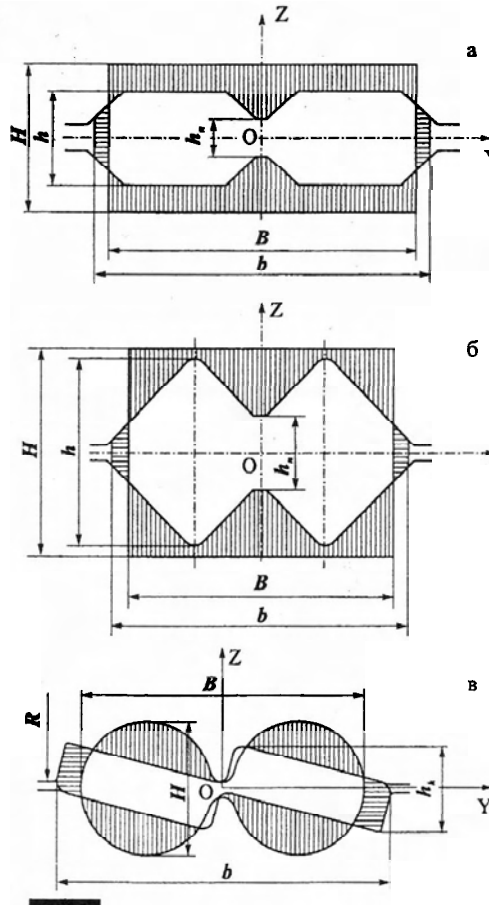


Рис. 30. Схемы деформации образцов в двухручьевом калибре с шестиугольными (а), квадратными (б) и прямоугольными диагональными (в) ручьями.

ными ручьями врезанными на диагональ (рис. 30в). Образцы состояли из пластин толщиной 2 мм и имели форму двух кругов соединенных перемычкой и смещенных относительно горизонтальной оси на 2 мм. Для исследования были отобраны темплеты на расстояниях: $a-x/L = 0,033$; $b-x/L = 0,45$; $v-x/L = 1$ от начала очага деформации.

В результате исследований установлено, что максимальная высотная деформация наблюдается в центральной части ручьев калибра и уменьшается в направлении перемычки и боковых частей профилей. По длине очага деформации степень высотной деформации металла возрастает по мере увеличения абсолютного обжатия и ширины обжимаемых участков. В общем, конечную (на выходе из очага деформации) вертикальную деформацию металла по высоте раската можно считать равномерной. Об этом свидетельствуют почти одинаковые приращения вертикального перемещения металла по высоте образца на эпюрах вертикальных перемещений и почти равномерная по высоте логарифмическая высотная деформация ячеек. Максимальная высотная деформация наблюдается в центральной части круглых профилей (ручьев калибров) и уменьшается к крайним участкам (к гребню и краям ручьев калибра).

Поперечная деформация металла характеризуется наличием линии нулевых перемещений, имеющей место по всей длине очага деформации. Можно считать, что металл со стороны верхнего или нижнего валков от середины дна соответствующего ручья калибра перемещается в поперечном направлении в сторону, определяемую направлением горизонтальной составляющей нормальной силы, возникающей на контактной поверхности металла с валком. При этом одностороннее поперечное перемещение металла, начинаясь в одном из ручьев калибра и постепенно развиваясь, переходит через зону перемычки в другой ручей калибра и в конечном счете определяет уширение металла в этом ручье. При этом в центральной зоне калибра металл либо не подвержен поперечной деформации, либо испытывает поперечную деформацию сжатия. В остальной части калибра металл подвержен поперечной деформации растяжения. Исключение составляет крайний участок правой заготовки (область, ограниченная линией $c-c$, см. рис. 30), где металл испытывает поперечную деформацию сжатия. Как уже отмечалось, это вызвано переполнением правого ручья калибра по ширине и сдерживанием свободного поперечного перемещения металла в уширение.

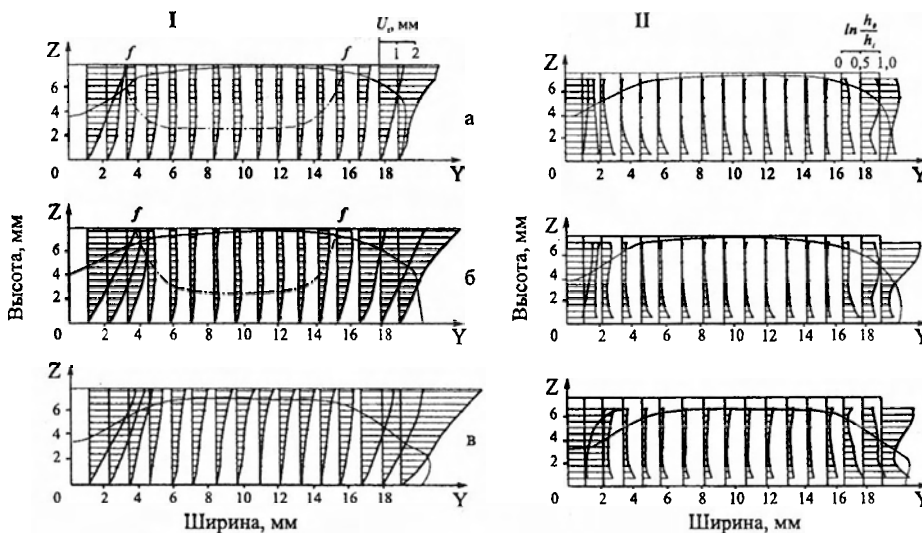


Рис. 31. Экспериментальные поля вертикальных составляющих перемещения металла (I) и логарифмическая высотная деформация ячеек (II) в поперечных сечениях (а-в) прямоугольного образца после прокатки в двухручьевом калибре с прямоугольными ручьями.

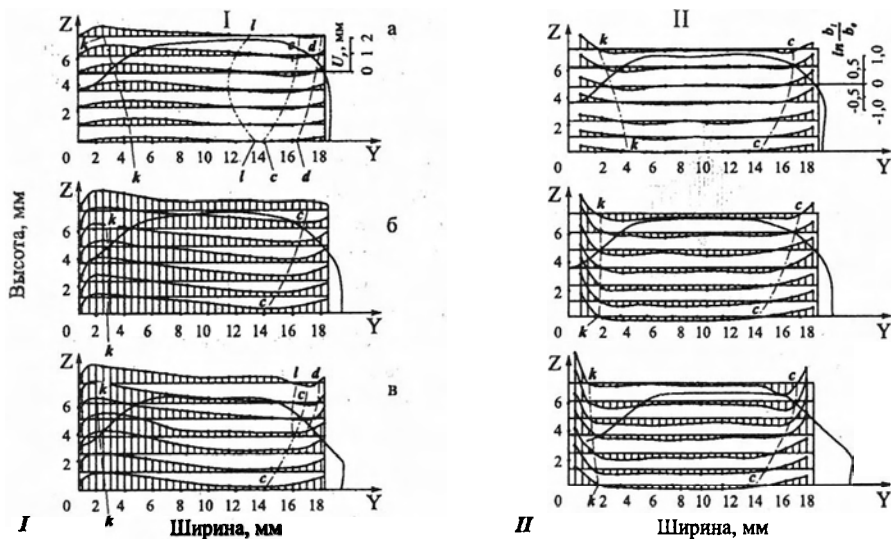


Рис. 32. Экспериментальные поля поперечных составляющих перемещения металла (I) и логарифмическая поперечная деформация ячеек (II) в поперечных сечениях (а ÷ в) прямоугольного образца после прокатки в двухручьевом калибре с шестиугольными ручьями.

ями врезанными на диагональ можно считать, что во всем объеме очага деформации металл испытывает высотную деформацию сжатия и продольную деформацию растяжения. В центральной части у перемычки металл испытывает поперечную деформацию сжатия, а в остальной части поперечного сечения раската - поперечную деформацию растяжения.

4.4. Течение металла при прокатке двухниточного раската в гладких валках

Исследована пластическая деформация металла при прокатке двухниточного раската, состоящего из круглых профилей, соединенных тонкой перемычкой, в гладких валках. Образцы склеивали из двух половин со взаимно перпендикулярными пластинами и фрезеровали в профиль, состоящий из двух полукруглых профилей, соединенных тонкой перемычкой (рис. 35). Прокатку двухниточного образца осуществляли на гладкой бочке валков с радиусом 125 мм. Ширина образца $B=45$ мм; высота $H=23$ мм; толщина перемычки $h_0=2,6$ мм; высота раската после прокатки $h=12$ мм. Поля вертикальных и поперечных составляющих перемещений частиц металла строили в трех поперечных сечениях очага деформации, расположенных в направлении прокатки: а-х/ $L=0,39$; б-х/ $L=0,78$; в-х/ $L=1$.

Анализ результатов исследования течения металла при прокатке двухниточного образца с круглыми профилями в гладких валках позволил представить, что во всем объеме очага деформации металл подвержен высотной деформации сжатия и продольной деформации растяжения. В зоне металла, примыкающего к перемычке образца, имеет место поперечная деформация сжатия, а в остальной зоне металла - поперечная деформация растяжения. Результаты исследования течения металла исполь-

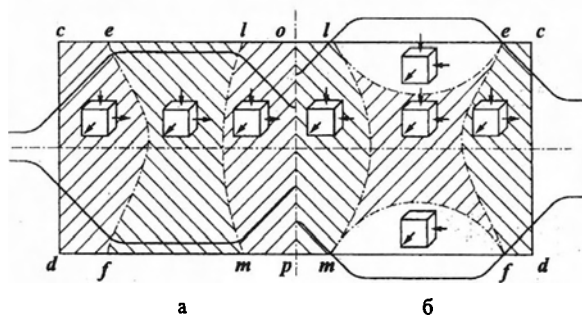


Рис. 33. Схемы главных деформаций в поперечных сечениях на выходе (а) и на входе (б) очага деформации при прокатке прямоугольного образца в двухручьевом калибре с шестиугольными ручьями

зованы при разработке виртуального поля скоростей перемещений и деформаций металла при теоретическом исследовании прокатки в многоручьевом калибре с различной формой ручьев и прокатки двухниточного раската в гладких валках.

Таким образом, впервые исследовано течение металла в очаге деформации при прокатке прямоугольных заготовок в двухручьевом калибре с шестиугольными и квадратными ручьями и двухниточных раскатов в двухручьевом калибре с прямоугольными диагональными ручьями и на гладкой цилиндрической бочке валков. Полученные результаты экспериментального исследования течения металла использованы для определения граничных условий при разработке виртуальных полей скоростей и деформаций при теоретическом исследовании прокатки в

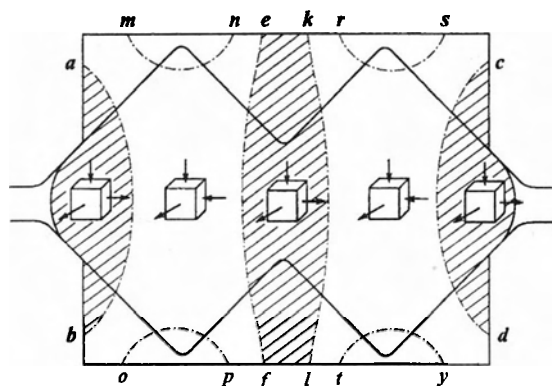


Рис. 34. Схема главных деформаций в очаге деформации при прокатке прямоугольного образца в двухручьевом калибре с квадратными ручьями.

двухручьевых калибрах и двухниточного раската в гладких валках, а в дальнейшем для расчета калибровок валков при реализации процесса многоручьевой прокатки-разделения.

5. Формоизменение и энергосиловые параметры при прокатке металла в многоручьевых калибрах

Полученные и изложенные ниже результаты исследования прокатки в двухручьевых калибрах с различной формой ручьев базируются на разработанных способах продольного разделения раската и технологических схемах двухручьевой прокатки-разделения. Решение задачи определения параметров деформации металла и энергосиловых условий в двухручьевых калибрах осуществлено с использованием вариационного принципа возможных изменений деформируемого состояния, разработанного И.Я.Тарновским и его учениками. С целью упрощения решения принята модель жесткопластической среды, определяемая выражением $T \approx \tau_0$, где T - интенсивность касательных напряжений.

5.1. Прокатка раската в двухручьевых калибрах с ромбической и шестиугольной формой ручьев

Учитывая сходство геометрической формы очага деформации при прокатке в двухручьевых калибрах с ромбическими (квадратными) и шестиугольными ручьями (рис. 36), а также общие

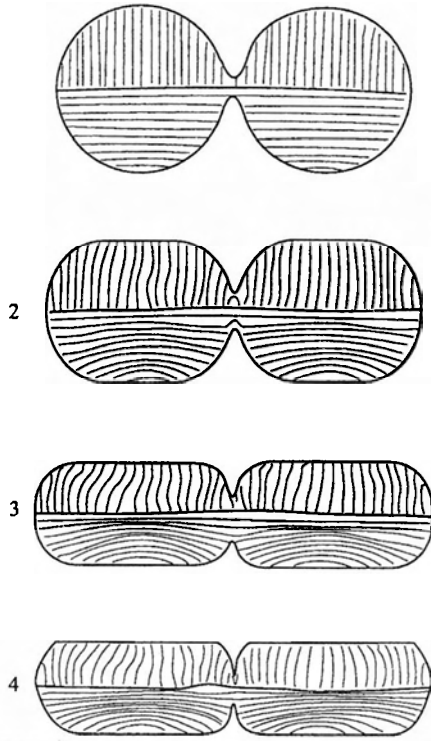


Рис. 35. Поперечные сечения составного слоистого двухниточного образца при прокатке в гладких валках (1 ÷ 4 - номера сечений по длине очага деформации).

линий и поверхностей:

- поверхность заготовки: $Z_0 = H_0$;
- поверхность вала $Z_{в1}$ на наклонных участках

закономерности течения металла в них, особенно в первоначальный период обжатия исходной прямоугольной заготовки, осуществлено описание кинематического механизма формоизменения металла в этих калибрах едиными зависимостями.

При разработке виртуального поля скоростей поперечное сечение профиля разбито на 2 зоны по ширине очага: I - ($Y=0 \div +d$), II - ($Y=d \div B$), и на 3 участка при описании геометрической формы очага деформации.

Для описания формы очага деформации приняты следующие уравнения

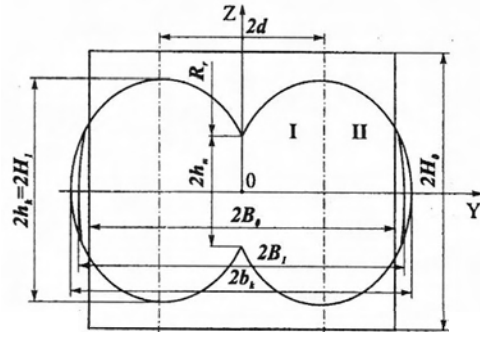


Рис. 37. Схема прокатки прямоугольной полосы в разрезном калибре: I и II - зоны очага деформации.

$$Z_{с1} = H_k \left(1 - \left| \frac{Y-d}{B_k-d} \right| \right) + \Delta h_{max} \left(1 - \frac{X}{L} \right)^2; \quad (88)$$

- поверхность вала $Z_{в2}$ на горизонтальном участке

$$Z_{с2} = h_k + \Delta h_{max} \left(1 - \frac{X}{L} \right)^2, \quad (89)$$

где H_k - половина высоты ручья двухручьевого калибра; $B_k = B_d + (2h_k - h_n)/\text{tg}\varphi$ - ширина калибра по оси симметрии; $d = 0,5(B_k - h_n/\text{tg}\varphi)$ - расстояние от оси калибра до оси ручья; $h_1 = (B_k - B_1)\text{tg}\varphi$ - толщина боковой кромки раската на выходе из калибра; Δh_{max} - максимальное из абсолютных обжатий перемычки или боковой кромки.

Для случая ромбической (квадратной) формы ручья высота калибра с учетом скругления вершины h_k является производным размером $h_k = H_k - r/(1/\cos\varphi - 1)$, где r - радиус скругления, а в двухручьевом калибре с шестиугольными ручьями h_k - основной размер, в то время как размер H_k является производным: $H_k = 0,5(h_n + B_k \text{tg}\varphi)$.

Принято, что основными размерами двухручьевых калибров (см. рис. 36) являются H_k , B_k , h_k , h_n , φ и R_n , а размеры заготовки описываются H_0 и B_0 . При этом радиус r скругления вершины ромбического ручья определяется из приведенного выше соотношения.

Размеры двухручьевого калибра и заготовки обуславливают следующую систему геометрических факторов очага деформации:

в двухручьевом калибре с ромбическими ручьями

$$m_1 = \text{tg}\varphi; m_2 = h_n/H_k; m_3 = R_n/h_n; m_4 = h_k/H_k; \quad (90)$$

$$m_5 = h_n/H_0; m_6 = b_n/h_n; m_7 = B_0/B_k;$$

$$\text{в двухручьевом калибре с шестиугольными ручьями}$$

$$m_1 = \text{tg}\varphi; m_2 = h_n/h_k; m_3 = R_n/h_n; m_4 = h_k/B_k; \quad (91)$$

$$m_5 = h_n/H_0; m_6 = b_n/h_n; m_7 = B_0/B_k.$$

Решение вариационного уравнения осуществлено в точках факторного пространства в диапазоне

для ДРК с ромбическими ручьями

$$m_1 \in (1,0 \dots 1,7); m_2 \in (0,2 \dots 0,6); m_3 \in (25 \dots 45);$$

$$m_4 \in (0,90 \dots 0,95); m_5 \in (0,8 \dots 0,90); m_7 \in (0,6 \dots 0,8);$$

для ДРК с шестиугольными ручьями

$$m_1 \in (1,0 \dots 1,7); m_2 \in (0,35 \dots 0,65); m_3 \in (35 \dots 70);$$

$$m_4 \in (0,50 \dots 0,60); m_5 \in (0,7 \dots 0,8); m_7 \in (0,7 \dots 0,8).$$

Результаты проверки адекватности математической модели прокатки в двухручьевом калибре с ромбическими ручьями показали, что погрешность логарифмического коэффициента вытяжки составляет от -11,5% до +19,9%, уширения - от -19,5% до +21,1%, силы прокатки - от -20,3% до +20,8%, момента прокатки - от -21,4% до +10,4%.

После обработки результатов решения вариационного уравнения полной мощности с использованием аппарата математического планирования машинного эксперимента методами математической статистики получены следующие зависимости:

для двухручьевого калибра с ромбическими ручьями

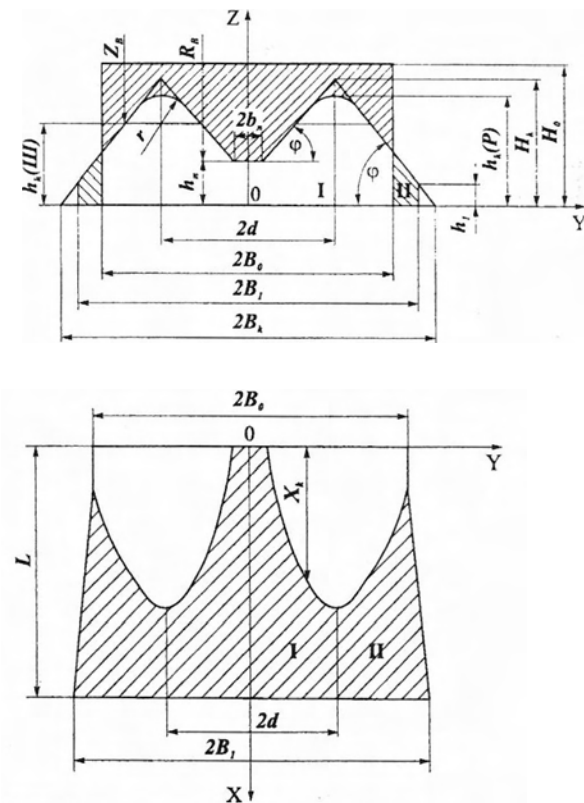


Рис. 36. Схема очага деформации при прокатке прямоугольной заготовки в двухручьевых калибрах с ромбической (Р) и шестиугольной (Ш) формой ручьев.

$$\mu_{cp} = 0,891 + 0,445m_1 - 1,5m_2 + 1,09m_4 - 1,35m_5 + 1,27m_7 - 0,152m_1m_2 - 0,458m_1m_7 + 1,36m_2^2 + 0,345m_2m_7; \quad (92)$$

$$N' = 1,72 + 0,373m_1 - 4,90m_2 - 0,017m_3 + 1,27m_4 - 1,16m_5 - 0,358m_1m_2 + 3,16m_2^2 + 0,032m_2m_3 + 0,949m_1m_7; \quad (93)$$

$$F_1 = 3,85 - 0,462m_2 + 0,383m_3 - 8,73m_5 + 0,462m_2m_7 + 4,84m_5^2; \quad (94)$$

$$\varepsilon_{cp} = 0,354 - 0,604m_2 + 0,384m_4 - 0,435m_5 + 0,35m_2^2 - 0,163m_1m_5 + 0,462m_2m_7; \quad (95)$$

$$\psi_{вал} = 0,372 - 0,24m_2 - 0,089m_4 + 0,108m_5 - 0,072m_7 + 0,089m_2^2 + 0,225m_2m_7; \quad (96)$$

$$F_{кон} = 0,618 + 2,63m_2 + 0,023m_3 - 0,293m_7 - 2,97m_2^2 + 0,044m_2m_3 + 2,94m_2m_4 - 4,96m_2m_5 + 3,87m_2m_7; \quad (97)$$

Для расчета силы прокатки $P = \beta \sigma_s n_\sigma F_{кон}$, необходимо определить коэффициент напряженного состояния $n_\sigma = N' n_1 / F_1$, сопротивление деформации $\sigma_s = f(\varepsilon_{cp}, U, t)$, площадь контакта $F_{кон} = 0,5 H_0 B_0 F_k$.

Для определения момента прокатки можно воспользоваться двумя способами: через P и $\psi_{вал}$: $M_{пр} = 2Py_{вал} L_d$, где $L_d = H_0 / n_1$; через мощность деформации $M_{пр} = N' \tau_s R_n H_0 B_0$, где H_0 и B_0 - половинные размеры заготовки.

Тогда

для двухручьевого калибра с шестиугольными ручьями

$$\mu_{cp} = 1,07 - 1,07m_2 + 2,96m_4 - 2,48m_5 + 2,86m_7 + 0,343m_1^2 + 0,433m_1m_2 - 1,6m_1m_4 + 0,724m_1m_5 - 1,45m_1m_7; \quad (98)$$

$$N' = -1,08 - 0,092m_1 + 0,109m_2 + 2,87m_4 + 3,88m_5 + 0,275m_7 + 0,159m_1^2 - 0,696m_1m_2 + 0,432m_1m_5 - 0,180m_1m_7 - 7,42m_4m_5 + 4,22m_4m_7 - 1,99m_5m_7; \quad (99)$$

$$F_1 = 0,42 - 0,251m_2 - 0,002m_3 + 0,034m_4 - 0,157m_5 + 0,041m_7 + 0,0002m_1m_3 - 0,032m_1m_5 + 0,0016m_2m_3; \quad (100)$$

$$\varepsilon_{cp} = 0,297 - 0,257m_2 + 0,669m_4 - 0,402m_5 + 0,421m_7 + 0,099m_1^2 - 0,106m_1m_2 - 0,321m_1m_4 - 0,131m_1m_5 - 0,188m_1m_7; \quad (101)$$

$$\psi_{вал} = 0,726 + 0,104m_2 - 0,934m_4 - 0,631m_7 - 0,007m_1^2 - 0,085m_1m_2 + 0,115m_1m_5 + 1,17m_1m_7; \quad (102)$$

$$F_k = 2,67 - 0,601m_1 + 2,14m_2 + 1,44m_4 - 2,11m_5 + 1,03m_7. \quad (103)$$

Результаты статистического анализа уравнений регрессии (92)-(103) показали, что они достаточно адекватно описывают исследуемое факторное пространство и в дальнейшем использованы при разработке методик расчета калибровки валков для двухручьевого прокатки-разделения арматурной стали.

5.2. Прокатка прямоугольной полосы в разрезном калибре

Схема прокатки прямоугольной полосы в разрезном калибре показана на рис. 37. Принятая на основании анализа экспериментальных данных схема очага деформации показана на рис. 38. Поперечное сечение профиля разбито на 2 зоны по ширине очага деформации: I ($Y=0...d$) и II ($Y=d...B_0$).

Форма очага деформации описана следующими уравнениями линий и поверхности (обозначения см. рис. 37 и 38): - поверхность заготовки: $Z_0 = H_0$; поверхность валка:

$$Z_e = h_k \sqrt{1 - [(Y-d)/(b_k-d)]^2} + \Delta h_n (1 - X/L)^2, \quad (104)$$

где h_k и b_k - половина высоты и ширины разрезного калибра; d - расстояние от оси калибра до оси ручья; L - длина очага деформации; $\Delta h_n = H_0 - h_k$.

Преобразуя уравнение (104) относительно Y получили уравнение границы контура поверхности контакта

$$Y_{kl} = d \pm (b_k - d) \sqrt{1 - \frac{(H_x - \Delta h_n (1 - X/L))^2}{h_k^2}}, \quad (105)$$

где H_x - текущая высота раската на границе контакта; знак "-" соответствует зоне I; "+" - зоне II.

В качестве параметров формоизменения приняты: коэффициент средней вытяжки (варьируемый параметр) $a_1 = \mu_{cp}$; параметр уширения $a_2 = \Delta b / B_0$ (зависимый от a_1). В процессе выводов получена система безразмерных факторов формы очага деформации: $m_1 = H_0 / h_k$; $m_2 = B_0 / H_0$; $m_3 = R_r / h_n$; $m_4 = B_0 / B_k$; $\eta = h_n / H_0$.

Для проверки адекватности разработанной модели прокат-

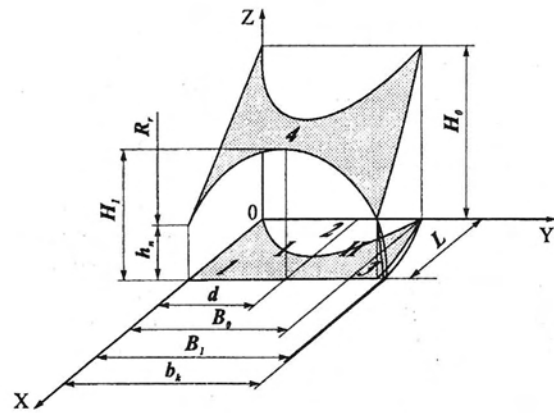


Рис. 38. Схема геометрического очага деформации в разрезном калибре (I квадрант): 1 и 3 - активные участки; 2 - пассивный участок; 4 - контактная поверхность; I и II - зоны очага деформации.

ки реальным условиям произведен сравнительный анализ расчетных и экспериментальных значений параметров формоизменения и энергосиловых условий прокатки, который показал их удовлетворительную сходимость: погрешность логарифмического коэффициента вытяжки составляет от -4,68 до +5,45%; уширения - от -14,9 до +4,94%; силы прокатки - от -4,44 до +12%; момента прокатки - от -13,03 до +4,18%.

Для получения расчетных формул параметров формоизменения и энергосиловых параметров прокатки произведен актив-

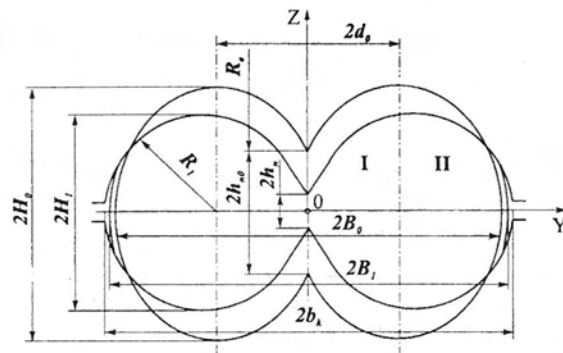


Рис. 39. Схема прокатки двухниточного раската в двухручьевом калибре с эллиптической формой ручьев: I и II - зоны очага деформации.

ный машинный эксперимент на ПЭВМ. В качестве моделируемых параметров прокатки принят коэффициент вытяжки μ_{cp} ; относительное уширение $a_2 = \Delta b / B_0$; безразмерная часть мощности деформации N' (для 1/4 очага); коэффициент напряженного состояния n_σ ; коэффициент плеча момента прокатки $\psi_{вал}$.

Решение вариационного уравнения осуществлено в точках факторного пространства в диапазоне: $m_1 \in (1,1...1,3)$; $m_2 \in (0,8...1,2)$; $m_3 \in (15...35)$; $m_4 \in (0,8...0,9)$; $h \in (0,3...0,6)$.

В результате обработки полученных при решении вариационного уравнения значений параметров формоизменения и энергосиловых параметров прокатки методами математической статистики получены уравнения регрессии

$$\mu_{cp} = 1 + 0,27 m_1^{3,8} \times m_2^{-0,104} \times m_3^{2,76} \times (1/\eta)^{0,211}; \quad (106)$$

$$a_2 = \Delta b / B_0 = 0,0172 + 0,755m_1 + 0,0015m_3 - 1,49\eta - 0,867m_1m_4 + 0,292m_1\eta + 1,28m_1\eta; \quad (107)$$

$$N' = 8,67 - 0,424m_1 + 0,697m_2 - 0,018m_3 - 17,5m_4 - 6,05h + 0,016m_1m_3 + 1,97m_1\eta - 1,01m_2m_4 + 10,9m_2^2 + 2,69m_4\eta + 1,39\eta^2; \quad (108)$$

$$n_\sigma = 31,4 - 37,6m_1 - 0,352m_2 - 0,004m_3 - 4,4m_4 - 28\eta + 14,1m_1^2 + 5,45m_1m_5 + 17,5m_1\eta + 8,2\eta^2; \quad (109)$$

$$\psi_{вал} = -3,17 + 1,8m_1 + 0,001m_3 + 3m_4 + 5,27h - 1,57m_1m_4 - 0,602m_1h$$

$$3,39m_4h - 1,82h^2; \quad (110)$$

Результаты статистической оценки уравнений регрессии (106) ÷ (110) показали их удовлетворительную сходимость.

5.3. Прокатка двухниточного раската в двухручьевом калибре с эллиптической формой ручьев

Схема прокатки двухниточного раската в двухручьевом калибре с эллиптической формой ручьев показана на рис. 39. При разработке виртуального поля скоростей принята схема очага деформации, показанная на рис. 40, на которой поперечное сечение профиля разбито на 2 зоны по ширине очага: I - ($Y = 0 \dots d_0$) и II - ($Y = d_0 \dots B_0$).

Для описания формы очага приняты следующие уравнения линий и поверхностей:

уравнение поверхности заготовки

$$Z_0 = H_0 \sqrt{1 - [(Y - d_0)/(B_0 - d_0)]^2}$$

Преобразуя это уравнение относительно Y и учитывая не-

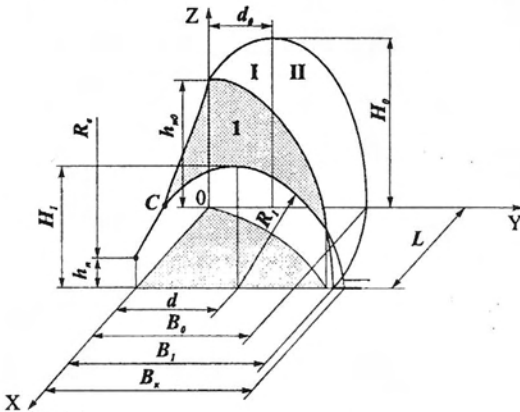


Рис. 40. Схема геометрического очага деформации в двухручьевом калибре (I квадрант): 1 - контактная поверхность; I и II - зоны очага деформации

полное заполнение калибра по оси ($B_0 < B_m$) получим уравнение бокового контура заготовки на участке 1:

$$Y_{01} = d_0 - (B_{k0} - d_0) \sqrt{1 - (Z/H_0)^2};$$

на участке 2: $Y_{01} = d_0 - (B_0 - d_0) \sqrt{1 - (Z/H_0)^2}$,

где d_0 - расстояние от оси двухниточного раската до оси профиля; B_{k0} - половина ширины предыдущего (разрезного) калибра по скелету; H_0, B_0 - половина высоты и ширины исходного двухниточного раската.

поверхность вала Z_n

-при $Y \leq Y_c$ (на участке с прямой образующей) принято уравнение поверхности в виде

$$Z_c = h_n + \frac{Z_c - h_n}{Y_c} Y + \Delta h (1 - X/L)^2 + S;$$

-при $Y > Y_c$ (образующая - окружность) принято уравнение поверхности в виде

$$Z_c = \sqrt{R_0^2 - (Y - d)^2} + \Delta h (1 - X/L)^2 + S;$$

где Z_c, Y_c - координаты точки сопряжения контуров калибра; d - расстояние от оси калибра до оси круглого ручья; $S = h_n - R_0$ - величина отклонения формы калибра от круглой; R_0 - радиус круглого профиля двухниточного раската, $\Delta h = h_{n0} - h_{n1}$ - абсолютное обжатие перемычки.

Геометрические размеры калибра и заготовки обуславливают следующую систему геометрических факторов очага деформации: $m_1 = B_k/R_0; m_2 = h_n/h_1; m_3 = R_0/h_1; m_4 = B_0/H_0; m_5 = B_{k0}/d_0; m_6 = h_1/R_0; \eta = h_1/H_0; \delta_0 = B_0/B_{k0}$.

Для проверки адекватности разработанной модели прокатки реальным условиям произведен сравнительный анализ расчетных и экспериментальных значений параметров формоизменения и энергосиловых условий прокатки, который показал их удовлетворительную сходимость: погрешность логарифмическо-

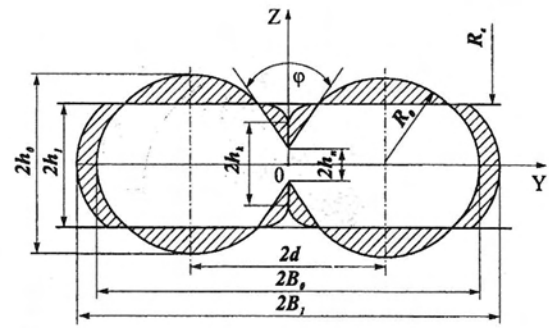


Рис. 41. Схема прокатки двухниточного раската в гладких валках.

го коэффициента вытяжки составляет от +11,05 до -7,56%; уширения - от +8,57 до -16,47%; силы прокатки - от +15 до -14,28%; момента прокатки - от +16,57 до -17,94%.

Для получения расчетных формул параметров формоизменения и энергосиловых параметров прокатки произведен активный эксперимент на ПЭВМ. В качестве моделируемых параметров прокатки принят коэффициент вытяжки μ_{cp} ; безразмерная часть мощности деформации N' (для 1/4 очага); относительная степень деформации ϵ ; коэффициент плеча момента прокатки $\psi_{нал}$. Решение осуществляли в точка факторного пространства в диапазоне: $m_1 \in (2,05 \dots 2,25)$; $m_2 \in (0,05 \dots 0,227)$; $m_3 \in (10 \dots 25)$; $m_4 \in (1,24 \dots 1,93)$; $\eta \in (0,75 \dots 0,97)$; $m_5 \in (2,15 \dots 2,30)$; $m_6 \in (0,95 \dots 1,1)$; $\delta_0 \in (0,9 \dots 0,95)$.

В результате обработки полученных при решении вариационного уравнения значений параметров формоизменения и энергосиловых параметров прокатки методами математической статистики получены уравнения регрессии

$$\mu = 1,12 - 1,69m_1 - 1,78m_2 - 0,002m_3 + 0,823m_4 + 1,33m_5 + 1,49m_6 - 2,11\eta - 0,11\delta_0; \quad (111)$$

$$N' = -0,92 - 1,31m_1 - 2,25m_2 + 0,002m_3 + 0,52m_4 + 1,35m_5 + 1,61m_6 - 1,35h + 0,32d_0; \quad (112)$$

$$\epsilon = -1,35 - 0,40m_1 - 0,31m_2 - 0,0003m_3 + 0,066m_4 + 0,82m_5 + 1,55m_6 - 0,43h - 0,69d_0; \quad (113)$$

$$\psi = 0,3125. \quad (114)$$

Результаты статистической оценки приведенных уравнений регрессии показали их достаточную точность.

Силу прокатки предложено рассчитывать по уравнению

$$P = \beta \sigma_s n_\sigma F_k = 3,2n_1^2 m_1 m_2 m_3 N' L R_0. \quad (115)$$

5.4. Исследование прокатки двухниточного раската в гладких валках

Схема прокатки двухниточного раската, состоящего из двух круглых профилей соединенных перемычкой, в гладких валках показана на рис. 41. Принятая схема очага деформации показана на рис. 42. Поперечное сечение профиля разбито на 3 зоны: II - активная зона, I - центральная и III - боковая пассивные (внешние) зоны. Нейтральная поверхность описана полиномом 2-ой степени

$$Y_n = d [1 + (1 - a_2)(X^2/L^2 - 1)],$$

где d - половина расстояния между осями круглых профилей двухниточного раската; L - длина очага деформации; a_2 - варьируемый параметр.

Поверхность исходной заготовки принята в виде

$$\text{- при } Y \geq Y_c \quad Z_0^* = \sqrt{R_0^2 - (Y - d)^2} \quad (\text{окружность});$$

$$\text{- при } Y < Y_c \quad Z_0^{**} = h_n + \frac{Z_c - h_n}{Y_c} Y \quad (\text{прямая}),$$

где h_n - половина толщины перемычки; R_0 - радиус круглого профиля; Y_c, Z_c - координаты точки С сопряжения контуров поперечного сечения раската, определяемые из условия

$$\left. \frac{dZ_0^*}{dY} \right|_{Y=Y_c} = \left. \frac{dZ_0^{**}}{dY} \right|_{Y=Y_c}$$

Поверхность EAD контакта раската с валком Z_{II} описана в

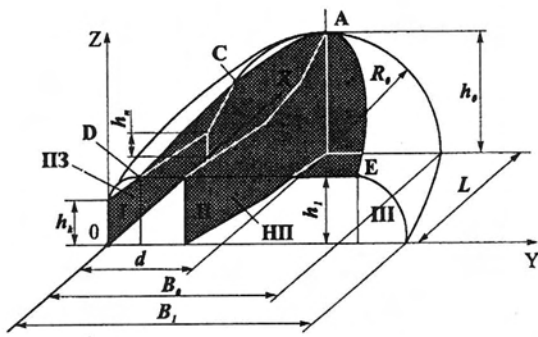


Рис. 42. Схема очага деформации при прокатке двухниточного раската в гладких валках (II квадрант); I, II и III - зоны очага деформации; НП - нейтральная поверхность; ПЗ - поверхность заката; AED - поверхность контакта; C - точка сопряжения поверхностей.

виде полинома $Z_{II} = h_x = h + \Delta h X^2 / L^2 = R_0 [\eta + (1-\eta) X^2 / L^2]$, где h - половина толщины раската после прокатки; $\Delta h = h_0 - h$ - абсолютное обжатие; $\eta = h/h_0$ - коэффициент обжатия.

Свободная поверхность раската на участке III определена с учетом допущения о линейном законе изменения уширения по толщине раската

$$Y_{III} = d + \sqrt{R_0^2 - Z^2} + \Delta B(U)(1 - Z/R_0),$$

$$Z_{III} = R_0 \left\{ 1 - \frac{1 + \Phi_4(U) \cdot f(y) - \sqrt{1 + 2\Phi_4(U) \cdot f(y) - f^2(y)}}{1 + \Phi_4^2(U)} \right\}$$

где $U = X/L$; $\Phi_4(U) = \Delta B(U)/R_0$; $f(y) = (Y-d)/R_0 \cdot \frac{Y-d}{R_0}$.

Здесь: $\Delta B = b - B$ - уширение половины раската; $\Phi_4 = \Delta B / R_0$ - относительное уширение.

Уравнение внешнего контура контактной поверхности (линия AE на поверхности контакта)

$$Y_E(X) = Y_{III} \Big|_{Z=h_x} = d + \sqrt{R_0^2 - Z^2} + \Delta B(U) \cdot (1 - h_x/R_0);$$

$$Y_E \Big|_{X=L} = d.$$

Уравнение свободной поверхности внутреннего участка I

$$Y_I = Y_D(X) \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{h_x - Z}{h_x - h_k(X)}} \right];$$

$$Z_I = h_x - [h_x - h_k(X)] \left(1 - \frac{Y}{Y_D(X)} \right)^2,$$

где $h_k(X) = h_k - (h_k - h_n) X^2 / L^2$; h_x - половина высоты концентратора у перемычки после прокатки.

Уравнение внутреннего контура контактной поверхности (линия AD на поверхности контакта)

$$Y_D(X) = U_{yI}(X) + \begin{cases} d - \sqrt{R_0^2 - h_x^2} & \text{при } h_x \geq Z_c; \\ \frac{h_x - h_n}{Z_c - h_n} Y_c & \text{при } h_x < Z_c, \end{cases}$$

где $U_{yI}(X)$ - перемещение точки внутреннего контура на поверхности контакта, полученное из условия линейного изменения перемещения по ширине контакта

$$U_{yI}(X) = \frac{\Delta B(1-\eta) \sqrt{1-\eta^2} - (m_1-1)(1-a_2)(1-U^2)}{\sqrt{1-\eta^2} + (m_1-1)(1-a_2)(1-U^2) + (1-\eta)\Phi_4(U)}$$

где $m_1 = B/R_0$ - относительная ширина заготовки.

Исходя из принятых допущений определены выражения для расчета параметров формоизменения

Относительное уширение

$$\Phi_4 = \frac{\Delta B}{R_0} = \frac{U_{yIII} \Big|_{x=0, z=0}}{R_0},$$

где $U_{yIII} \Big|_{x=0, z=0}$ - перемещение свободного контура в осевом сечении, определяемое численным интегрированием за время деформации

$$U_{yIII} \Big|_{x=0, z=0} = \int_0^t V_{yIII} dt = \int_L^0 \frac{V_{yIII}}{V_x} dx.$$

Относительное заполнение концентратора у перемычки (получено из условия постоянства объема металла)

$$\Phi_{44} = \frac{h_k}{R_0} = \frac{A_2(1-K) - A_3}{0,333\Phi_{10}},$$

где

$$\Phi_{10} = \frac{Y_D(0)}{R_0} = \frac{U_{yI}(0)}{R_0} + \begin{cases} m_1 - 1 - \sqrt{1-\eta^2}, & \text{при } \eta \geq A_7; \\ \frac{A_5(\eta - m_2)}{A_7 - m_3}, & \text{при } \eta < A_7; \end{cases}$$

$$A_2 = 0,5[(m_2 + A_7)A_5 + A_{77}A_7 + \arcsin(A_{77}) + 0,5\pi],$$

$$A_3 = \eta[m_1 - 1 + 0,5\sqrt{1-\eta^2} + \Phi_4(1-0,5\eta) - 0,333\Phi_{10}] + 0,5 \arcsin(\eta);$$

$K = 1 - 1/a_1$; $a_1 = \mu$ - коэффициент вытяжки (варьируемый параметр), $m_2 = h_n/R_0$ - относительная толщина перемычки.

Коэффициент вытяжки

$$\mu = \frac{0,5[A_5(m_2 + A_7) + A_{77}A_7 + 0,5\pi + \arcsin(A_{77})]}{0,333(\Phi_{44} - \eta)\Phi_{10} + \eta[m_1 - 1 + 0,5\sqrt{1-\eta^2} + \Phi_4(1-0,5\eta)] + 0,5 \arcsin(\eta)}$$

Для проверки адекватности разработанной модели прокатки реальным условиям произведен сравнительный анализ расчетных и экспериментальных значений параметров формоизменения и энергосиловых условий прокатки, показавший их удовлетворительную сходимость.

Для получения расчетных формул параметров формоизменения и энергосиловых параметров прокатки произведен пассивный эксперимент на ПЭВМ. В качестве моделируемых параметров прокатки были приняты: коэффициент вытяжки $\mu = a_1$, (варьируемый параметр); относительное уширение $\Delta b/R_0$; относительная высота концентратора h_k/h_0 ; коэффициент напряженного состояния металла n ; коэффициент плеча момента прокатки $\psi_{взл}$; безразмерная часть мощности деформации N' .

В качестве входных параметров прокатки использованы: $m_1 = B_0/R_0$ - относительная ширина заготовки; $m_2 = h_n/R_0$ - относительная толщина перемычки; $m_3 = R_w/R_0$ - относительный радиус вала; $1/\eta$ - коэффициент высотной деформации.

Решение вариационного уравнения осуществлено в факторном пространстве в диапазоне входных параметров: $m_1 \in (2,05...2,25)$, $m_2 \in (0,05...0,15)$, $m_3 \in (10...25)$, $1/\eta \in (1,33...2)$.

В результате обработки результатов математического моделирования методами регрессионного анализа получены уравнения регрессии

$$\mu = 1 + 0,244 m_1^{2,31} m_3^{-0,278} (1/\eta)^{4,78}, \quad (116)$$

$$\Delta b/R_0 = 0,01 m_1^{0,813} m_3^{0,335} (1/\eta)^{3,07}, \quad (117)$$

$$h_k/h_0 = 85,627 m_1^{10,9} m_2^{0,358} m_3^{0,557} (1/\eta)^{4,72}, \quad (118)$$

$$n = 1 + 0,624 m_3^{-0,09} (1/\eta)^{-0,673}, \quad (119)$$

$$\psi_{взл} = 0,428; \quad (120)$$

$$N' = 0,308 \cdot (1/\eta)^3; \quad (121)$$

Результаты статистической оценки уравнений регрессии (116) ÷ (121) показали их достаточную точность.

По полученным уравнениям регрессии построены графические зависимости моделируемых факторов от входных параметров прокатки.

5.5. Прокатка двухниточного раската в двухручьевоом калибре с прямоугольными диагональными ручьями

На рис. 43 показана схема геометрического очага деформации при прокатке двухниточного раската, состоящего из двух круглых профилей, соединенных перемычкой, в двухручьевоом калибре с прямоугольными диагональными ручьями. В связи с центральной симметрией заготовки и двухручьевоого калибра рассматривали их 1/2 часть. С учетом анализа экспериментальных данных контур заготовки разбили на два участка - прямолинейный и круглый, ручья двухручьевоого калибра - на 4 прямолинейных участка.

Уравнения поверхности заготовки

при $Y \leq Y_c$ $Z_0 = 0,5h_{n0} + \frac{Z_c - 0,5h_{n0}}{Y_c} Y$;

при $Y > Y_c$ $Z_0 = \sqrt{R_0^2 - (Y - d)^2}$,

где Z_c и Y_c - координаты точки С сопряжения прямолинейного участка и дуги окружности; h_{n0} - толщина перемычки двухниточного раската (до прокатки); R_0 - радиус окружности круглого профиля; d - расстояние между осями круглых профилей.

Уравнение поверхности валка на участках 1÷4 калибра при $X=L_d$ (на выходе из очага деформации)

$Z_{e1} = (0,5h_{n1} - Y \cos \alpha) / \sin \alpha$ при $0 \leq Y \leq 0,5h_{n1} \cos \alpha$;

$Z_{e2} = Y \tan \alpha$ при $0,5h_{n1} \cos \alpha \leq Y \leq (h_1 - 0,5h_{n1}) \cos \alpha$;

$Z_{e3} = \frac{h_1 - 0,5h_{n1} - Y \cos \alpha}{\sin \alpha}$ при $(Y \geq (h_1 - 0,5h_{n1}) \cos \alpha$

$Z_{e4} = -Z_{e1}|_{Y=0} - Y \tan \alpha = -\frac{Y \cos \alpha + 0,5h_{n1}}{\sin \alpha}$ при $Y \geq 0$,

где h_1 - толщина прямоугольного профиля после прокатки; α - угол наклона стенки ручья на участке 2.

Координаты точек 1, 2 (см. рис. 43) начала контакта валков с двухниточным раскатом при захвате

$Y_1 = d + R_0 \cos \alpha$; $Y_2 = d - R_0 \cos \alpha$.

Максимальное обжатие металла на верхнем Δh_u и нижнем Δh_n валках

$\Delta h_u = Z_{03} - Z_{e3}|_{Y=Y_1} = (R_0 - h_1 + 0,5h_{n1} + d \cos \alpha) / \sin \alpha$;

$\Delta h_n = (R_0 - 0,5h_{n1} - d \cos \alpha) / \sin \alpha$.

Радиус верхнего валка в точке начала контакта $R_{\text{внк}}$ в случае равенства зазора расстоянию между гребнями двухручьевоого калибра ($S_6 = h_{n1} \sin \alpha$) будет

$R_{\text{внк}} = R_0 + \sqrt{0,5h_{n1}(1 + \sin^2 \alpha) + (d + R_0 \cos \alpha) \cos \alpha - h} / \sin \alpha$

Длина геометрического очага деформации

$L_d = \sqrt{2R_{\text{внк}}(R_0 - h + 0,5h_{n1} + d \cos \alpha)(\sin \alpha)^{-1}}$.

Общее уравнение поверхности валка (при $i=1÷4$) имеет вид

$Z'_{ei} = Z_{ei} \pm \Delta h_e (1 - X/L)^2$.

Знак "+" соответствует верхнему, а знак "-" - нижнему валкам.

Координаты контура контактной поверхности без учета уширения (текущие координаты точек D и E (см. рис. 43) определены из условия $Z_{03} = Z_n$ и на участках 2÷3 получено

$Y_{0m}^2 \left(1 + \frac{1}{\tan^2 \alpha}\right) - 2Y_{0m} \left(\frac{\Phi_{20}}{\tan \alpha} + 1\right) + \Phi_{20}^2 + 1 - \left(\frac{R_0}{d}\right)^2 = 0$

где $Y_{0m} = \frac{Y}{d}$; $\Phi_{20} = \frac{h_1 - 0,5h_{n1} + \Delta h_u}{d \sin \alpha} + \frac{\Delta h_n}{d} \left(1 - \frac{X}{L}\right)^2$.

Если точка D находится в пределах контура на прямолинейном участке, то: $Y_{0mD} = [(h_1 - 0,5h_{n1}) \cos \alpha] / d$.

Геометрические размеры калибра и заготовки обуславливают следующую систему безразмерных факторов процесса прокатки $X_1 = b_k/h_k$; $X_2 = h_{n1}/h_k$; $m_1 = B_0/R_0$; $m_2 = h_{n0}/R_0$; $m_3 = R_e/R_0$; $m_4 = \tan \alpha$; $\eta = h/2R_0$; $m_5 = h_{n0}/h_{n1}$.

Для получения расчетных формул параметров формоизменения и энергосиловых параметров прокатки произведен активный эксперимент на ПЭВМ. В качестве моделируемых параметров прокатки были приняты: коэффициент вытяжки $\mu = a_1$ (варьируемый параметр); относительная степень деформации ϵ ; длина очага деформации L_d ; площадь контакта F_k ; коэффициент напряженного состояния металла n_σ ; коэффициент плеча равнодействующей силы прокатки $\psi_{\text{нал}}$.

Решение вариационного уравнения осуществляли в факторном пространстве в диапазоне входных параметров

$X_1 = b_k/h_k \in (1,6 \div 2,6)$; $X_2 = h_{n1}/h_k \in (0,1 \div 0,25)$;

$m_3 = R_e/R_0 \in (10 \div 50)$; $m_5 = h_{n0}/h_{n1} \in (1 \div 2)$.

В результате обработки результатов математического моделирования и применения методов регрессионного анализа получены уравнения регрессии

$\mu = 0,676 + 0,756 X_2 + 0,193 m_5 + 0,091 X_1^2 - 0,0038 X_1 m_3 - 3 X_2^2 + 0,0001 m_5^2 - 0,0653 m_5^2$ (122)

$\epsilon = 0,116 + 0,218 X_1 - 0,143 X_2^2$; (123)

$L_d = R_0 (0,254 + 1,12 X_1 + 0,0951 m_3)$; (124)

$F_k = R_0^2 (-13,3 + 12 X_1 + 0,52 m_3)$; (125)

$n_\sigma = 1,13 - 0,129 X_1 - 0,994 X_2 - 0,0168 m_3 + 0,348 X_1 X_2 + 0,012 X_1 m_3 + 0,0104 X_2 m_3 - 0,143 X_2 m_5 - 0,0001 m_5^2$; (126)

$\psi_{\text{нал}} = 0,374 - 0,019 X_1 - 0,0023 m_3 - 0,01 m_5 + 0,0002 X_1 m_3 + 0,0037 X_1 m_5 - 0,12 X_2^2 + 0,0005 X_1 m_5$; (127)

Результаты статистической оценки уравнений регрессии (123) ÷ (127) показали их удовлетворительную точность.

6. Теоретическое и экспериментальное исследования прокатки металла в многоручьевоых калибрах

6.1. Напряженное состояние металла в очаге деформации многоручьевоого калибра

Рассмотрен наиболее общий в теоретическом аспекте случай многоручьевоой прокатки-разделения на реверсивном стане

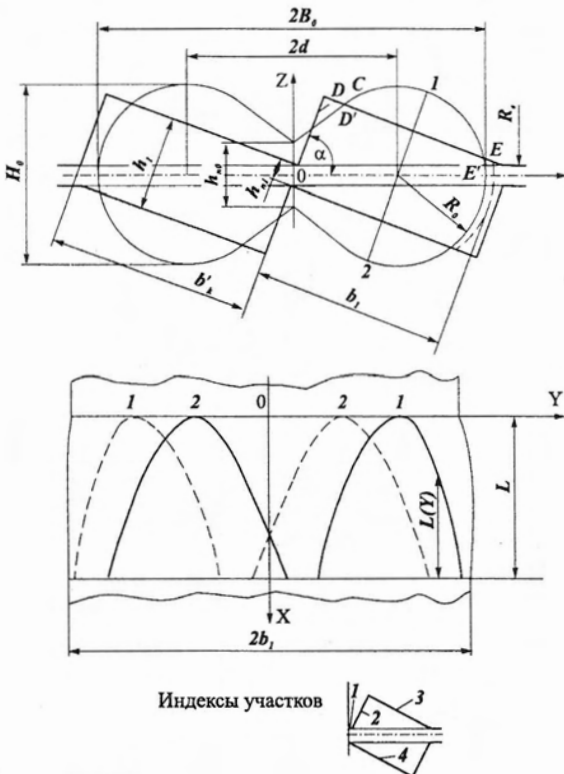


Рис. 43. Схема очага деформации при прокатке двухниточного раската в двухручьевоом калибре с прямоугольными диагональными ручьями.

дуо- многократная прокатка в трех-ручьевом калибре с ромбическими ручьями. Исходя из анализа течения металла, очаг деформации делился на участки I ÷ VI (рис. 44) с учетом симметрии многоручьевого калибра. По мере заполнения металлом многоручьевого калибра по ширине и высоте участки I, IV и V увеличиваются за счет уменьшения смежных с ними участков, и при нормальном заполнении многоручьевого калибра имеется только три вышеуказанных участка.

Для определения напряженного состояния металла использован метод последовательного решения уравнений равновесия и уравнения пластичности. Задача решена дискретно для группы участков каждого ручья калибра. В результате анализа полученных расчетных эпюр напряжений установлены следующие общие закономерности напряженно-деформированного состояния металла.

На необжимаемых участках раската постоянно действуют продольные растягивающие напряжения, изменяющиеся по закону, близкому к линейному, максимальная величина которых имеет место на выходе из очага деформации и минимальная - на входе металла в валки $|\sigma_x| = \sigma_s / \sqrt{3}$. С увеличением степени деформации, при прочих равных условиях, σ_x возрастает. В крайних ручьях продольные напряжения несколько выше, чем в средних, что объясняется наличием более значительных поперечных перемещений металла в крайних ручьях. Для достижения величины среднего коэффициента вытяжки, в основном определяющего величину продольного напряжения, в крайних ручьях требуется большая величина напряжений и возникает большая высотная утяжка металла. По мере заполнения многоручьевого калибра, при прочих равных условиях растет величина продольных растягивающих напряжений, и возрастает вероятность нарушения сплошности металла в вершинах заготовок. Величина продольного напряжения может достигать значения сопротивления металла деформации. Наличие на ненагруженной поверхности продольных растягивающих напряжений, равных пределу текучести, экспериментально доказано. Поэтому можно рекомендовать для получения качественного проката изобегать частных коэффициентов вытяжки более чем 1,3 до заполнения металлом калибра по высоте и применять максимально допустимые обжатия после заполнения калибра металлом. Характер распределения поперечных напряжений подобен распределению продольных напряжений.

Плоская разноименная схема нормальных напряжений по всей длине и ширине необжимаемых участков может неблагоприятно влиять на качество проката. Поэтому в центральных частях формируемых заготовок ухудшаются условия уплотнения макроструктуры металла, и не исключен рост наследственных дефектов. Для предупреждения образования дефектов целесообразно чередовать участки с различной интенсивностью высотной деформации по ширине раската. На боковой поверхности раската в первых пропусках имеет место объемная разноименная схема напряженного состояния, так как $\sigma_x < 0$. Необжимаемые участки представляют собой боковые "внешние" зоны, наличие которых приводит к росту коэффициента напряженно-деформированного состояния металла в многоручьевом калибре.

Нормальные контактные напряжения на обжимаемых участках распределены неравномерно как по ширине, так и по длине очага деформации. Для всех пропусков характерно резкое возрастание величины контактных напряжений в зоне перехода от необжимаемых к обжимаемым участкам с максимумом в об-

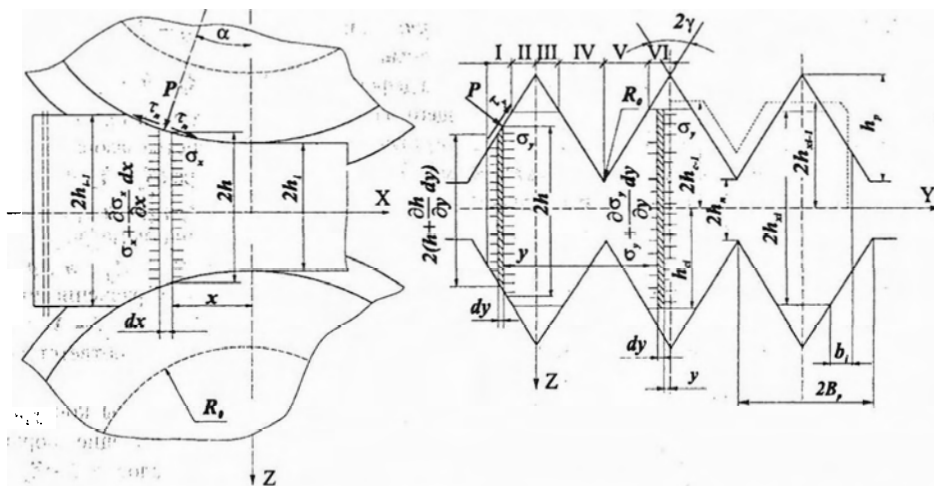


Рис. 44. Схема очага деформации к определению напряженного состояния металла при многоручьевой прокатке-разделении.

ласти вершины гребней. Максимального значения нормальные напряжения достигают в нейтральной точке, и максимум расположен ближе к плоскости входа в валки. По мере заполнения калибра и утонения перемычки раската изменяется характер эпюр нормальных радиальных напряжений, они приобретают резко выраженный максимум. Для боковых участков раската характерен резкий рост нормальных напряжений и стабилизация их на одном уровне.

При двухниточной прокатке очевидно наличие только участков I и IV расчетной схемы (см. рис. 44).

В случае четного числа одновременно прокатываемых заготовок имеет место симметрия многоручьевого калибра относительно вертикальной оси, проходящей через бурты калибра. Поэтому наблюдается линия нулевых поперечных перемещений металла в вертикальной плоскости симметрии. Расчетная схема в этом случае должна включать все шесть участков с различными деформациями, а деформация металла на участках, прилегающих к оси симметрии многоручьевого калибра, будет аналогична условиям деформации на участках V и VI. В случае многоручьевой прокатки-разделения с нечетным числом заготовок более трех условия деформации металла в срединных элементарных калибрах будут идентичными и аналогичными деформации металла в среднем ручье трехручьевого калибра. Поэтому расчетная схема имеет все шесть характерных участков с дублированием участков V и VI.

6.2. Экспериментальные исследования прокатки металла в многоручьевых калибрах

Экспериментальные исследования формоизменения и энергосиловых условий прокатки в многоручьевом калибре произведены на лабораторном стане 100 и полупромышленном стане 250. Схемы различных вариантов деформации металла в трех- и двухручьевых калибрах показаны на рис. 45.

В результате обработки экспериментальных данных методами математической статистики выявлены уравнения регрессии

$$h_{r1}/(2h_p + h) = [0,3313 - 0,1406 H_k / H + 0,2428 H / 2h_p + (0,079 - 0,0028 H / h) H / h_1]^{0,5}; \quad (128)$$

$$h_{r2}/(2h_p + h) = [-3,431 + (4,114 - 0,777 H_k / H - 0,876 B / B_k - 0,547 H / 2h_p - 0,0343 H / h) \times H_k / H + 1,058 B / B_k + 0,881 H / 2h_p + 0,09 H / h - 0,0017 (H / h) 2]^{0,5}; \quad (129)$$

$$b_r / B_k = 5,67 + (0,29 B_k / B + 0,335 H / H_k + 1,03) H / H_k - 0,191 (2h_p / H) + (10,191 H / H_k + 0,32 B_k / B + 0,254 (2h_p / H) + 0,058 h_r / H - 0,845) h_r / H + (2,405 B_k / B - 6,446) B_k / B; \quad (130)$$

$$\mu \Sigma_i = -1,823 + 7,55 H_k / H + 0,876 B / B_k - 4,23 H / 2h_p - 2,93 (H_k / H)^2 + 1,471 (H / 2h_p)^2 + (-0,37 - 0,11 H_k / H + 0,245 B / B_k + 0,38 H / 2h_p -$$

$$0,015H/h_i)H/h_i; \quad (131)$$

$$H/h_{ci}=0,31+0,125H_{np}/H+0,238B/V_{\kappa}+0,214H/2h_p-0,019H/h_i+0,044(H_{np}/H)(H/h_i)-0,012(H/h_i)^2; \quad (132)$$

$$H/h_{\kappa i}=4,6-4,265H_{\kappa}/H-1,78B/V_{\kappa}-0,881H/2h_p-0,0625H/h_i+1,473(H_{\kappa}/H)(B/V_{\kappa})+0,891(H_{\kappa}/H)(H/2h_p)+0,0545(H_{\kappa}/H)(H/h_i)+0,054(H/2h_p)(H/h_i)+0,854(H_{np}/H)^2-0,0026(H/h_i)^2; \quad (133)$$

где $h_c/(2h_p+h)$; $h_{\kappa}/(2h_p+h)$ и b/V_{κ} - относительные заполнения металлом среднего и крайнего ручьев по высоте и калибра по ширине соответственно; $\mu\Sigma$ - суммарная вытяжка за i -тое число пропусков; H/h_c и H/h_{κ} - относительное уменьшение высоты средней и крайней заготовок соответственно; H/h_i - коэффициент суммарной высотной деформации в i -том пропуске.

Результаты статистической оценки уравнений регрессии (128)-(133) показали их удовлетворительную точность. Уравнения регрессии действительны при следующих значениях входных параметров

$$H_{\kappa}/H \in (1+1,4); B/V_{\kappa} \in (0,84+0,98); H/2h_p \in (1,1+1,56).$$

Из анализа результатов исследований установлено, что формирование наплывов на широких гранях прямоугольной заготовки и увеличение их относительной высоты способствует эффективному заполнению крайних ручьев трехручьевого калибра по высоте. Наиболее активным фактором, влияющим на заполнение трехручьевого калибра по ширине, является ширина заготовки. Это связано как с непосредственным изменением ширины заготовки, так и с более интенсивной деформацией ее боковых кромок. Сравнение поперечной и продольной деформации указывает на большую вытяжную способность трехручьевого калибра. Максимальная поперечная деформация наблюдается в первых пропусках и к чистовому пропуску затухает. Из полученных зависимостей следует, что каждый параметр исходной заготовки позволяет активно влиять на параметры формоизменения металла, определяющие рациональное заполнение трехручьевого калибра. В условиях линейных и непрерывных станов при формировании раската по принципу пропуск-калибр в ряде случаев рациональным является постепенное изменение угла наклона стенок ромбических ручьев многоручьевого калибра по ходу прокатки. Кинематические условия прокатки в двухручьевом калибре с ромбическими ручьями с различными углами наклона стенок ручьев и граней ромбов задаваемого двухниточного раската характеризуются уравнениями регрессии, полученными на основании обработки результатов математически спланированного эксперимента

$$\mu=0,383+1,776H_{np}/h_{np}-0,849\varphi-0,023B/V_{\kappa}+0,686\theta+0,155(H_{np}/h_{np})\varphi-0,291(H_{np}/h_{np})\theta+0,737\varphi B/V_{\kappa}+0,257\varphi\theta-0,338\theta B/V_{\kappa}-0,385(H_{np}/h_{np})^2-0,124\varphi^2-0,116\theta^2; \quad (134)$$

$$\beta=0,938+0,114H_{np}/h_{np}+0,381\varphi-0,039B/V_{\kappa}-0,339\theta+0,156\theta H_{np}/h_{np}-0,466\varphi B/V_{\kappa}-0,348\varphi\theta+0,211\theta B/V_{\kappa}+0,169\varphi^2+0,171\theta^2; \quad (135)$$

$$S=-45,924+57,678H_{np}/h_{np}-2,858\varphi-0,039B/V_{\kappa}-13,973\theta-14,81(H_{np}/h_{np})(B/V_{\kappa})+9,414\theta H_{np}/h_{np}+8,778\varphi\theta-16,147(H_{np}/h_{np})^2-7,753\varphi^2-3,151\theta^2; \quad (136)$$

где S - опережение металла под гребнем калибра; H_{np} и h_{np} - приведенная к ширине высота образца до и после прокатки; H_{np}/h_{np} - коэффициент приведенной высотной деформации; φ - угол наклона стенок ручьев двухручьевого калибра к оси валков в радианах; B/V_{κ} - относительная ширина исходной заготовки; θ - угол наклона граней элементов задаваемого образца в радианах; B и V_{κ} - ширина исходного образца и калибра.

Уравнения регрессии действительны в диапазоне входных параметров $H_{np}/h_{np} \in (1,1+1,5)$; $\varphi \in (0+1,05)$; $B/V_{\kappa} \in (0,7+0,9)$; $\theta \in (0+1,05)$. Статистические оценки уравнений регрессии (134)-(136) показали их удовлетворительную точность.

Формоизменение металла при прокатке прямоугольных раскатов в двухручьевом калибре с квадратными диагональными ручьями (см. рис. 45г), используемом при двухручьевой прокатке-разделении арматурных профилей с контролируемым раз-

рывом перемычки, определяется зависимостями полученными на основании математически спланированного эксперимента

$$\mu=9,779-15,055a/B-8,458a/H+6,053(a/B)(a/H)+7,842(a/B)^2+2,495(a/H)^2-0,599a/R_{\sigma}; \quad (137)$$

$$b/B_{\kappa}=5,429-13,609a/B+6,826(a/B)(a/R_{\sigma})+5,172(a/H)(a/R_{\sigma})+3,68(a/B)(a/H)+7,675(a/B)^2-2,171(a/H)^2-39,185(a/R_{\sigma})^2; \quad (138)$$

$$b/B=3,003-9,67a/B+2,476a/H+6,291a/R_{\sigma}+2,400(a/B)(a/H)+5,52(a/B)(a/R_{\sigma})+7,029(a/B)^2-3,604(a/H)^2-52,324(a/R_{\sigma})^2; \quad (139)$$

$$h/H_{\kappa}=0,402+0,834a/B+0,889a/H-1,279(a/B)(a/H)-3,997(a/H)(a/R_{\sigma})+12,664(a/R_{\sigma})^2; \quad (140)$$

где b/B_{κ} - относительное заполнение калибра по ширине; $\beta=b/B$ - коэффициент поперечной деформации; h/H_{κ} - относительное заполнение калибра по высоте; a/B - относительная ширина заготовки; a/H - относительная высота заготовки; a/R_{σ} - относительный радиус валка; a - сторона квадратного ручья калибра; R_{σ} - радиус валка по бурту калибра; B_{κ} и H_{κ} - соответственно ширина и высота калибра по "скелету".

Уравнения регрессии действительны в следующем диапазоне входных параметров: $a/B \in (0,5+0,64)$; $a/H \in (0,64+0,78)$; $a/R_{\sigma} \in (0,5+0,64)$. Статистические оценки уравнений регрессии (137)-(140) показали их удовлетворительную точность. На основании уравнений (137) ÷ (140) построены номограммы для определения коэффициента вытяжки металла и параметров исходной заготовки, обеспечивающей заданные значения заполнения двухручьевого калибра по ширине и высоте. Выявлено, что вытяжная способность двухручьевого калибра незначительно зависит от параметра a/R_{σ} , но интенсивно увеличивается с возрастанием размеров исходной заготовки B и H .

Сила P и момент M прокатки в многоручьевом калибре определены по зависимостям

$$P = n_{\sigma} k F_{\kappa}; \quad (141)$$

$$M = 2L_{cp} P \psi; \quad (142)$$

где $k=1,15\sigma_n$ (σ_n - истинный предел текучести металла); L_{cp} - средняя длина приведенного очага деформации.

Коэффициенты напряженного состояния металла и плеча равнодействующей силы прокатки при многократной прокатке прямоугольного раската в трехручьевом калибре определены на основании активного спланированного эксперимента

$$n_{\sigma} = 5,867 + (0,571 - 2,473L_{cp}/h_{cp} - 2,482b_n/b_n + 6,85b/B_{\kappa} - 5,1\alpha_{np})\alpha_p + 1,67L_{cp}/h_{cp} - 0,69b_n/b_n - 4,31b/B_{\kappa} - 4,68H_{\kappa}/H - 1,9(L_{cp}/h_{cp})(b/B_{\kappa}) + 0,866(b_n/b_n)(H_{\kappa}/H) - 3,951(b/B_{\kappa})(H_{\kappa}/H) + 0,8(b_n/b_n)(b/B_{\kappa}); \quad (143)$$

$$\psi = 5,695 + 1,145L_{cp}/h_{cp} - 3,891b/B_{\kappa} + (5,07 + 2,25L_{cp}/h_{cp} - 5,788b/B_{\kappa} + 0,88H_{\kappa}/H - 6,72\alpha_{np})\alpha_{np} + (-5,12 - 1,71L_{cp}/h_{cp} + 2,78b/B_{\kappa} + 1,634/\eta_{np})1/\eta_{np} - 1,68H_{\kappa}/H + 1,377(b/B_{\kappa})(H_{\kappa}/H). \quad (144)$$

Входящие в уравнения (143) и (144) безразмерные параметры определяются по зависимостям

$$\alpha_{np} = [(h_{np,i-1} + h_{np,i})R_{np}^{-1}]^{0,5}; L_{cp} = F_{\kappa}/b_{\sigma};$$

$$h_{cp} = 0,5(h_{np,i-1} + h_{np,i}); h_{np} = F_{non}/b_{\sigma}.$$

Здесь h_{np} - приведенная высота раската по ширине зоны контакта; R_{np} - приведенный катающий радиус; F_{non} - площадь поперечного сечения раската; b_{σ} и b_{np} - ширина обжимаемых и необжимаемых участков раската на выходе из очага деформации.

Анализ влияния входных параметров на коэффициент напряженного состояния n_{σ} свидетельствует о сходимости процесса многоручьевого прокатки-разделения с прокаткой в разрезных калибрах. Установлено также, что с увеличением фактора L_{cp}/h_{cp} значение n_{σ} уменьшается, так как уменьшается степень влияния внешних зон раската. Характер влияния b_n/b_n на коэффициент n_{σ} противоположен воздействию фактора формы очага дефор-

магии. Зависимость коэффициента плеча равнодействующей от параметра L_{cp}/h_{cp} качественно аналогична для случая прокатки высоких полос, на деформацию которых существенно влияют внешние зоны. При многоручьевой прокатке имеют место высокие значения Ψ в первых пропусках. По мере снижения неравномерности деформации по ширине раската значения Ψ приближаются к 0,5.

Коэффициенты плеча равнодействующей и напряженного состояния при прокатке в двухручьевом калибре с ромбическими ручьями (см. рис. 45) получены на основании обработки данных по энергосиловым параметрам, определенных при осуществлении активно спланированного эксперимента. При определении истинный предел текучести свинца определяли на основании базисного давления. Обозначения даны на рис. 45

$$\Psi = 2,085 - 1,547H_{np} / h_{np} + 1,363\varphi - 2,939B/B_k + 3,467h / R + 0,471\Theta + 2,489(H_{np} / h_{np})(B/B_k) - 1,075\Theta H_{np} / h_{np} - 1,314\varphi B/B_k + 1,512\Theta B / B_k - 2,26\Theta h/R - 0,375\varphi^2 - 8,539(h/R)^2; \quad (145)$$

$$n_{\sigma} = 6,363 - 3,636H_{np}/h_{np} - 0,861\varphi - 5,879B/B_k - 1,374h/R + 0,558\Theta + 4,364(H_{np} / h_{np})(B / B_k) + 2,575\varphi h / R - 1,046\varphi\Theta + 1,2\varphi^2. \quad (146)$$

Результаты статистической оценки зависимостей (145) и (146) показали их достаточную точность.

Параметры прокатки прямоугольной полосы в двухручьевом калибре с квадратными ручьями (см. рис. 45г) можно рассчитать по зависимостям, полученным на основании проведенного эксперимента

$$\Psi = 3,064 - 7,606 \frac{a}{B} - 1,134 \frac{a}{R_0} + 15,344 \frac{a}{H} \frac{a}{R_0} + 6,969 \frac{a^2}{B^2}; \quad (147)$$

$$n_{\sigma} = 7,833 - 8,603 \frac{a}{H} - 56,4 \frac{a}{R_0} - 8,597 \frac{a}{B} \frac{a}{H} + 56,2 \frac{a}{B} \frac{a}{R_0} + 10,434 \frac{a^2}{H^2} + 110,2 \frac{a^2}{R_0^2}. \quad (148)$$

Обозначения в уравнениях регрессии (147) и (148) аналогичны зависимостям (137) и (140).

Исследованиями в лабораторных условиях установлено, что при многократной прокатке в многоручьевых калибрах с числом ручьев 2 ÷ 5 существует резкое повышение коэффициента напряженного состояния при переходе от двух к трехручьевой прокатке и дальнейшее его незначительное повышение с увеличением числа заготовок, при прочих равных условиях. Причиной скачкообразного увеличения n_{σ} при переходе к трехручьевой прокатке является снижение относительной поперечной деформации, вызванной наличием средней заготовки, прокатываемой со стесненным уширением. Следствием этого является рост поперечных сжимающих и нормальных контактных напряжений. Дальнейшее увеличение числа заготовок, изменяя коэффициент напряженного состояния, качественно нового влияния не оказывает.

Анализ влияния многоручьевой прокатки на энергосиловые параметры по сравнению с прокаткой в сопоставимых условиях тех же образцов на гладкой бочке свидетельствует, что в первых пропусках коэффициент напряженного состояния при многоручьевой прокатке значительно выше, чем на гладкой бочке. Затем наблюдается сближение значений n_{σ} , но как по абсолютной величине, так и в относительных показателях энергосиловые параметры при многоручьевой прокатке выше.

Неравномерность деформации по ширине раската при прокатке в многоручьевых калибрах приводит к выраженной неравномерности температурного поля по периметру раската. Экспе-

риментальные фотометрические исследования температуры раската, проведенные в промышленных условиях, показали, что при формировании многониточного раската за несколько пропусков в многоручьевом калибре имеет место постоянное превышение температуры металла в местах перемычек над температурой металла в вершинах заготовок. Отмеченная тенденция характерна для всех пропусков, усиливаясь к чистовому пропуску, и сохраняется для всего исследуемого сортамента раскатов различных марок сталей. Такой характер температурного поля при многоручьевой прокатке благоприятно отражается на энергосиловых параметрах процесса, способствуя снижению сопротивления метал-

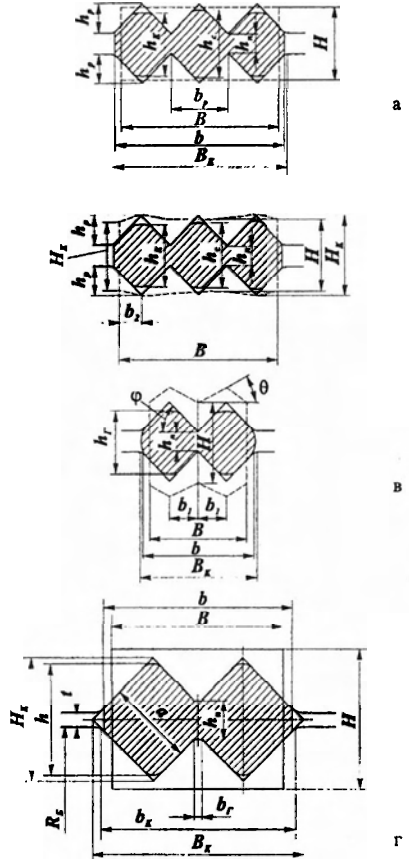


Рис. 45. Схемы деформации металла на трехручьевых калибрах при прокатке плоской (а) и профильной (б) заготовок, и в двухручьевых калибрах с ромбической (в) и квадратной (г) формой ручьев.

талла деформации в местах наибольшего обжатия. Экспериментально установлено, что показатель удельной энергоёмкости процесса деформации, характеризующий удельные затраты энергии за пропуск, при многоручьевой прокатке несколько выше. Однако при многоручьевой прокатке разделяемая величина деформации для получения заготовок заданных размеров уменьшается пропорционально числу одновременно прокатываемых заготовок, поэтому как по общему, так и по удельному расходу энергии процесс многоручьевой прокатки-разделения экономичнее существующей технологии.

Таким образом, решены задачи определения параметров прокатки в многоручьевых калибрах и получены уравнения регрессии для определения параметров формоизменения и энергосиловых условий прокатки. Результаты сравнительного анализа показали удовлетворительную сходимость расчетных по полученным зависимостям и экспериментальных параметров прокатки.

Получены также математические модели для установления объемного распределения нормальных напряжений, формоизменения металла (заполнение калибров разной формы, суммарный коэффициент вытяжки и др.).

Таким образом, создана теоретическая база для расчета калибровки валков для реализации процесса многоручьевой прокатки-разделения.

7. Расчет калибровок валков при двухручьевой прокатке-разделении

Расчет калибровок валков производится против хода прокатки. Основные параметры, необходимые для расчета калибровок валков: размер стороны квадратной заготовки после разде-

ления a , радиус закругления гребней в калибрах r_r , радиус валков по гребням калибра R и зазор между буртами валков t . Разработаны методика и алгоритм расчета ширины и высоты калибров, глубины вреза ручья в тело валка, межосевых расстояний между ручьями калибра, радиусов закруглений, углов наклона калибров и толщины перемычки. Учтено температурное расширение металла.

Для определения числа необходимых пропусков в многоручьевом калибре, следует исходить из того, что процесс характеризуется значительной неравномерностью высотной деформации металла по ширине этого калибра, вызывающей высотную утяжку исходного сечения раската. При этом характерной и общей для многоручьевых калибров особенностью является сравнительно низкая величина уширения по мере уменьшения толщины перемычки и увеличения угла наклона стенок ручьев калибра.

На рис. 46 показана калибровка валков для двухручьевой прокатки-разделения квадратных профилей с продольным разделением раската контролируемым разрывом.

В процессе формирования и продольного разделения двухниточного раската получают два профиля с поперечным сечением в виде шестиугольника, квадрата, стрелчатого квадрата, ромба, ромбического овала, которые в последующем пониточно прокатывают за несколько пропусков в сортовые профили типа квадрата, шестигранника, круга, прямоугольной полосы, уголка и др. До формирования двухниточного раската и после его продольного разделения можно использовать любую известную систему вытяжных калибров.

Расчет калибровки валков производится против хода прокатки с определением размеров прямоугольной заготовки, задаваемой в формирующий двухручьевой калибр. Исходными данными для расчета калибровки валков являются площадь сечения ромбического профиля q_{pt} после продольного разделения раската с учетом линейного расширения металла, отношение диагоналей ромба после разделения $H_{pt}/B_{pt} = \text{tg}\phi$, и радиус валка по буртам калибра R_{61} . Как и в предыдущем случае разработаны методика и алгоритм расчета всех размеров калибров, указанных на рис. 46.

Калибровка валков при прокатке сортовых профилей с продольным разделением раската в двухручьевом калибре с наклонными к оси валков ручьями показана на рис. 47.

Исходной заготовкой служит промежуточный раскат квадратного или прямоугольного сечения, который последовательно прокатывают в сечениях: а - заготовки; б - г - калибров

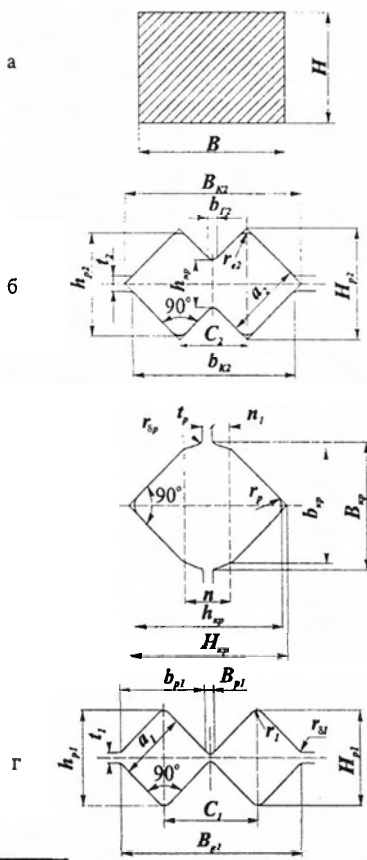


Рис. 46. Схема калибровки валков для двухручьевой прокатки-разделения квадратных профилей с продольным разделением раската контролируемым разрывом: поперечные сечения: а - заготовки; б - г - калибров

двухручьевом разрезном и двухручьевом формирующем калибрах. При прокатке прямоугольной заготовки в двухручьевом разрезном калибре с эллиптической формой ручьев обеспечивается самоцентрирование задаваемой прямоугольной заготовки боковыми стенками калибра. При последующей прокатке двухниточного раската в двухручьевом формирующем калибре формируется двухниточный раскат, состоящий из двух эллиптических (круглых) профилей, соединенных по горизонтальной оси тонкой перемычкой. Сочетание формы поперечного сечения раската после разрезного центрирующего калибра и конфигурации формирующего калибра обеспечивают самоцентрирование раската и получение симметричного поперечного сечения.

После формирующего калибра двухниточный раскат прокатывают в гладких или калиброванных валках, в результате чего получается двухниточный раскат, состоящий из двух плоских овальных или овальных однорядусных профилей, соединенных по горизонтальным осям тонкой перемычкой. При этом у перемычек формируется концентратор напряжений в виде двухстороннего заката, образованный взаимным поперечным перемещением металла при неравномерном обжатии эллиптических профилей многониточного раската.

Последующее продольное разделение многониточного раската может осуществляться срезом перемычек путем взаимного поворота овальных профилей вокруг продольных осей в одном направлении, обеспечиваемого калиброванными холостыми роликами специального устройства в межклетевом промежутке, или прокаткой многониточного раската в многоручьевом калибре с наклонным расположением ручьев. При этом своеобразная форма двухсторонних концентраторов напряжений у перемычек обеспечивает возникновение в теле перемычек напряжений сдвига и качественный их срез. При разделении овальные профили скручиваются вокруг продольной оси на угол, обеспечивающий их последующее скручивание (кантовку) на 90° при входе в валки следующей клетки, где они пониточно прокатываются в готовый профиль.

Разработаны методика и алгоритм расчета всех размеров калибров валков, показанных на рис. 47.

Калибровка валков при двухручьевой прокатке-разделении раската срезом перемычек путем прокатки в гладких цилиндрических валках приведена на рис. 48. Исходными данными для расчета калибровки валков являются размеры сторон прямоугольных профилей h и b , по-

прокатки в двухручьевом калибре с наклонными ручьями (см. рис.

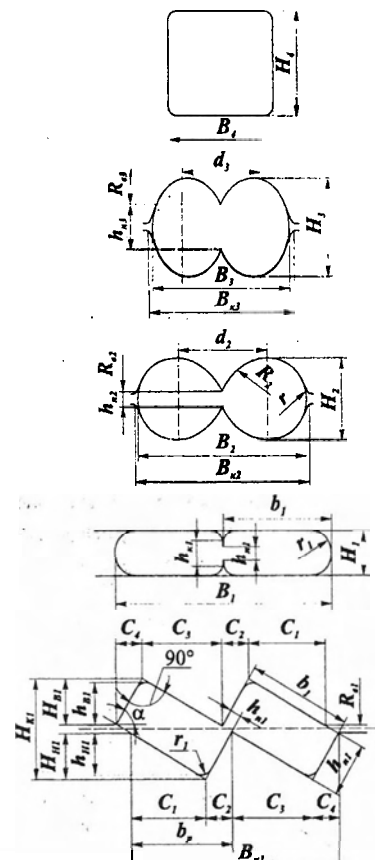


Рис. 47. Схема калибровки валков для двухручьевой прокатки-разделения сортовых профилей с продольным разделением раската в двухручьевом калибре с наклонными ручьями к осям валков.

48г) и радиусы валков по клетям R_v . Разработаны методика и алгоритм расчета всех размеров калибров, приведенных на рис. 48.

Калибровка валков при прокатке-разделении сортовых профилей с разделением раската срезом перемычки путем прокатки в двухручьевом калибре с прямоугольными ручьями показана на рис. 49. Исходными данными для расчета калибровки валков являются размеры сторон прямоугольных профилей h_1 и b_1 после прокатки в двухручьевом калибре с прямоугольными ручьями (рис. 49г) и радиусы валков по клетям R_v .

Таким образом, создана методика расчета калибровок валков и выведены зависимости для определения размеров калибров для условий трех- и двухручьевой прокатки-разделения сортовой квадратной заготовки на заготовочных станах и для двухручьевой прокатки-разделения арматурных профилей на мелко-

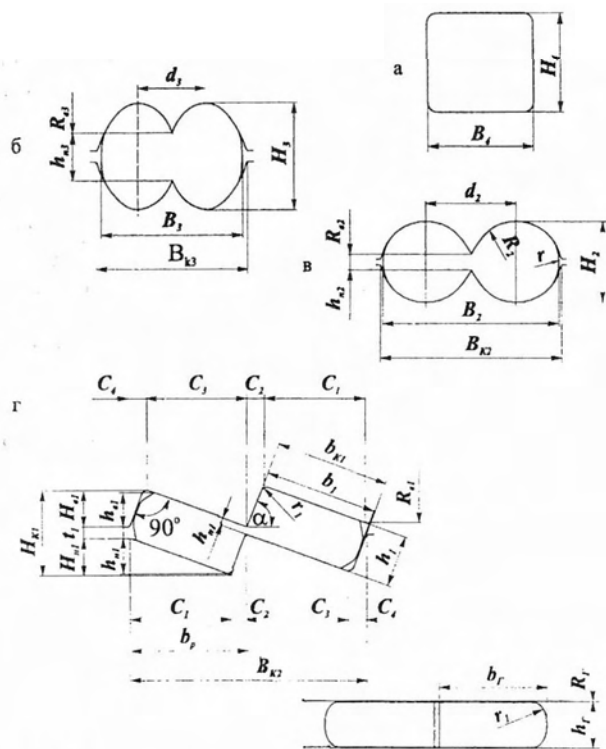


Рис. 48. Схема калибровки валков для двухручьевой прокатки-разделения сортовых профилей с продольным разделением раската прокаткой в гладких цилиндрических валках; а + г - очередность расположения калибров.

сортных и проволочных станах различного типа.

8. Исследование и реализация в промышленных условиях процесса прокатки-разделения

8.1. Многоручьевая прокатка-разделение сортовой заготовки

Прокатка-разделение раскатов на линейных станах

Впервые в мировой практике исследование трехручьевой прокатки с безотходным разделением раската в прокатных валках проведено на трехклетевом крупносортом стане 850 ОАО "Макеевский металлургический комбинат" (МакМК) при производстве квадратной заготовки со стороной 58мм [21]. Стан 850 представлял собой линейный стан, в состав которого входили обжимная, черновая и чистовая клетки трио.

Заготовку прокатывали из блюмов 300x300мм стали СтЗсп и СтЗкп и слитков 370/370 (нижнее); 320/320 (верхнее сечение) из стали Ст1кп. Заготовки разделяли разрывом перемычек пу-

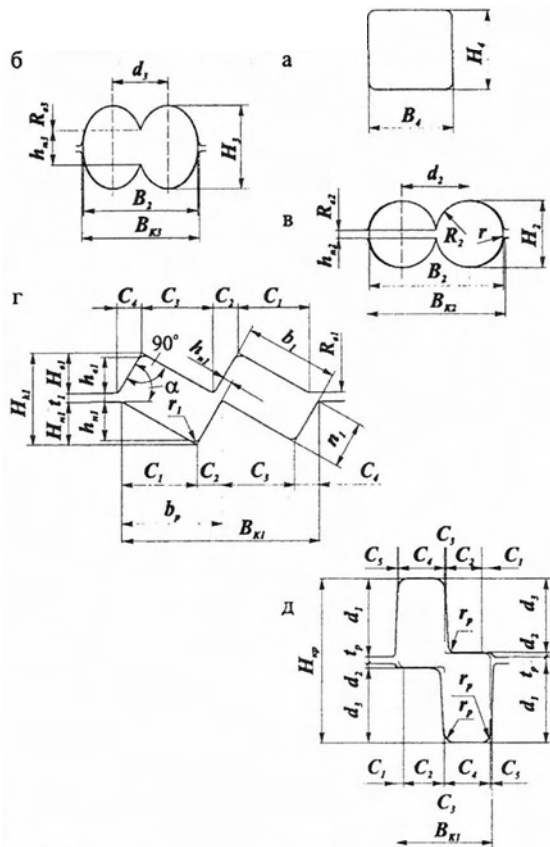


Рис. 49. Схема калибровки валков для двухручьевой прокатки-разделения сортовых профилей с продольным разделением раската срезом перемычки; а + д - очередность расположения калибров.

тем увеличения расстояния между осями ручьев чистового калибра. Исследование макроструктуры поперечных темплетов после глубокого травления выявило наличие ликвационной зоны в местах разделения заготовок из кипящей стали. На заготовках из спокойной стали ликвационная зона выражена слабо. Центры зоны физико-химической неоднородности на крайних заготовках смещены к местам разделения. Аналогично были прокатаны квадратные заготовки со стороной 58мм из слитка массой 1,7 тонны, сталь СтЗкп. Установлено, что в головной части слитка четко выражены ликвационные скопления. В средней и донной частях эти скопления развиты значительно меньше. В местах разделения заготовок имеет место "выклинивание" ликвационного квадрата. Качество поверхности и размеры заготовок соответствовали требованиям нормативно-технической документации.

Из опытных квадратных заготовок со стороной 58мм на проволочном стане 250-1 ОАО "МакМК" прокатали катанку Ø6,5мм. Механические испытания показали полное соответствие ее свойств требованиям ГОСТ 380-94.

Впервые технологию двухручьевой прокатки квадратной заготовки со стороной 60мм с безотходным продольным разделением в прокатных валках исследовали на крупносортом линейном стане 600 ОАО "МакМК". Прокатку производили из заготовок сечением 156x156мм в обжимной и чистовой клетях. Двухниточный раскат разделяли разрывом перемычек путем увеличения расстояния между осями ручьев чистового калибра.

С целью выявления влияния условий прокатки на качество мест разделения заготовок изменяли: толщину перемычки в пределах 4-8мм, температуру металла в конце прокатки в пределах 950-800°C (путем подстуживания раската на раскатном поле), угол между гранями заготовок в зоне перемычки и режим обжатия в предчистовом калибре. Прокатывали стали СтЗсп, Ст4кп,

45 и 65. Бломы перед прокаткой нагревали по существующей технологии. Опытные заготовки из стали Ст3сп, Ст4кп и 45 без дополнительной зачистки прокатали на сортовых станах 330 и 280 ОАО "МакМК" по существовавшей на тот период времени технологии на круги $\varnothing 21, 23$ и 25мм и полосы сечением $50 \times 8, 50 \times 4$ и $25 \times 8\text{мм}$. Заготовки из стали 65 прокатали на проволочном стане 250-1 ОАО "МакМК" на катанку $\varnothing 6,5\text{мм}$. Макро- и микроисследованиями всех профилей проката установлено отсутствие поверхностных дефектов, причиной которых могла быть специфика прокатки-разделения опытных заготовок. Механические свойства всех готовых профилей, прокатанных из опытных заготовок, соответствовали требованиям нормативно-технической документации.

Промышленные исследования двухручьевого и трехручьевого прокатки-разделения квадратных заготовок на линейных станах показали возможность увеличения их производительности на 12 – 15% или прокатки заготовок меньших размеров без уменьшения производительности.

Выполненные исследования позволили установить принципиальную возможность и эффективность разработанного процесса прокатки-разделения в прокатных валках, что создало техническую и психологическую базу для дальнейшего выполнения работ и исследований в промышленных условиях нового процесса. Кроме этого, на основе анализа результатов промышленных и лабораторных исследований многоручьевого прокатки-разделения и разработанных теоретических положений представлены основные рекомендации, которые необходимо учитывать при разработке калибровок валков для станов линейного типа и непрерывно-заготовочных станов.

Прокатка-разделение раскатов на реверсивном двухклетевом стане

Исследования многоручьевого прокатки-разделения проведены на двухклетевом обжимно-заготовочном стане 950/900 ОАО "Донецкий металлургический завод" (ДМЗ) [22].

При трехручьевого прокатки-разделения из слитка сталей 09Г2 и 35 массой 5,5т в клети 950 прокатывали сляб сечением $500 \times 250\text{мм}$ за 11 проходов. Затем в трехручьевого калибре клети 900 за восемь проходов формировали три сочлененных между собой квадратных заготовки со стороной 135 и 100мм. Визуальный осмотр многониточных раскатов из многоручьевого калибра показал отсутствие поверхностных дефектов. Макроструктура раската, изученная на отобранных после различных проходов темплетов, характеризовалась тем, что в средней заготовке ликвационная зона имела вид искаженного квадрата, а крайних – искаженных треугольников, сходящихся вершинами к перемычке. Точечная неоднородность после суммарного коэффициента вытяжки, равного 6,5 оценена баллом 2 по ГОСТ 10243-75. Сравнительная заготовка того же сечения и из стали той же марки, прокатанная по существовавшей технологии, характеризовалась явно выраженным ликвационным квадратом и пятнистой ликвацией, оцениваемыми соответственно баллами 3 и 2. Анализ механических свойств и содержания неметаллических включений по сечению раската показал их однородность. Характеристики проб, взятых из различных участков раската, незначительно различаются между собой и выше допустимых значений.

После прокатки трехниточные раскаты разделяли в продольном направлении на отдельные заготовки газокислородными резаками вне потока стана. Опытные и сравнительные заготовки прокатывали на круги $\varnothing 50, 27$ и 17мм на сортовых станах ОАО "ДМЗ". Особенностей в макроструктуре образцов, отобранных от кругов $\varnothing 27$ и 17мм обнаружено не было: металл был плотным и однородным, скопления ликватов отсутствовали. В сравниваемых образцах круга $\varnothing 50\text{мм}$ распределение ликватов по сечению было равномерным с незначительной поперечной неоднородностью, в опытных образцах имелся слабо выражен-

ный ликвационный квадрат (балла 1). По величине обезуглероженного слоя, загрязненности неметаллическими включениями и механическим свойствам существенных различий между опытными (крайними и средними) и сравнительными образцами нет. Эти различия получаются тем меньшими, чем больше последующая суммарная вытяжка.

На стане 950/900 отработана также технология многоручьевого прокатки-разделения при использовании в качестве заготовок непрерывнолитых слябов [23]. Слябы сечением $150 \times 180 \times 400\text{мм}$ прокатывали в клети 950 с существующей калибровкой валков. Два пропуска – проглаживающий для снятия волнистости и контроля толщины и ребровой для формирования напльвы на широких гранях сляба осуществляли соответственно на гладкой бочке и в ящичном калибре. Напльвы формировали для обеспечения качественного заполнения крайних ручьев многоручьевого калибра по высоте и ширине. В клети 900 прокатку вели в многоручьевого калибре, состоящем из трех совмещенных по ширине обычных квадратных калибров (ручьев), со стороны 100мм. На опытном комплекте валков была сохранена калибровка для прокатки металла по существующей технологии. Многоручьевого прокатку осуществляли за 5–7 пропусков без кантовок в одном и том же калибре. Обжатие по перемычке составляло 40–50 в первых и 10–15мм в последних пропусках. Энергосиловые параметры клети и привода при прокатке не превышали 80% номинальных значений.

После прокатки многониточный раскат разрезали в продольном направлении газокислородными резаками по перемычкам. Испытания на осадку на 50% первоначальной высоты образцов с последующим горячим травлением поверхности показали отсутствие поверхностных дефектов как в крайних, так и в средних заготовках. При последующем переделе заготовки не зачищали. Для исследования макроструктуры проката выбрали слябы из стали марок У8 и Ст5 стандартного химического состава. Исследования показали, что макроструктура поперечных сечений опытных заготовок поперечным сечением $100 \times 100\text{мм}$ характеризуется повышенной осевой рыхлостью, средний балл которой 2,2 в средних и 1,5 в крайних заготовках, что объясняется сравнительно низким коэффициентом суммарной вытяжки – 2,3 – 2,4. Осевая пористость и дефекты нарушения сплошности отсутствуют. В центре каждой заготовки наблюдается ярко выраженная ликвационная зона, резко отделенная от периферийной зоны плотного металла. Установлено также, что в процессе многоручьевого прокатки ликвационная зона и неметаллические включения остаются в местах перемычек между заготовками и в ряде случаев после разделения выходят на поверхность. В тех случаях, когда протяженность ликвационной зоны не превышает 30 – 35% широкой грани сляба, выход ликвационной зоны на поверхности заготовок отсутствует.

Сортовые заготовки прокатывали на стане 300 ОАО "ДМЗ" в круги $\varnothing 18,25$ и 30мм . Прокатку вели в черновых ящичных калибрах и в системе овал - ребровой овал за 13–15 пропусков с разовым коэффициентом вытяжки 1,2–1,8. Одновременно с опытными прокатывали контрольные заготовки. После прокатки готовую продукцию подвергали полному комплексу испытаний и исследований, предусмотренных стандартами. Сравнительный анализ механических характеристик профилей, полученных из крайних и средних заготовок, показал их полную идентичность. По прочностным характеристикам металл опытной партии не уступал прокатанному по обычной технологии и соответствовал действующим стандартам.

На второй стадии промышленных исследований опробована и исследована трехручьевого прокатка с продольным разделением раската взаимно перпендикулярным смещением крайних заготовок с удержанием средней заготовки. Монтаж валков клети 900 показан на рис. 50. Рациональная толщина перемычек между смежными заготовками составляет 0,1 – 0,2 стороны за-

готовки. Принцип разделения заготовок, предусматривающий их взаимный сдвиг под углом к оси валка, предполагает схему чистого среза "фиктивной" перемычки. Прокатка-разделение раскатов в промышленных условиях осуществлялась устойчиво, без пробуксовок. В местах разделения заготовок отсутствовали дефекты нарушения сплошности, закаты, "усы".

По существовавшей на момент исследований технологии производства передельной заготовки на обжимной клети 950 слиток массой 5,5 тонн прокатывали на блюм сечением 205×205мм и далее на заготовочной клети 900 – за семь проходов в заготовку сечением 135×135мм. При трехручьевой прокатке достигнуто сокращение цикла прокатки с 87 до 66с, а следовательно, повышение часовой производительности стана на 8,2 % и снижение себестоимости продукции.

Таким образом, заготовки, полученные методом трехручьевой прокатки из катанных блюмов и готовая продукция, прока-

ке и нарезке калибров обычную точность, обеспечивает удовлетворительное качество проката.

При двухручьевой прокатке нормативную головную обрезь уменьшали на 10-15%, а донную часть раската вообще не зачищали. При трехручьевой прокатке установлена возможность снижения расходного коэффициента металла по сравнению с традиционной технологией за счет сокращения величины головной обрезки крайних заготовок. Дифференцированная обрезь крайних и средних заготовок позволяет снизить суммарную обрезь на 0,8 – 0,9 % без ухудшения качества проката.

Энергосиловые характеристики (сила и момент прокатки) при двухручьевой прокатке выше, чем при традиционной схеме прокатки в 1,5–2 раза. Вследствие увеличения ширины раската появляется возможность более эффективной загрузки оборудования во всех проходах вплоть до номинального значения. Удельный расход энергии при двухручьевой прокатке на 5–20% ниже, чем при прокатке по обычной технологии.

Визуальный осмотр опытных заготовок после прокатки и охлаждения показал отсутствие поверхностных дефектов, трещин, пор, рванин и т.д. Технологические пробы на 50%-ную горячую осадку от опытных заготовок и прокатанных по существующей технологии не выявили между ними различия. Во всех случаях на поверхности проб нарушения сплошности металла не наблюдалось. Геометрическая форма полученных заготовок соответствовала стандартам на передельную заготовку.

Качество готового проката из заготовок, прокатанных многоручьевым методом, исследовали при прокатке на станах 250 и 350 ОАО "ДМЗ". Нагрев заготовок и их прокатку вели по существующей технологии. Место разделения заготовок не зачищали. После нагрева в методической печи до температуры прокатки несколько опытных заготовок охладили. Визуальный осмотр показал, что морщины на необжатой боковой поверхности заготовок переходят в окалину, а дефекты металла в этой зоне отсутствуют. Пробы на 50%-ную горячую осадку (для круга и полосы 25×20мм) и на холодный загиб на 180° (для остальных полос) не выявили дефектов, причиной которых могла быть многоручьевая прокатка. Механические характеристики готового проката полностью удовлетворяли требованиям стандартов. Опытно-промышленная партия продукции не уступала по качеству продукции, полученной по обычной технологии. Макроструктуру металла сортовых профилей изучали на темплатах поперечного сечения после глубокого травления и на серных отпечатках. Отличий в макроструктуре образцов опытных и сравнительных заготовок не обнаружено. Во всех случаях металл плотный и однородный по всему сечению, скопления ликватов на поверхности отсутствуют.

Полученный на сортовых станах готовый прокат (около 50 тыс. тонн) в период освоения технологии двухручьевой прокатки-разделения передельной заготовки сечением 135×135мм на стане 950/900 был поставлен более чем 100 потребителям. Отрицательные отзывы по качеству проката не получены. Освоенные на стане 950/900 технологии двух- и трехручьевой прокатки-разделения подтвердили возможность и целесообразность производства сортовых заготовок из непрерывнолитых и катаных слябов из сталей с содержанием углерода до 0,6%.

Многоручьевая прокатка-разделение заготовок из подшипниковой стали с удалением ликвационной зоны

Неоднократные и широко известные попытки получения качественного сортового проката из непрерывнолитых слитков стали ШХ-15 долгое время не приводили к положительным результатам в силу того, что многочисленные попытки по приме-

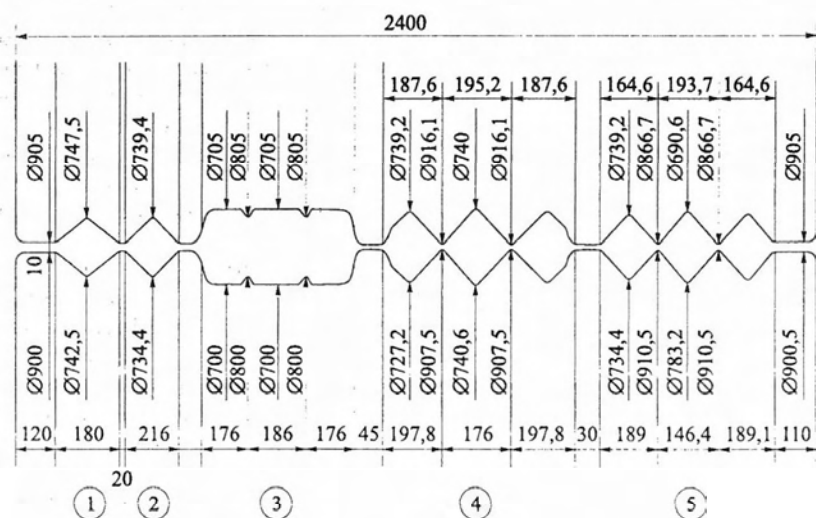


Рис. 50. Монтаж валков клети 900 для трехручьевой прокатки-разделения раскатов сдвигом крайних заготовок. Цифры в кружках - номера калибров.

танная из них, не уступают по качеству металлу, прокатанному из заготовок, полученных по существующей технологии. При этом повышается производительность стана и снижается себестоимость продукции.

На стане 950/900 отработана и технология двухручьевой прокатки-разделения [24]. Технология двухручьевой прокатки-разделения предусматривает формирование из унифицированного слитка массой 5,5т блюма с поперечным сечением 245×300 мм в клети 950 за 13 проходов. При однократной схеме подкат сечением 180×210мм получают за 15 проходов. Двухручьевую прокатку-разделение осуществляли последовательно в калибрах 9; 7 и 5/6 клети 900 за пять проходов. Монтаж валков позволил без дополнительной переделки вести прокатку передельной заготовки по однократной и двухкратной схемам и прокатку говарной круглой заготовки.

После формирования раската, состоящего из сочлененных перемычками ромбических заготовок, производили его продольное разделение в разделяющем чистовом многоручьевом калибре разрывом перемычек с одновременным формированием квадратных заготовок.

Оценка точности размеров заготовок после разделения показала, что предельные отклонения размера стороны заготовки от номинального размера достигали -0,9 и +0,6 %. Разность диагоналей поперечного сечения составляла 2,7–4,2 % номинального размера стороны, ромбичность отсутствовала. Кривизна и серповидность заготовок после разделения не превышает значений, предусмотренных стандартом. Исследованный способ разделения мало чувствителен к износу валков, требует при их настрой-

нению различных методов воздействия на кристаллизующийся слиток и использование известных приемов при пластической деформации металла базировались на идее рассредоточения зоны физико-химической неоднородности по всему объему металла.

Идея применения технологии многоручьевой прокатки-разделения дало возможность нетрадиционного решения проблемы получения высококачественного проката из непрерывнолитых слитков сталей с широким температурным интервалом кристаллизации.

Теоретические и экспериментальные исследования деформации металла при продольном разделении раската в валках прокатного стана выполнены с применением слоистых моделей. Установлена стабильность нового процесса.

Развитие концептуальной схемы многоручьевой прокатки-разделения с удалением ликвационной зоны, в связи с пуском на ОАО "ДМЗ" машин непрерывного литья заготовок и освоением непрерывной разливки подшипниковых сталей, пошло по пути разделения слитков прямоугольного поперечного сечения. Выплавку стали производили в 100-тонных электродуговых печах, сталь вакуумировали на установке порционного вакуумирования. Слитки имели характерную для непрерывнолитого металла структуру с ярко выраженной осевой химической неоднородностью балла 2,5-4 и шириной зоны физико-химической неоднородности (ЗФХН) 35-55мм.

Слитки прокатывали на стане 950/900 ОАО "ДМЗ" с формированием в клетке 900 раската с поперечным сечением 230×245×245±25мм за 9 пропусков. В клетке 900 за 4 пропусков производили формирование трехниточного раската с крайними заготовками - квадрат со сторонами 90-120мм и средней заготовкой квадратного или шестиугольного сечения.

При этом калибровку валков (на рис. 51 показана форма калибров) и режим обжатий проектировали и рассчитывали таким образом, чтобы за счет перераспределения обжатий между крайними и средним ручьями достигалось сужение зоны физико-химической неоднородности. Теоретические и экспериментальные исследования [25] по оценке возможности управления процессом ЗФХН при многоручьевой прокатке-разделении показали, что реально регулирование поперечного течения металла таким образом, чтобы ширина ЗФХН уменьшалась по ходу прокатки. Совместное решение уравнений равновесия металла в очаге многоручьевого калибра и уравнений пластичности для всех характерных участков по ширине очага деформации, показало, что наиболее существенное влияние на выход заготовок без усадочных макродефектов оказывает конфигурация ручьев, в которых происходит локализация ликвационной зоны. Применение центральных ручьев шестиугольной формы обеспечивает за счет создания зон затрудненной деформации в области сочленения заготовок препятствие для перетекания металла, обогащенного ликватами в заготовки, изначально свободные от них. Варьируя углы наклона стенок шестиугольных ручьев можно добиться, в сочетании с другими факторами, обратного течения металла, что позволяет существенно увеличить выход годного высококачественного проката.

Разделение многониточного раската на заготовки производили за один проход при толщине перемычки 6-9мм путем рас-

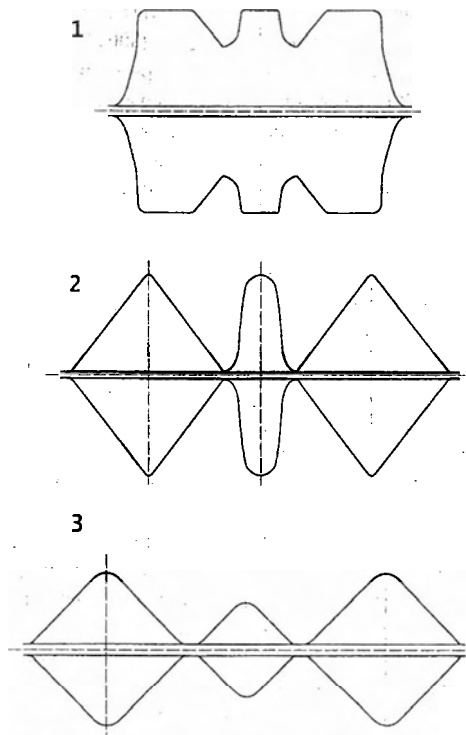


Рис. 51. Форма калибров валков клетки 900 для многоручьевой прокатки-разделения раскатов с удалением ликвационной зоны: 1 - центрирующий; 2 - формирующий; 3 - разделяющий калибры.

тяжения перемычек до разрыва и внесением концентраторов напряжений. При этом зазор по буртам калибра на 10-12% меньше, чем между гребнями валков, что исключает обжатие перемычки и стабилизирует процесс разделения, который фактически протекает до входа в очаг деформации. Процесс формирования и разделения происходил устойчиво без серпления и скручивания.

По результатам оценки качества металла заготовок для дальнейшего передела было установлено, что макроструктура металла плотная, однородная (рис. 52), балл по подусадочной ликвации был равен 0. По загрязненности неметаллическими включениями полученные заготовки отличались повышенной чистотой: балл по сульфидам -1,5; по оксидам -2,5; по глобулам -1,5. При этом карбидная ликвация и микропористость полностью отсутствовали, а структурная полосчатость не превосходила 1,5 балла. Качественные характеристики полученных сортовых заготовок существенно превышали требования ГОСТ 801-78

На заготовки из стали ШХ-15 и ШХ-15СГ с удаленной ликвационной зоной были разработаны технические условия ТУ-14-234-47-84 с последующими изменениями и дополнениями № 1 - 3 в 1988-1989 годах.

Полученные заготовки для последующего передела направляли на стан 320/250 ОАО "Серп и Молот" (г.Москва), где прокатывали в круг диаметром 10-45мм. Калиброванную сталь диаметром 12-25мм поставляли на подшипниковые заводы в счет основных заказов для холодной высадки. Полученную из этого металла на Миньярском и Орловском метизных заводах холоднотянутую проволоку также поставляли на подшипниковые заводы в счет основных заказов. Были разработаны новые технические условия ТУ-14-1-4360-87 на калиброванную и холоднотянутую проволоку из стали ШХ-15У и ШХ-15СГ-У.

Проводили сравнительные исследования металла из стали ШХ-15У (полученной методом многоручьевой прокатки с удалением ликвационной зоны), металла из непрерывнолитой стали ШХ-15 производства ОАО "Оскольский электрометаллургический комбинат" и вакуумированного металла из стали ШХ-15 производства ОАО "ДМЗ", отлитого в изложницы.

По результатам исследований установлено [26, 27], что сталь ШХ-15У имеет плотность 7,819г/см³, что соответствует плотности металла электрошлакового переплава. Макроструктура готового проката из стали ШХ-15У по всем показателям превосходит требования ГОСТ 801-78 и значительно однороднее, чем:

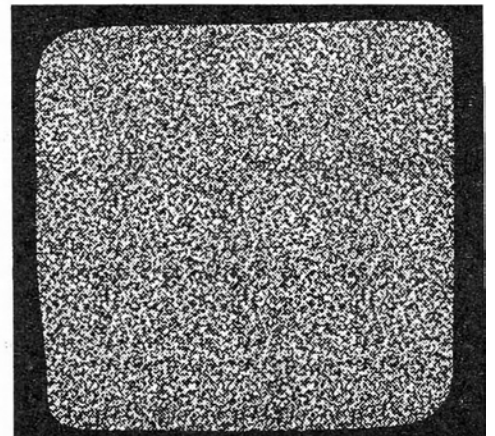


Рис. 52. Макроструктура заготовки сечением 115×115мм стали ШХ-15-У

аналоги, что является предпосылкой для получения высоких служебных свойств и эксплуатационных характеристик готовых изделий. Значительно повышается уровень механических свойств. Так, ударная вязкость возрастает на 20-30%, прокаливаемость на 25-50% по сравнению с прокатом, полученным из слитков, отлитых в изложницы.

Впервые в мировой практике в массовом производстве были получены шарики для подшипников с гарантированными показателями долговечности. На Государственном подшипниковом заводе (ГПЗ-1) была выпущена опытная партия подшипников качения типа 6-50307К с шариками диаметром 14,288мм из опытной стали. Для сравнения были использованы результаты ранее испытанных партий аналогичных подшипников из металла электрошлакового переплава. Стендовые и натурные испытания показали, что по надежности и долговечности опытный металл в 2-3 раза превосходит сталь ШХ-15 обычной технологии производства и находится на уровне металла электрошлакового переплава.

Промышленные партии металла из стали ШХ-15У массой более 3000 тонн поставлены на ГПЗ-1, ГПЗ-4, ГПЗ-8, ГПЗ-11, ГПЗ-18, ГПЗ-21, ГПЗ-23, ГПЗ-28, где изготовлено около 5млн. подшипников различных типов с телами качения из стали ШХ-15У.

Для создания безотходного процесса многоручьевой прокатки-разделения с удалением ликвационной зоны и повышения его технико-экономических показателей была исследована и реализована на практике утилизация заготовок с локализованной зоной физико-химической неоднородности. Одним из перспективных вариантов утилизации заготовок с развитой пористостью и ликвацией является их электрошлаковый переплав, который проводили на промышленных установках Р-951У и У-578. После типовой для стали ШХ-15 термообработки полученные слитки прокатывали в круг диаметром 45мм. Макроструктура деформированного металла после ЭШП отличалась плотным однородным строением, центральная пористость и точечная неоднородность не превышают 0,5 балла. По химическому составу, макро- и микроструктуре полученный сортовой прокат полностью удовлетворяет требованиям к стали электрошлакового переплава.

Возможно использование заготовок с локализованной зоной физико-химической неоднородности после многоручьевой прокатки-разделения для производства мелющих шаров по ГОСТ 7524-83. Для производства мелющих шаров заготовки с локализованной ликвационной зоной прокатывали на стане 400 ОАО "ДМЗ" в круг диаметром 60мм, который на шаропрокатном стане 40-80 ОАО "Азовсталь" без изменения действующей технологии прокатывали в шары диаметром 60мм с последующей закалкой с прокатного нагрева. Средняя твердость шаров составляла 530 НВ, что значительно выше требований действовавших стандартов. Глубина слоя с твердостью 440 НВ составляла 10-15мм, разброс значений твердости по поверхности шара не превышал 9%. Исследования эксплуатационных параметров мелющих шаров из опытного металла показали, что стойкость абразивному износу и ударостойкость возросли в 4-5 раз.

Намеченная реконструкция МНЛЗ на ОАО ДМЗ создает условия для повторной реализации разработанной и отлаженной на практике технологии трехручьевой прокатки-разделения раскатов с локализацией ЗФХН в средней заготовке.

8.2. Двухручьевая прокатка-разделение сортовых профилей

Прокатка-разделение раскатов со срезом перемычки поворотом совмещенных профилей

Двухручьевая прокатка-разделение арматурного профиля №12 и круга Ø13мм осуществлена на стане 300/280 Омутинского металлургического завода (ОМЗ). Стан 300 состоит из четырех последовательно расположенных и образующих непре-

рывную группу клетей дуо. Прокатывали заготовки с размерами 37x50x2500мм из сталей 10 и 45.

При прокатке в первой клетке стана 280 формировали раскат, состоящий из двух полос прямоугольной формы, соединенных между собой перемычкой. Во второй клетке осуществляли разделение раската на две нитки и одновременно формировали из прямоугольных полос раскаты овального сечения. В чистой клетке из овальных полос прокатывали арматурный профиль №12 или круг Ø13мм. Прокатанные по опытной технологии готовые профили проката и отобранные по пропускам темплеты подвергали металлографическому исследованию. Глубоким травлением на пробах круглого прутка Ø13мм и на недокатах выявлена плотная структура спокойного металла, ликвационный квадрат практически не обнаружен. Микроструктура готовых профилей имела ферритно-перлитное строение с величиной зерна 7 – 8 баллов. При визуальном осмотре арматурного профиля №12 и круга видимых дефектов не обнаружено. Геометрия арматурного профиля и механические свойства готовых профилей удовлетворяли требованиям нормативно-технической документации.

На основании результатов опытно-промышленной прокатки даны рекомендации по использованию разработанной технологии двухручьевой прокатки-разделения на мелкосортных станах для производства сортовых профилей проката. В частности была разработана и освоена технология двухручьевой прокатки-разделения арматурного профиля №14 на мелкосортном стане 250 Нижне-Сергинского металлургического завода (НСМЗ) [28].

Двухручьевую прокатку-разделение арматурного профиля №14 на стане 250 осуществили по схемам а - в, показанным на рис.53.

Исходную квадратную заготовку со стороной 100мм из стали 35ГС прокатывали за 5 проходов в трехвалковой обжимной клетке на квадратную заготовку со стороной 50мм и затем в клетях черновой группы на круг Ø37мм. Путем последовательной прокатки круглого профиля в гладких валках и подготовительного разрезного калибра осуществляли формирование ослабленного сечения в центральной части раската. Далее следовало его разделение на две отдельные заготовки в прокатных валках с одновременным приданием их поперечному сечению овальной формы. Полученные после разделения двухниточного раската в горизонтальных валках овальные полосы кантуют на 90° и прокатывают в чистовых калибрах на готовый профиль. В случае разделения раската в вертикальных валках овальные полосы только разводят в горизонтальном направлении без кантовки.

Образцы готового арматурного профиля №14 подвергали механическим испытаниям, визуальному осмотру, травлению и дополнительно горячей и холодной осадке на 1/3 первоначальной высоты образца. При глубоком травлении поперечных сечений образцов во всех случаях выявлена плотная структура ме-

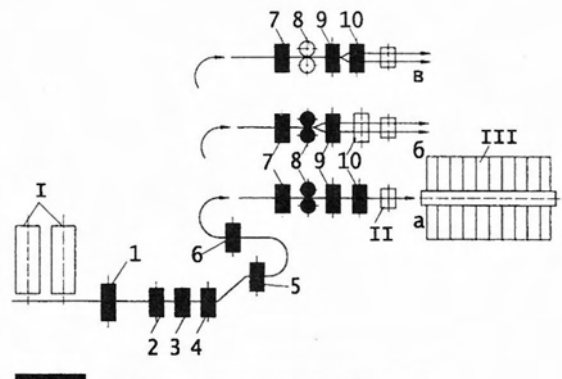


Рис. 53. Схема расположения основного оборудования и схема прокатки арматурного профиля на стане 250 НСМЗ: I - нагревательные печи; II - летучие ножницы; III - холодильник; 1+10 - клетки; а - одноручьевая прокатка; б и в - разделение раската в вертикальной 8 или горизонтальной 7 клетях соответственно

талла, ликвационный квадрат проявлялся слабо. Механические свойства арматурного профиля, а также контролируемые размеры периодического профиля по диаметру стержня и высоте гребня соответствовали требованиям ГОСТ 5781-82. Масса 1 пог. м профиля соответствовала требованиям стандарта в пределах допускаемого минусового отклонения.

При производстве арматурного профиля №14 двухручье-вой прокаткой-разделением часовая производительность стана 250 увеличилась на 25–30%. Благодаря увеличению скорости прокатки почти в два раза в черновой и шахматной группах клетей стана снизились потери тепла раскатом, повысилась температура конца прокатки на 40–50°С и уменьшился удельный расход энергии в чистовой группе клетей.

Прокатка-разделение раскатов взаимным смещением профилей

Двухручьевую прокатку-разделение арматурного профиля N14 из стали 35ГС также осуществили на полунепрерывном стане 250 НСМЗ. Прокатку в обжимной клетке трио, черновой непрерывной и шахматной группе клетей осуществляли аналогично описанному ранее. При транспортировке по обводному аппарату после ребрового обжатия раскат снова кантовали на 90° и в клетке 7 прокатывали в двухниточный раскат, состоящий из двух прямоугольных заготовок, соединенных между собой по широким граням перемычкой толщиной 2–3мм. После клетки 7 двухниточный раскат с помощью выводной кантовующей трубки кантовали на 90° и разделяли взаимным смещением заготовок в валках клетки 9. Разделенные прямоугольные полосы разводили в горизонтальной плоскости с помощью специальной выводной проводки и пониточно докатывали в чистовой клетке в арматурный профиль со скоростью 8–9м/с. После прокатки в чистовой клетке обе нитки готового проката одновременно резали на мерные длины барабанными летучими ножницами, транспортировали на холодильник и совместно охлаждали в одной ячейке реечного холодильника.

Образцы готового арматурного профиля №14 осматривали, проводили механические испытания, травление и дополнительно горячую осадку на 1/3 первоначальной высоты образца и загибу на 90° в холодном состоянии. При глубоком травлении поперечных сечений образцов готового проката выявлена плотная структура металла, ликвационный квадрат слабо просматривался. Визуальный осмотр поверхности протравленных, осаженных и загнутых образцов поверхностных дефектов, являющихся следствием продольного разделения раската, не выявил. Результаты сравнительных испытаний механических свойств арматурных профилей, прокатанных из стали 35ГС одной плавки одноручьевым и двухручьевым способом показали их идентичность и соответствие требованиям ГОСТ 5781-82. Результаты обмеров контролируемых размеров периодического профиля: диаметра стержня, высоты гребня и массы одного погонного метра профиля соответствуют требованиям ГОСТ 5781-82. В процессе исследований установлено, что технология двухручье-вой прокатки-разделения арматурного профиля №14, по сравнению с одноручьевой прокаткой, способствовала увеличению часовой производительности стана на 25–30% за счет уменьшения цикла прокатки.

Результаты исследований разработанной технологии двухручье-вой прокатки-разделения позволили рекомендовать ее к использованию на мелкосортных станах для производства арматурных профилей малых сечений.

Прокатка-разделение раскатов контролируемым разрывом

Начиная с 1985 года ДонНТУ и НПО "Доникс" осуществляли разработку, исследование и освоение технологии двухручье-вой прокатки-разделения на основе новых способов продольного разделения многониточного раската в прокатных валках на мелкосортных станах КГМК "Криворожсталь" [29, 30].

Сортамент мелкосортных станов КГМК "Криворожсталь"

в основном включает арматурные профили для железобетонных конструкций №10-№28 производимые в прутках, при этом наибольший объем производства приходится на арматурные профили мелких сечений (№№10–16). Следует отметить, что по мере развития рыночных отношений эта тенденция усугубляется: если в 1990 году объем производства арматурных профилей №№10–14 составлял 52,7% от всего объема ее производства, то к концу 1996 года он составил уже 81,5%. В связи со значительным объемом производства арматурной стали мелкосортные станы (МС) 250-1, 3, 4, и 5 были специализированы на производстве узкого диапазона арматурных профилей. В связи со спадом производства значительно возросла себестоимость металлопродукции и обеспечение рентабельного производства арматурной стали потребовало снижения расходов по переделу. Этому в существенной мере способствовала технология двухручье-вой прокатки-разделения, реализованная на станах 250.

Принципиальная схема двухручье-вой прокатки-разделения арматурных профилей с использованием контролируемого разрыва показана на рис. 54. Из прямоугольной или квадратной заготовки в двухручьевом калибре формируют раскат, состоящий из двух профилей ромбической или квадратной формы, соединенных между собой одной из диагоналей перемычкой, а продольное разделение раската осуществляют в двухручьевом калибре в валках горизонтальной (рис. 54, Б) или вертикальной (рис. 54, А) клетей. При продольном разделении раската происходит разрушение перемычки без образования в месте разделения заусенцев в виде шейки разрыва. Разделенные квадратные профили после разведения в горизонтальной плоскости одновременно прокатывают в две нитки последовательно в овальных и чистовых калибрах в готовый профиль. Новый способ прокатки позволяет осуществлять формирование и продольное разделение двухниточного раската при наличии двух специальных двухручьевых калибров, имеет повышенную износостойкость валков, обеспечивает центрирование раскатов в двухручье-

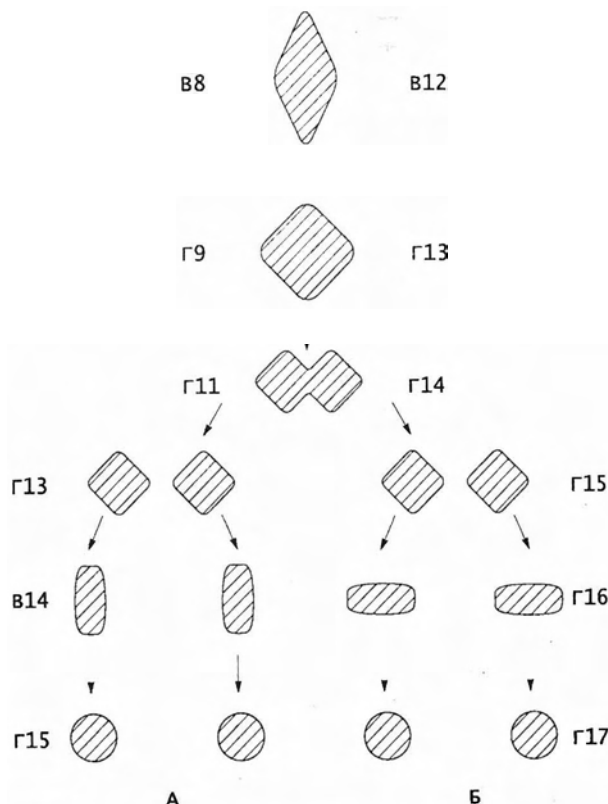


Рис. 54. Принципиальная схема двухручье-вой прокатки-разделения при производстве арматурного профиля. Цифры - номера клетей с вертикальными (В) и горизонтальными (Г) валками.

евых калибрах и получение бездефектной поверхности готового проката, отличается простотой настройки валков и привалковой арматуры.

Двухручьева прокатка-разделение арматурного профиля №10 внедрена на МС 250-3. Стан состоит из черновой группы, включающей семь последовательно расположенных горизонтальных клетей, и двух чистовых групп клетей, состоящих из восьми чередующихся вертикальных и горизонтальных рабочих клетей. Прокатку в черновой группе клетей осуществляют в две нитки и в чистовых группах – в одну нитку. Режим обжатий приведен в табл. 2. Нагрев заготовки и прокатка в черновой группе клетей при двухручьева прокатке-разделении аналогичны традиционной схеме одноручьева прокатки. Исходную квадратную заготовку со стороной 80мм прокатывают за семь проходов в черновой группе в ребровой овал и передают раскат в чистовую группу клетей. Схема двухручьева прокатки-разделения арматурного профиля в чистовой группе клетей МС 250-3 показана на рис. 54, А.

В 8-й клетки из ребрового овала прокатывают ромбический профиль 39x18 мм, а затем в клетки 9 формируют квадратную заготовку со стороной 20мм. После транспортировки раската через 10-ю клетку осуществляется формирование двухниточного раската в горизонтальной клетке 11. Из формирующего калибра выходит двухниточный раскат, состоящий из двух квадратных профилей соединенных по диагонали перемычкой, и транспортируется по желобам через 12-ю клетку. Продольное разделение двухниточного раската осуществляют в разделяющем двухручьева калибре горизонтальной 13-й клетки, которая выполнена предварительно напряженной.

Таблица 2

Режимы обжатий при двухручьева прокатке-разделении арматурного профиля №10 на МС 250-3

Клеть	Пропуск	Размеры раската, мм		Обжатие, мм	Уширение, мм	Кэффициент вытяжки
		высота	ширина			
0	0	81	81	-	-	-
1	1	86	62	19	5	1,329
2	2	93	43	19	7	1,289
3	3	58	47	46	15	1,479
4	4	74	28	19	16	1,365
5	5	45,5	45,5	28,5	17,5	1,418
6	6	53,5	20	16,1	17,4	1,466
7	7	27	32,5	21	7	1,328
8	8	39	18	9	6,5	1,45
9	9	25	25	14	7	1,235
11	10	25	15,3	11,4/4,7	5	1,422
13	11	13,5 x 2	14,8	6/0,5	2	1,012
14	12	14,7 x 2	7,9	3,8	3	1,354
15	13	11,3 x 2	11,5 / 9		3,4	1,231

При двухручьева прокатке-разделении арматурного профиля №10 достигнуто увеличение производительности МС 250-3 на 35%, а арматурного профиля №12 - на 26%. При внедренных режимах двухручьева прокатки-разделения снизились удельные энергозатраты на деформацию металла на 20,5–30,5%, удельный расход валков на 19–30%. За счет уменьшения угара металла при нагреве и окисления при прокатке выход годного увеличился на 2–4кг/т.

На МС 250-4 реализована двухручьева прокатка-разделение арматурного профиля №12. Мелкосортный стан 250-4 состоит из трех групп клетей: черновой, включающей семь последовательно расположенных горизонтальных клетей; промежуточной, состоящей из четырех горизонтальных рабочих клетей, и двух чистовых, включающих шесть последовательно расположенных вертикальных и горизонтальных клетей. В черновой и

промежуточной группах клетей осуществляют двухниточную прокатку заготовок, в чистовых группах клетей - в одну нитку.

Исходную квадратную заготовку со стороной 80мм прокатывают за девять проходов в черновой и промежуточной группах клетей в ребровой овал и после прокатки в 12-й клетки чистовой группы получают ромбический профиль 46x20мм (режим обжатий приведен в табл. 3). Схема двухручьева прокатки-разделения арматурной стали в чистовой группе клетей МС 250-4 показана на рис. 54, Б.

В 13-й клетки из ромба формируют квадратную заготовку со стороной 24мм. Формирование двухниточного раската осуществляют в горизонтальной клетке 14. Двухниточный раскат состоит из двух квадратных полос расположенных на диагональ и соединенных перемычкой. Продольное разделение двухниточного раската осуществляют в горизонтальных валках 15-й клетки. После разделения квадратные полосы с помощью двухканальной проводки разводят в горизонтальной плоскости и в две нитки прокатывают в овальных калибрах 16-й горизонтальной клетки, расположенных с шагом между осями равным 65мм. Овальные профили разводят в горизонтальной плоскости на расстоянии 190мм и в две нитки прокатывают в чистовой клетке в

Таблица 3

Режимы обжатий при двухручьева прокатке-разделении арматурного профиля №12 на МС 250-4

Клеть	Пропуск	Размеры раската, мм		Обжатие, мм	Уширение, мм	Кэффициент вытяжки
		высота	ширина			
0	0	81	81	-	-	-
1	1	64	86	17	5	1,295
2	2	46	96	18	10	1,369
3	3	66	58	30	12	1,267
4	4	37	66	18,5	10,5	1,217
5	5	27	72	10	6	1,386
6	6	48	36	24	9	1,248
8	7	23	55	13	7	1,317
9	8	37,5	32	15,5	9	1,190
12	9	20	46	12	9	1,393
13	10	31,4	31	14,6	11	1,298
14	11	17	28	7	7	1,342
15	12	16,5	17 x 2	0,5	3 x 2	1,05
16	13	8,6	21,5 x 2	6,4	4,5 x 2	1,176
17	14	11	13 x 2	10,5	4,4 x 2	1,231

арматурный профиль №12. Охлаждение готовых профилей при двухручьева прокатке-разделении арматурного профиля №12 аналогично приведенной выше технологии двухручьева прокатки-разделения арматурного профиля №10.

При двухручьева прокатке-разделении арматурного профиля №12 производительность мелкосортного стана 250-4 повысилась на 33%. При внедренных режимах двухручьева прокатки-разделения снизились удельные энергозатраты на деформацию металла на 22,5%, удельный расход валков на 20–30%, удельный расход условного топлива на 25–30%. За счет уменьшения угара металла при нагреве и окисления при прокатке выход годного увеличился на 2–4кг/т.

Снижение удельных затрат электроэнергии при двухручьева прокатке-разделении арматурного профиля в основном достигается за счет уменьшения в 2 раза коэффициента суммарной вытяжки из-за продольного разделения раската и увеличения скорости прокатки в клетях, предшествующих продольному разделению раската. За счет уменьшения потерь теплоты металлом в межклетевых промежутках при одинаковой скорости прокатки в чистовой клетке падение температуры металла уменьшается на 25-30%. Снижение потерь теплоты металлом при двухручьева прокатке-разделении способствует и уменьшению разности

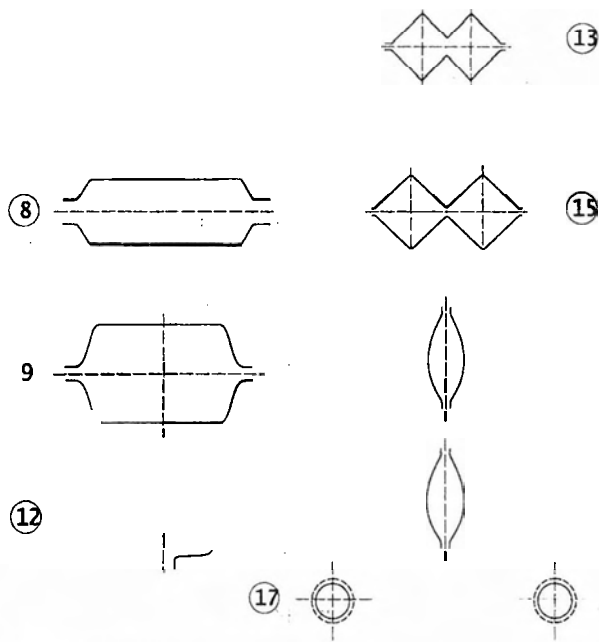


Рис. 55 Форма калибров валков для двухручьевого прокатки-разделения арматурного профиля № 14 на МС 250-4. Цифры в кружках - номера клеток

температуры между передним и задним концами раската (температурного клина).

В результате проведения механических испытаний и металлографических исследований установлено, что макроструктура металла в поперечных сечениях промежуточных раскатов и готовых арматурных профилей характеризуется плотным строением. Значения показателей механических свойств готового проката, полученного одноручьевого прокаткой и двухручьевого прокаткой-разделением, а также левой и правой ниток стана после продольного разделения близки друг к другу и соответствуют требованиям ГОСТ и ТУ.

Освоена также двухручьевого прокатка-разделение арматурного профиля № 14 на стане 250-4. Двухручьевого прокатку-разделение арматурного профиля № 14 осуществляли по трем вариантам калибровки валков. Результаты промышленных прокаток показали, что первые два варианта калибровок имеют ряд существенных недостатков и от них отказались.

Освоен и постоянно используется третий вариант калибровки валков (рис. 55). При этом варианте калибровки валков в черновой группе клеток за семь проходов прокатывают круг Ø35 мм. В гладких валках клетки 8 из круглой заготовки формируют плоский овал, который через транспортный калибр клетки 9 передают к чистовой группе клеток. Путем ребрового обжатия плоского овала в валках вертикальной клетки 12 получают прямоугольный раскат с размерами 30x23мм, из которого в следующей клетке формируют двухниточный раскат. Режим обжатий по третьему варианту приведен в табл.4.

Установлено, что макроструктура металла в поперечных сечениях промежуточных раскатов и готовых арматурных профилей характеризуется плотным строением. При визуальном осмотре поверхности протравленных и изогнутых на 90° образцов поверхностных дефектов, вызванных продольным разделением раската, не выявлено. Значения показателей механических свойств готового проката, полученного одноручьевого прокаткой и двухручьевого прокаткой-разделением, а также левой и правой ниток стана после продольного разделения близки друг к другу и соответствуют требованиям ГОСТ и ТУ. Фактическая точность готового профиля при двухручьевого прокатке-разделении

соответствует требованиям стандарта. Так, колебания массы одного погонного метра арматурного профиля №14 составили 54 грамма и по отношению к среднему значению не превышают ±2,3%, разница массы одного погонного метра арматурного профиля, прокатанных в левой и правой нитках, не превысила ±1,25%. Разница между значениями горизонтального диаметра арматуры из левой и правой ниток по отношению к среднему значению составляет ±0,33мм (2,1%), а вертикального диаметра ±0,18мм (1,1%).

При двухручьевого прокатке-разделении арматурного профиля производили исследование характера износа контуров формирующего и разделяющего двухручьевого калибра. На рис. 56 показан износ поверхности двухручьевого калибра после прокатки в них 250т стали марки 35ГС. Вершины гребней формирующего двухручьевого калибра имеют износ в 1,5-2 раза больше, чем остальные части калибра (рис. 56,а) в связи с превалированием высотной деформации металла под ними. Остальная поверхность калибра изнашивается относительно равномерно. Наблюдается повышенный износ нижнего валка по сравнению с верхним, очевидно, по причине меньшего поступления на него охлаждающей воды. Разделяющий двухручьевого калибр (рис.

Таблица 4
Режимы обжатий при двухручьевого прокатке-разделении арматурного профиля №14 на МС 250-4

Клеть	Пропуск	Размеры раската, мм		Обжатие, мм	Уширение, мм	Коэффициент вытяжки
		высота	ширина			
0	0	81	81	-	-	-
1	1	67	85	14	4	1,140
2	2	47,5	93	19,5	8	1,347
3	3	54	59	39	11,5	1,383
4	4	34	76	20	17	1,304
5	5	53	41	23	7	1,357
6	6	27	59,5	14,5	6,5	1,260
7	7	35	35	24,5	8,3	1,372
8	8	21	42	14,3	6,7	1,194
12	9	30	23	12	2	1,253
13	10	20	34	13	4	1,421
15	11	20	19 x 2	6	1 x 2	1,011
16	12	11,8	21,5 x 2	4,2	5,5 x 2	1,152
17	13	16,3/13	15,3 x 2	8,8	3,5 x 2	1,303

56,б) изнашивается только по поверхности гребней, что связано с особенностью продольного разделения раската контролируемым разрывом. Износ поверхности гребней равномерный. Это способствует увеличению времени его эксплуатации. С целью увеличения срока службы двухручьевого калибров целесообразно повысить интенсивность охлаждения их водой и систематически контролировать равномерность ее подачи на калибры.

В связи с изложенным, прокатные валки, в которых осуществляется нарезка двухручьевого формирующего и разделяющего калибра, целесообразно изготавливать из легированного чугуна с повышенной износостойкостью СПХН-60 или высокопрочного чугуна СШХН.

На МС 250-1 освоена и постоянно производится двухручьевого прокатка-разделение арматурного профиля №8. Стан непрерывный двухниточный. Схема двухручьевого прокатки-разделения арматурного профиля №8 в чистовой группе клеток МС 250-1 показана на рис. 57, а режим обжатий - в табл. 5.

Технология двухручьевого прокатки-разделения позволила за счет уменьшения в два раза коэффициента суммарной вытяжки (из-за продольного разделения раската) осуществить прокатку мелкого арматурного профиля №8 со среднечасовой производительностью одной стороны стана около 35т/ч без увеличения числа клеток. При освоении режимах двухручьевого про-

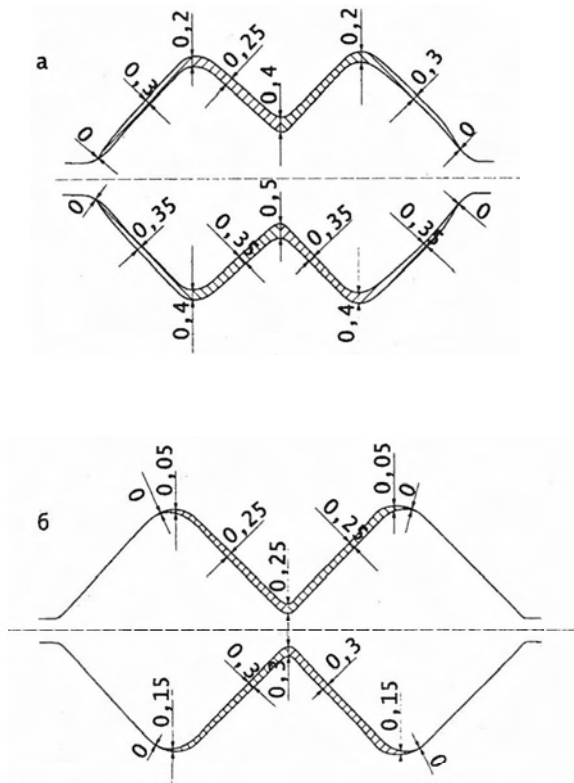


Рис. 56. Износ контура формирующего (а) и разделяющего (б) двухручьевых калибров.

катки-разделения арматурного профиля №8 удельные энергозатраты на деформацию металла составили 330–350кДж/кг, что соответствует аналогичным затратам при традиционной одноручьевой прокатке арматурного профиля №10. В процессе механических испытаний и металлографических исследований установлено, что макроструктура металла готовых арматурных профилей характеризуется плотным строением. Значения показателей механических свойств готового проката, полученного двухручьевой прокаткой-разделением, соответствуют требованиям ГОСТ и ТУ.

Производство арматурного профиля №10 освоено на стане 280 ОАО "ЕМЗ". Стан 280 линейного типа расположен в три линии: обжимная, черновая и чистовая. На стане прокатывают арматурные профили №12 и №14 из углеродистой и низколегированной стали из квадратной заготовки сечением 150x150мм. В обжимной клети из заготовок 150x150мм получают квадрат со стороной 42мм за 7 пропусков. Калибровка валков черновой линии выполнена по системе шестигранник – квадрат. В черновой линии делается три пропуска. Калибровка валков чистовой линии стана выполнена по системе овал-квадрат и овал-круг. Прокатку раската во второй черновой клети и первой чистовой клети осуществляют по непрерывной схеме с соблюдением равенства секундных объемов, что является особенностью прокатки на этом стане.

В связи с требованиями рынка возникла необходимость в производстве на

стане 280 арматурного профиля №10. Так как резервы по увеличению вытяжной способности калибров исчерпаны, достичь уменьшения сечения прокатываемых профилей можно реализацией различных мероприятий. Анализ показал, что наиболее рациональным вариантом является применение технологии двухручьевой прокатки-разделения. Путем прокатки квадратного раската в двухручьевом калибре формируется двухниточный раскат, состоящий из двух профилей выполненных в виде ромбического овала или квадрата, соединенных между собой вдоль одной из диагоналей толстой перемычкой. Последующее продольное разделение двухниточного раската осуществляют в двухручьевом разделяющем калибре способом "контролируемого" разрыва. При продольном разделении, в связи с зарождением макротрещины на оси симметрии раската, происходит разрушение перемычки без образования в месте разделения заусенцев в виде шейки разрыва. Разделенные профили одновременно прокатываются в две нитки последовательно в предчистовых и чистовых калибрах в готовый арматурный профиль.

Таблица 5

Режимы обжатий при двухручьевой прокатке-разделении арматурного профиля №8 на мелкосортном стане 250-1

Пропуск и клеть	Размеры раската, мм		Обжатие, мм	Уширение, мм	Коэффициент вытяжки
	высота	ширина			
0	81	81	-	-	-
1	62	86	19	5	1,343
2	44	95	18	9	1,309
3	59	59	36	15	1,473
4	29,5	68	29,5	9	1,479
5	42	37	26	7,5	1,446
6	19	54	18	12	1,435
7	31	26	23	7	1,328
8	15,7	39	10,3	8	1,460
9	22,5	22	16,5	6,3	1,317
10	12,5	28	5,7	9,8	1,313
11	19,1	18	8,9	5,5	1,263
12	11,2	18,5	7,2	6,3	1,226
13	11	11,8x2	-	-	1,02
14	6,2	12,2x2	2,9	3,1	1,152
15	7,1	9	5,1	2,8x2	1,294

Исследования показали, что при двухручьевой прокатке-разделении арматурного профиля №10 по сравнению с одноручьевой прокаткой часовая производительность стана увеличивается в два раза, удельные энергозатраты на деформацию металла уменьшаются на 15–18%, окалинообразование при прокатке уменьшено на 8–10%.

Одной из особенностей макроструктуры слитка углеродистых сталей является наличие центральной зональной ликвации, наиболее ярким проявлением которой, является так называемый "ликвационный квадрат". Центральная зона слитка характеризуется повышенной концентрацией неметаллических включений, температура плавления которых, как правило, ниже, чем температура плавления основного металла. При использовании традиционных схем прокатки осесимметричных профилей (круг, квадрат, арматурный профиль и др.) ликвационная зона сохраняет свое положение в центре сечения раската, не выходя на поверхность. Это не оказывает вредного влияния на служебные свойства проката, например,

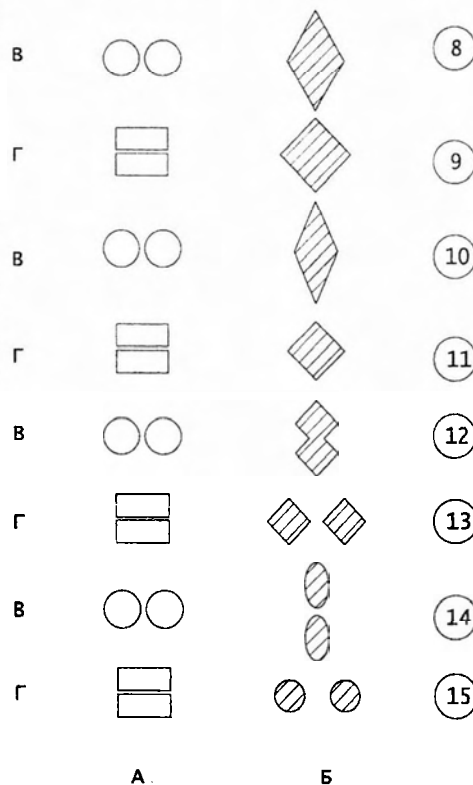


Рис. 57. Схемы расположения валков (А) и поперечных сечений раскатов (Б) при двухручьевой прокатке-разделении арматурного профиля в чистовой группе клетей мелкосортного стана 250-1: В - вертикальные клети; Г - горизонтальные клети. Цифры - номера клетей (проходов).

на коррозионную стойкость.

Процесс прокатки-разделения при производстве сортовых профилей существенно изменяет характер течения металла при деформации и, соответственно, его структуру по сечению. Ликвационная зона при этом выходит на поверхность металла в области его продольного разделения, что может привести к ухудшению служебных характеристик готового проката.

Одним из путей решения задач повышения структурной, физической и химической однородности осевой зоны слитка явилась технология, предусматривающая введение в изложницу штанги (стержневого макрохолодильника) при разливке стали. Такая технология позволяет повысить однородность металла, в том числе по наиболее ликвирующим элементам – сере и углероду и увеличить выход годного. Внутренние стержневые холодильники длительное время используют в литейном производстве при получении особо сложных отливок для армирования и ускорения кристаллизации ответственных узлов изделий.

В связи с изложенным была поставлена задача - получить заготовки с "маркером" в осевой зоне для анализа влияния пластического деформирования металла в процессе прокатки на формоизменение осевой ликвационной зоны заготовки с учетом особенностей прокатки-разделения; проверка возможности управления ликвационными процессами и получения заготовок с пониженным содержанием неметаллических включений в осевой зоне за счет использования макрохолодильника при кристаллизации металла.

Исследования выполнены с использованием недокатов, полученных на различных участках стана 280 при производстве арматурного профиля №10 из стали 35ГС.

На первом этапе исследовали макроструктуру промежуточных темплетов, отобранных на участках перед и после продольного разделения раската. На серных отпечатках по Бауману (рис. 58) поперечного сечения темплетов видно, что к началу продольного разделения раската вследствие пластической деформации металла ликвационная неоднородность в центральной зоне сечения раската в значительной мере сглажена и неметаллические включения распределены равномерно по сечению образцов. Микроструктурный анализ также не выявил существенного различия содержания неметаллических включений в зоне разделения раската, соответствующей центральной зоне сечения слитка и исходной заготовки, и в периферийных участках сечения раската. Это во многом связано с низким содержанием серы в исходной заготовке из спокойной стали 35ГС и, следовательно, с невысокой степенью ликвации. Учитывая то, что в полуспокойных сталях ликвационные явления выражены более четко, в последующих исследованиях использованы также недокаты из полуспокойной стали Ст5Гпс.

На втором этапе исследований прокатали композиционные заготовки сечением 150x150мм из слитка с внутренним стержневым макрохолодильником – вставкой квадратного сечения 150x150мм из той же стали, предварительно введенной в изложницу. На рис. 59 представлена макроструктура темплетов, отобранных от заготовок сечением 150x150мм из сталей Ст5Гпс и 35ГС. На рис. 59 видно, что наличие холодильника (массивной центральной вставки) изменяет распределение включений серы в поперечном сечении заготовки. При этом, если в полуспокойной стали Ст5Гпс формируется осевая зона с ярко выраженной пониженной концентрацией включений (рис. 59а), то в спокойной стали 35ГС эти явления выражены менее четко (рис. 59б).

Особенности структуры металла, выявленные на заготовках сечением 150x150мм (рис. 59), сохраняются. Исследования показали, что применение центрального стержневого макрохолодильника дает возможность получить слиток с меньшей концентрацией неметаллических включений в осевой зоне. Причем этот эффект проявляется тем заметнее, чем выше степень ликви-

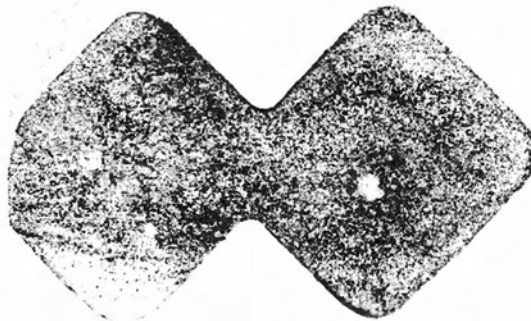
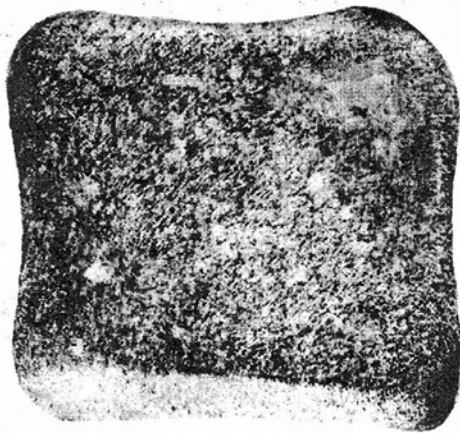
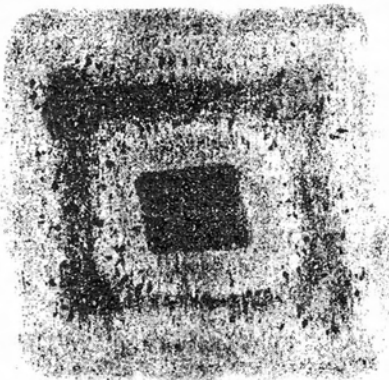
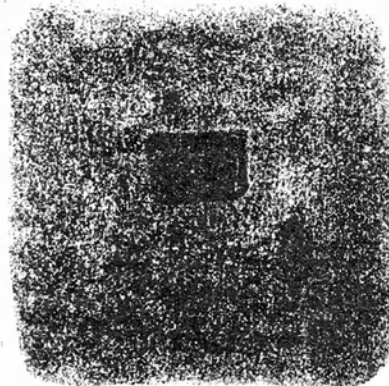


Рис. 58. Макроструктура поперечных темплетов готового раската, отобранных перед разделением раската (а) и после образования перемычки (б) при производстве арматурного профиля №10 с использованием процесса прокатки-разделения

ции в исходном металле. Снижение концентрации неметаллических включений в осевой зоне заготовок, получаемых из слитков с макрохолодильниками, особенно важно при прокатке таких заготовок с разделением. Часть полученных композиционных заготовок сечением 150x150мм была перекатана в заготовки сечением 80x80мм, из которых на непрерывном проволочном стане 250 прокатали арматурный профиль №10 по традиционной схеме – без продольного разделения раската. Из остальных заготовок производили арматурный профиль №10 на стане 280 с использованием прокатки-разделения. При этом отбирали темплеты



а



б

Рис. 59. Макроструктура поперечных темплетов заготовок сечением 150x150 мм: а - сталь Ст5Гпс; б - сталь 35ГС

от заготовки сечением 80x80мм и готового проката (рис.60).

Другой задачей экспериментального исследования являлась проверка возможности использования измененной осевой зоны заготовки в качестве своего рода "маркера", отмечающего положение оси заготовки при прокатке с разделением. На рис. 61 представлена макроструктура металла готового арматурного профиля №10, прокатанного из композиционной заготовки по традиционной схеме – без продольного разделения раската. Видно, что распределение неметаллических включений, характерное для исходной заготовки, сохраняется и в готовом профиле. Обращает на себя внимание тот факт, что в макроструктуре образцов из стали 35ГС с более однородным исходным распределением серы, граница между основным металлом и измененной осевой зоной более размыта по сравнению с макроструктурой образцов из стали Ст5Гпс. Видно, что измененная осевая зона расположена несимметрично относительно продольной оси проката (рис. 61, а). Это, возможно, связано с неравномерностью течения металла при прокатке или со смещением макрохолодильника от центральной оси при разливке. Вместе с тем, результаты исследования позволяют утверждать, что прокатка композиционной заготовки с разделением дает возможность более детального анализа влияния этой технологии на формирование структуры металла с целью поиска путей для дальнейшего ее улучшения.

Исследования макроструктуры образцов арматурного профиля №10, полученного из композиционных заготовок сечением 150x150мм на стане 280 с продольным разделением раската, показали следующее. Процесс прокатки-разделения композиционной заготовки осуществлялся без каких-либо негативных особенностей. Расслоение металла и другие дефекты, обусловленные интенсивной деформацией измененной осевой зоны заготовки, не наблюдались. На рис. 62 представлена макроструктура готового арматурного профиля №10, прокатанного из композиционной заготовки стали 35ГС с использованием процесса прокатки-разделения. Из сравнения рис. 61 и 62 видно, что интенсивная пластическая деформация в зоне разделения приводит к дальнейшему размытию ликвационной неоднородности и ее сглаживанию. В некоторых участках образцов (рис. 62, б), прилегающих к поверхности готового проката, наблюдается незначительное обогащение металла сернистыми включениями, однако степень сегрегации невысока и не выходит за пределы допустимой. Микроструктурный анализ неметаллической фазы не выявил недопустимого сосредоточения неметаллических включений в зоне разделения.

Анализ результатов исследований показал, что увеличение общего коэффициента вытяжки металла при прокатке способствует улучшению структуры и служебных характеристик готового проката, полученного методом прокатки-разделения.

Полученные материалы полезны для детального и всестороннего анализа процесса прокатки-разделения. Особенно, учитывая то, что слитковый передел еще сохраняется на территории стран СНГ.

Предварительные проработки позволили разработать технологию процесса прокатки на стане 280 ОАО "ЕМЗ" арматурного профиля №10. Режимы обжатий, применяемые в соответ-

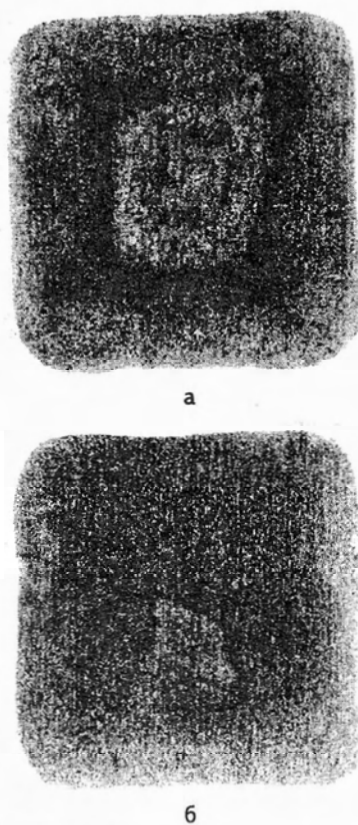


Рис. 60. Макроструктура поперечных темплетов заготовок сечением 80 × 80 мм: а - сталь Ст5Гпс; б - сталь 35ГС.

вии с новой технологией представлены в табл. 6.

Анализ результатов двухручьевого прокатки-разделения промышленной партии арматурного профиля №10 объемом 12122 т показал, что размеры профиля, их предельные отклонения по длине раската и уровень механических свойств соответствуют требованиям нормативно-технической документации для углеродистых и низколегированных сталей. В процессе освоения двухручьевого прокатки-разделения арматурного профиля №10 достигнута максимальная производительность стана 24,5 т/ч, что превышает производительность стана при производстве арматурного профиля №12 по традиционной технологии в одну нитку. Технология двухручьевого прокатки-разделения арматурного профиля №10 освоена на стане 280 и постоянно используется при наличии заказов на производство этого профиля.

Институтом черной металлургии им.З.И.Некрасова (ИЧМ) разработана технология прокатки-разделения раскатов при производстве катанки на проволочном стане 250 ОАО "ЕМЗ". Стан непрерывный, состоит из черновой группы клетей (прокатка раската осуществляется в четыре нитки), первой промежуточной (также прокатка раската в четыре нитки), двух вторых промежуточных (прокатка раската в две нитки) и двух чистовых групп клетей, в которых прокатку раската производят в одну нитку. В чистовых

группах имеются клетки с вертикальными и горизонтальными валками. На стане используют заготовку сечением 80x80мм, из которой прокатывают катанку и круглые профили диамет-

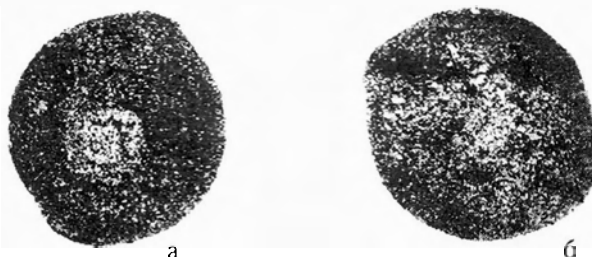


Рис. 61. Макроструктура поперечных темплетов готового арматурного профиля №10, прокатанного из композиционной заготовки из сталей Ст5Гпс (а) и 35ГС (б) по традиционной схеме

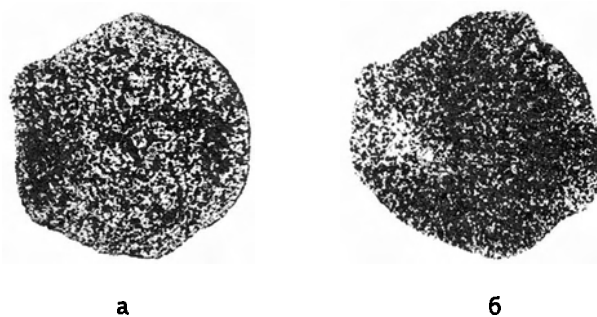


Рис. 62. Макроструктура поперечных темплетов готового арматурного профиля №10, прокатанного из композиционной заготовки из стали 35ГС с разделением: а и б - разделенные профили, полученные из одной заготовки.

Таблица 6

Режимы обжатий при двухручьевой прокатке-разделении арматурного профиля №10 на линейном стане 280

Клеть	Пропуск	Размеры раската, мм		Обжатие, мм	Уширение, мм	Коэффициент вытяжки
		высота	ширина			
	0	150	150	-	-	
1	1	108	155	42	5	1,383
1	2	70	167	38	12	1,426
1	3	109	80,1	58	10,1	1,331
1	4	52	131,9	28,1	22,9	1,464
1	5	81,5	78,9	50,4	26,9	1,605
1	6	35	82,2	25,5	21,7	1,453
1	7	55,3	52,3	26,9	17,3	1,446
2	8	21	57,6	21	15,6	1,571
2	9	34,9	32,5	22,7	11,5	1,509
3	10	15	37,3	12,6	9,7	1,476
4	11	25,1	22,7	12,2	7,7	1,353
5	12	15,1	25,7	4,4	6,2	1,353
6	13	15,1	29	-	1,65x2	1,045
7	14	7,2	16,9	5,1	4,6x2	1,341
8	15	10	10	6,9	2,8x2	1,225

ром 6,5, 8, 9, 10 и 11мм и арматурные профили №8 и №10.

Для его модернизации, обеспечивающей расширение сортамента, увеличение массы заготовки (за счет увеличения ее сечения), а следовательно, и массы мотка до 2т, повышения точности прокатки фирмой "СКЕТ" (Германия) совместно с ИЧМ было разработано несколько вариантов реконструкции, но все они требовали для реализации значительных затрат.

Поскольку в современных условиях функционирование предприятия возможно только при условии его рентабельной работы, то в первую очередь было принято решение о строительстве на ОАО "ЕМЗ" МНЛЗ для исключения слиткового передела, что обеспечит существенное снижение себестоимости продукции. Причем было сразу решено создавать современную МНЛЗ с отливкой заготовок сечением 150x150; 120x120 и 100x100мм. Это и поставило задачу обеспечения возможности использования на стане 250 заготовок сечением 100x100мм с минимальным объемом необходимых технических мероприятий и затрат. С этой целью ИЧМ предложено использовать процесс прокатки-разделения [31, 32]. Особенностью процесса прокатки-разделения, разработанного ИЧМ, является то, что подготовка раската к разделению начинается в 5-й клетки черновой группы, а само разделение – после седьмой клетки стана с помощью специального неприводного деформирующе-делительного устройства (НДУ), установленного на выходной стороне клетки 7 и использующего резерв сил трения в ее (клетке) очаге деформации для дополнительного формоизменения раската с целью подготовки его к разделению. Существующая (а) и предложенная (б) схемы прокатки раската в черновой группе клетей стана 250 приведены на рис. 63, а на рис. 64 – калибровка валков черновой группы клетей.

На рис. 65 представлены параметры, полученные путем математического моделирования процесса прокатки катанки диаметром 8мм из стали Ст5. Из рис. 65 видно, что мощность прокатки до 4-й клетки одинакова для обеих схем, в 5-й клетки, где начинается подготовка профиля для разделения - увеличивается для новой схемы, а далее для новой схемы – ниже вплоть до 10-й клетки. В целом расчетная мощность прокатки на стане при традиционной схеме больше, чем по новой на 14,65%.

Боле высокая температура прокатки по новой схеме (см. рис. 65, б) объясняется тем, что при использовании заготовки сечением 100x100 мм раскат до момента разделения имеет большее сечение и прокатывается с большей скоростью, чем при ис-

Исходная заготовка
80x80мм
F=6772мм²

Исходная заготовка
100x100мм
F=9800мм²

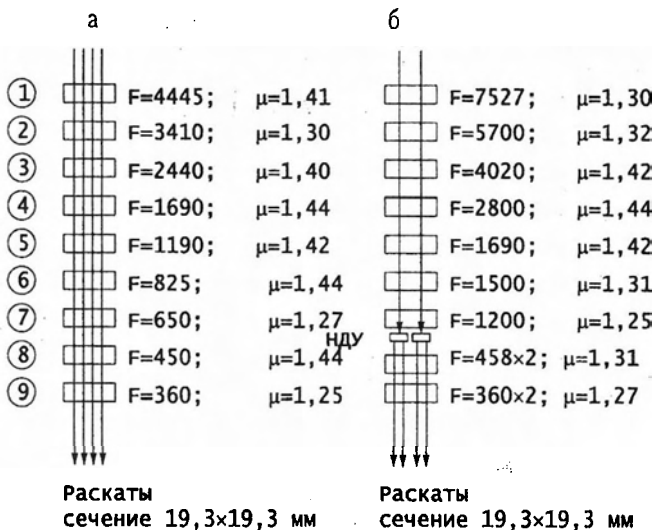


Рис. 63. Существующая (а) и предлагаемая (б) схемы прокатки раскатов в черновой группе клетей стана 250 ОАО "ЕМЗ". Цифры в кружках - номера клетей.

пользовании заготовки сечением 80x80 мм. Далее разность температур сохраняется. Снижение среднего сопротивления металла деформации при новой схеме прокатки объясняются изменившимся числом раскатов по ниткам, эффекта использования процесса прокатки-разделения и повышения температуры прокатки.

Выполнена оценка точности прокатки при использовании процесса прокатки-разделения. Установлено, что асимметрия раската не превышает допустимых норм.

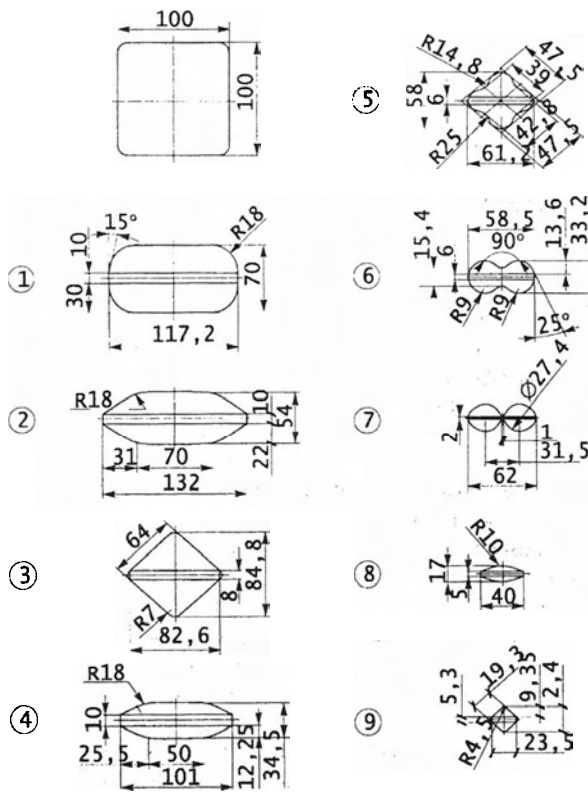


Рис. 64. Калибровка валков черновых клетей проволочного стана 250 ОАО "ЕМЗ" при использовании исходных заготовок сечением 100x100мм с применением процесса прокатки-разделения.

Проведены исследования процесса переработки катанки в проволоку на ОАО "Силур" (г. Харьковск). При этом по новой технологии была поставлена партия катанки диаметром 8 мм массой 55,7 т, а сравнительная партия (произведенная по традиционной технологии) – массой 58,2т. Входной

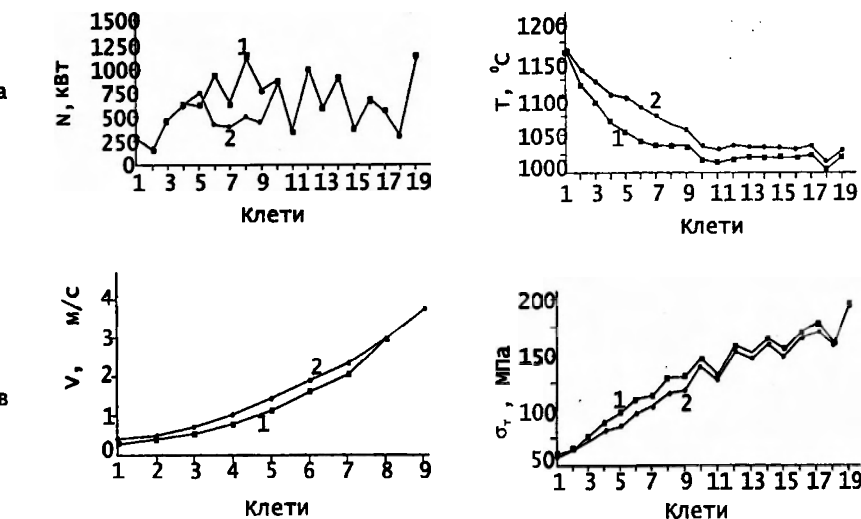


Рис. 65. Расчетные параметры прокатки по действующей (1) и разработанной (2) схемам: а - мощность прокатки; б - среднemasсовая температура раската на выходе из клетей; в - скорость прокатки в черновых клетях; г - среднее сопротивление металла деформации

контроль показал, что по физико-механическим испытаниям и химическому составу обе партии катанки соответствуют требованиям ASTM A510M-96 и ГОСТ 30139-95, а макро- и микроструктура катанки удовлетворительная. Переработка катанки на проволоку отличий между партиями не показала, а качество изготовленной проволоки соответствовало нормативным документам [33].

Таким образом, для стана 250 ОАО "ЕМЗ" разработана технология прокатки-разделения, используемая при производстве катанки с применением деформационно-разделяющего устройства, показана возможность ее использования и получены положительные результаты по качеству готовой продукции. Разработанная технология создает возможность перевода стана 250 на непрерывнолитую заготовку, что в конечном итоге способствует отказу на ОАО "ЕМЗ" от слиткового передела.

9. Перспективы применения процессов многоручьевой прокатки сортовых профилей и прокатки-разделения раскатов

Представленные в обзоре материалы позволяют прийти к следующим выводам.

Многоручьевая прокатка сортовых профилей предусматривает четыре группы способов разделения раскатов:

- 1) после прокатки в холодном состоянии;
- 2) непосредственно при прокатке в разделительных калибрах в приводных валках рабочих клетей стана;
- 3) с помощью автономных разделительных устройств с не приводным рабочим инструментом;
- 4) с помощью неприводных деформирующе-делительных устройств.

Первую группу способов рационально применять при прокатке несимметричных профилей. Разделение обычно производят с помощью различного типа установок огневой резки металла, реже – механической резки. Способ широкого распространения не получил.

Вторая группа способов реализована на обжимно-заготовочных и сортовых станах различного типа для производства заготовки и мелкосортных арматурных профилей.

"Слиттинг-процесс" (третья группа способов) продолжают активно использовать за рубежом, несмотря на ряд присущих ему недостатков. К ним в последние годы добавилось и то, что

при его использовании трудно достичь производительности 100т/ч при прокатке профилей малых сечений. На новейших прокатных станах стала обычной производительность 100-110т/ч. Дисбаланс производительности при прокатке меньших и больших сечений проката вызывает не только потерю эффективности использования прокатного стана, но и вызывает трудности в реализации технологии горячего посада заготовки, а также

прямой прокатки. Одним из способов преодоления дисбаланса производительности прокатного стана авторы работы [34] видят в многоручьевой (более чем трехручьевой) прокатке-разделении. В частности достичь производительности 100т/ч можно при четырехручьевой прокатке-разделении. Принципиальная схема такого процесса и реализующая его технология разработаны фирмой "Ниппон кокан". Технология внедрена на трех станах в США, Южной Корее и Египте. В дальнейшей перспективе возможны пяти и шестиручьевые процессы прокатки-разделения. Подчеркивается, что в основном, процесс будут применять при производстве арматурных профилей малых размеров.

Четвертая группа способов является существенным усовершенствованием "слиттинг-процесса". При его реализации неприводное деформирующе-делительное устройство кроме функции разделения имеет еще и функцию формоизменения раската за счет использования сил трения в очаге деформации, стоящей перед ним клетей, то-есть выполняя часть работы приводных рабочих клетей без увеличения расхода энергии. В частности этот способ применен на стане 250 ОАО "ЕМЗ" при производстве катанки.

Актуальность дальнейшего развития и использования процесса прокатки-разделения подтверждается тем, что доля профилей мелких сечений проката составляет более 50% [35].

9.1. Производство сортовой заготовки из непрерывнолитого металла

Продолжает оставаться актуальным процесс прокатки-разделения и на обжимных станах, что обусловлено главным образом необходимостью устранения дефицита сортовой заготовки.

Так, в работе [34] предложено получать сортовую квадратную заготовку из непрерывнолитых слябов в валках блюминга. На основе выполненных исследований рекомендовано разработанную технологию применять для получения блюмов и заготовок, предназначенных для производства фасонных и круглых профилей из стали обыкновенного качества.

Процесс многоручьевой прокатки непрерывнолитого металла при производстве сортовой заготовки сечением 125x125 мм реализован на обжимном стане 850 Белорусского металлургического завода. Внедрение процесса строенной прокатки-разделения на этом же стане позволило дополнительно улучшить качество проката ответственного назначения (металлокорда, канатной проволоки и пр.) за счет выделения средних заготовок всей плавки в отдельную партию и переназначения их на менее ответственные заказы [35].

9.2. Совершенствование процесса многоручьевой

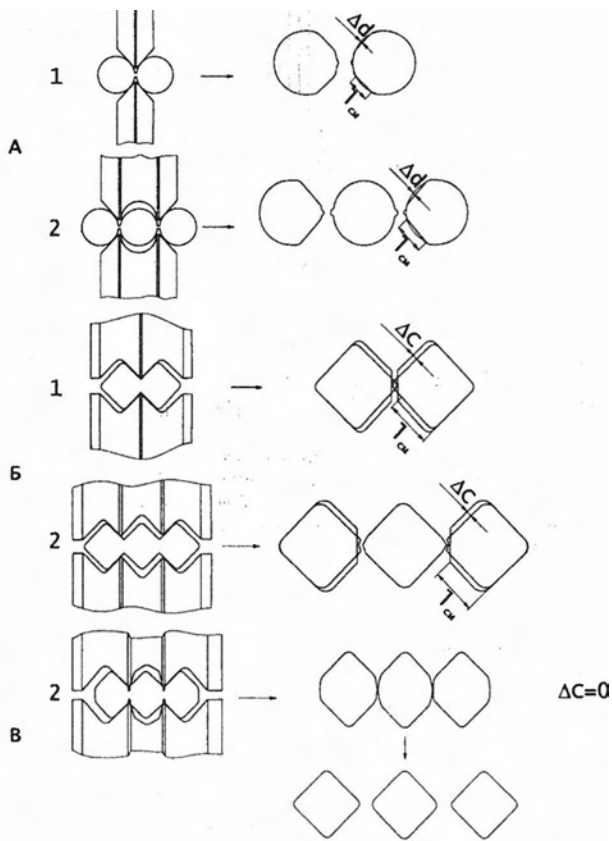


Рис. 66. Схемы разделения при двухручьевой (1) и трехручьевой (2) прокатке-разделении: А - неконтролируемым разрывом перемычки; Б - контролируемым разрывом перемычки; В - по новому способу: ΔC - длина зоны смятия поверхности раската.

прокатки-разделения

Накопленный опыт применения процесса многоручьевой прокатки-разделения позволил установить, что способ разделения многониточного раската разрывом тонкой перемычки обеспечивается путем создания растягивающих напряжений в результате взаимного смещения соединенных заготовок в поперечном направлении под действием осевых сил.

Основным недостатком этой модификации разрыва является низкая стойкость валков в формирующем калибре из-за наличия острых гребней в зоне разделения. Вторым недостатком заключается в искажении круглой формы отделенных заготовок при сжатии их роликами на величину Δd (см. рис. 66 А). При разделении трехниточного раската крайние и средняя нитки могут иметь различную площадь поперечного сечения из-за искажения формы крайних ниток.

Для способа контролируемого разрыва характерно формирование квадратных, шестиугольных или близких к ним по форме заготовок, соединенных толстыми перемычками в валках с углом гребней близким или равным 90° . Это улучшает износоустойчивость гребня формирующего калибра.

Основным недостатком этого способа является необходимость использования приводных валков в разделяющем пропуске, работающих примерно с 5-10% нагрузкой на привод. Форма отделяемых квадратных раскатов практически не изменяется, изменяется лишь размер стороны квадратов на величину ΔC (см. рис. 66 Б1 и Б2). Это изменение размера заготовок, приводящее к разнице площадей крайних и средней заготовках (при трехручьевой прокатке) необходимо учитывать при проектировании калибров.

В НПО "Доникс" разработан гибридный способ прокатки-разделения, сочетающий элементы и преимущества описанных выше модификаций [36]. Он состоит в формировании многони-

точного раската с относительно толстыми перемычками в приводных валках, локальной деформации перемычек в промежутке между формирующим и разделяющим пропусками и последующем разделении раската в неприводных роликах или приводных валках в зависимости от объекта применения (см. рис. 66 В). Для нового способа разделения квадратных заготовок характерно практическое отсутствие изменения размеров сторон заготовки. Причем способ можно использовать как при малых диаметрах роликов делительных устройств, так и в обычных приводных валках.

На основе анализа силового взаимодействия раската с валками в очаге деформации разделяющего калибра получена математическая модель процесса разделения, позволяющая определять условия разрыва перемычки, параметры формоизменения и размеры раската после разделения. Это является базой для разработки методики расчета оптимальной формы и размеров специальных многоручьевых калибров, используемых при прокатке-разделении.

В ИЧМ разработано техническое предложение по организации и освоению производства арматурных №14 и №16 и угловых $70 \times 70 \times 6-7$ мм профилей с использованием процесса прокатки разделения раската в потоке стана 550-2 ОАО "Днепропетровский металлургический завод им. Петровского" [37]. Схема расположения основного оборудования участка печей и непосредственно стана показана на рис. 67.

Стан 550-2 предназначен для производства сложных фасонных профилей проката для авто- и сельхозмашиностроения, а также сортовых и периодических профилей проката. Заготовка поступает с рельсобалочного стана 800. Для нагрева заготовок имеется две методические печи с шагающими балками. Топливо - природный газ.

В качестве базового был принят вариант трехручьевой прокатки-разделения арматурного профиля №16 из квадратной заготовки сечением 100×100 мм. Подготовка трехручьевого раската к разделению должна быть закончена в клетях №5, а за ней устанавливается неприводное деформирующе-разделительное устройство. Выпускающей клетью принята клеть №7, что позволяет уменьшить падение температуры раската. Перед клетью №7 устанавливается трехручьевой трайбаппарат, снабженный со стороны выхода тремя кантующими роликовыми проводками. Клетки №6 и №7 оснащаются комплексами вводной и выводной трехниточной привалковой арматуры. Из клетки №7 на рольганг поступает пакет из трех полос длиной 37-38 м.

По аналогичной схеме может быть организована прокатка арматурных профилей больших размеров, а также арматурного профиля №14. Прокатка арматурных профилей меньших размеров потребует применения четырехручьевого процесса прокатки-разделения, либо уменьшения сечения исходной заготовки, что повлечет за собой ряд негативных последствий.

Предложение по организации и освоению производства равнополочного уголка $70 \times 70 \times 6-7$ мм с использованием процесса двухручьевой прокатки-разделения намечено вместо производства такого уголка по технологии действующей в настоящее время односторонней прокатки.

Формирование сдвоенного профиля раската и подготовка его к продольному разделению осуществляется в клетях №2, №4 и №5. Продольное разделение сдвоенного раската производится с помощью неприводного деформирующе-делительного устройства, устанавливаемого на выходе из клетки №5. Последующую прокатку в клетях №6-8 осуществляют в две нитки по действующей на стане 550-2 калибровке валков. Заготовка может быть либо прямоугольного (например 72×194 мм), либо фасонного сечения с параметрами, обеспечивающими центровку полосы и равномерную деформацию в калибре клетки №2.

Расчеты показали, что ограничений по нагреву заготовок, температурно-скоростным и энергосиловым параметрам прокат-

ки нет, так как полоса из двух уголков 70x70x6мм по массе погонного метра и режиму деформации близка к условиям прокатки швеллера 16П, производимого на стане 550-2, что капитальных затрат для дооснащения стана в связи с освоением на нем двухручье-вой прокатки-разделения уголков не потребует. Дооснащение же будет состоять в изготовлении делительных устройств с комплек-сом запасных частей и быстро изнашиваемых элементов; центральных разделительных бортов для рольгангов между клетями №№6-7 и 7-8, а также на других участках транспортирования пакета из двух уголков на участке от клетки №8 до холодильников; новых элементов привалковой арматуры скольжения. Общая стоимость затрат не превышает 20-30тыс. гривен.

Эффективность использования процесса двухручье-вой прокатки-разделения угловых профилей обеспечивается снижением себестоимости производства за счет увеличения часовой производительности стана в части сортамента уголков малого сечения за счет снижения условнопостоянной части расходов по переделу; а также за счет снижения энергозатрат на прокатку и расхода валков в клетях, предшествующих разделению. Кроме этого, становится целесообразной прокатка уголков меньших сечений, возможным использование заготовки увеличенного сечения, что обычно приводит к дополнительному снижению себестоимости производства проката, за счет снижения угара металла при нагреве.

При реализации описанных предложений будут созданы предпосылки для повышения рентабельности производства проката на стане 550-2, а следовательно, повышения конкурентоспособности продукции на рынке металлопроката.

При реализации описанных предложений будут созданы предпосылки для повышения рентабельности производства проката на стане 550-2, а следовательно, повышения конкурентоспособности продукции на рынке металлопроката.

9.3. Применение процесса прокатки-разделения при реконструкции проволочных и мелкосортных станов

Способ многоручье-вой прокатки-разделения позволяет переоборудовать мелкосортные станы на прием заготовки большего сечения и массы с минимальными затратами.

Так, если на мелкосортных станах КГМК "Криворожсталь" использовать непрерывнолитую заготовку сечением 150x150мм вместо 80x80мм, ее исходное сечение возрастает в 3,5 раза, а для условий проволочного стана 250 ОАО ЕМЗ с заготовки сечением 80x80мм на заготовку сечением 125x125мм – в 2,44 раза. Это потребует коренного изменения схемы расположения оборудования стана 250, причем наиболее логичным вариантом становится установка дополнительных клетей.

Сотрудниками ИЧМ предложены и проанализированы четыре варианта реконструкции мелкосортного стана 250, показанные на рис. 68 [38].

Вариант I. Перед существующей клетью №1 черновой группы располагают четыре дополнительных клетки А, Б, В, Г, в которых производят двухниточную прокатку. Расстояние между клетями А и Б; Б и В – по 3750мм, между клетями В и Г; Г и 1 – по 3500мм, то есть всего 14, 5м. Это позволяет разместить группу клетей предварительного обжатия на существующей площадке стана 250.

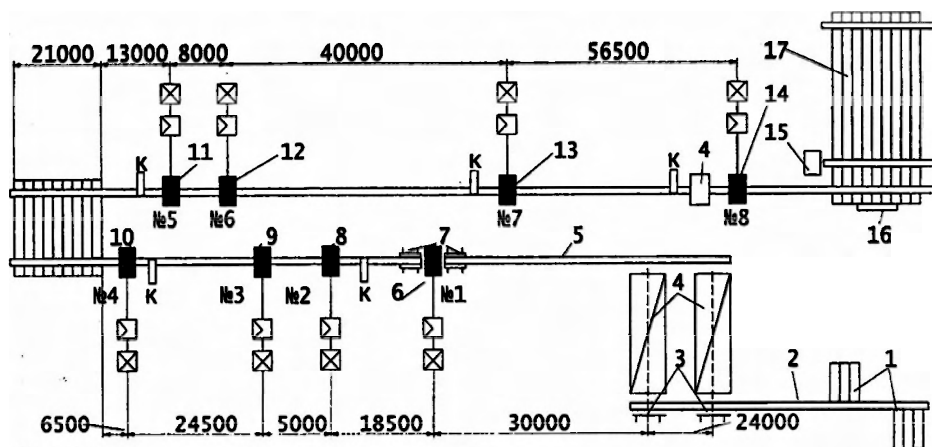


Рис. 67. Схема расположения основного технологического оборудования участка печей и непосредственно стана 550-2: 1 - загрузочные устройства; 2 - загрузочный рольганг; 3 - сталкиватели; 4 - нагрева тельные печи; 5 - приемный рольганг; 6 - обжимная реверсивная клеть дуо; 7 - кантователи-манипуляторы; 8-13 - рабочие неререверсивные клетки дуо с предварительно напряженными станинами; 14 - рабочая неререверсивная клеть дуо периодической прокатки; 15 - пила горячей резки для отбора проб; 16 - переключивающее устройство; 17 - холодильник; К - кантующие валки.

производят в две нитки. Общая длина головной части стана (вновь устанавливаемые клетки, термостат и существующая черновая семиклетевая группа) составляет 52м. Новое оборудование также размещается на имеющейся площадке, но его масса существенно увеличивается по сравнению с вариантом I.

Вариант III. В дополнение к варианту II за клетью А устанавливают неприводную клеть с горизонтальными валками, а за клетью В - две неприводных клетки с вертикальными валками. В этом случае клеть Г не устанавливают, но заменяют линию привода существующей рабочей клетки №1 и сам привод на более мощный (680 кВт), перераспределяют нагрузки между существующими клетями черновой группы. Следует отметить, что в первых двух вариантах реконструкции никаких изменений в существующей черновой группе клетей не происходит. Общая длина головной части стана составит 49м, масса оборудования по варианту III меньше, чем по варианту II, но больше, чем по варианту I, несмотря на то, что масса неприводной клетки составляет 0,3-0,4 массы приводной клетки (без учета массы оборудования линии главного привода приводной клетки).

Вариант IV. В основу варианта положены два новых для стана 250 технологических решения: использование неприводных рабочих клетей и применение процесса прокатки-разделения. Вариант IV предусматривает использование однониточной прокатки в клетях №№1-7 существующей черновой группы и клетях №№8 и 9 промежуточной группы, установку четырех неприводных клетей с вертикальными валками и процесс прокатки-разделения после клетки №9 с использованием неприводного деформационно-делительного устройства (см. рис. 68). В клетях №№10 и 11 производится двухниточная прокатка со скоростями, соответствующими существующим. Общая длина головной части стана с вновь устанавливаемым оборудованием не изменяется по сравнению с существующей схемой, общая масса оборудования по сравнению с действующей схемой увеличивается незначительно.

Авторами работы выполнен сравнительный анализ предложенных вариантов реконструкции [39]. Исходными были приняты: сечение заготовки 150x150мм; скорость прокатки в чистой клетке 18м/с. Расчеты выполнены для условий прокатки арматурных периодических профилей №12 и №16.

Расчеты показали, что при реализации варианта I температура прокатки в клетях 1-7 снижается почти на 150°C против существующего режима, что приводит к перегрузке по мощности главного привода рабочей клетки 4, по моменту прокатки – клетей №2 и №3. Следовательно для реализации этого варианта необходима реконструкция практически всех клетей черновой

Вариант II.

Перед черновой группой клетей устанавливают отдельно стоящую двухклетевую однониточную непрерывную группу клетей с выдачей раската в подогреваемый термостат. Непосредственно перед существующей черновой группой клетей устанавливают две клетки с горизонтальными валками, в которых прокатку

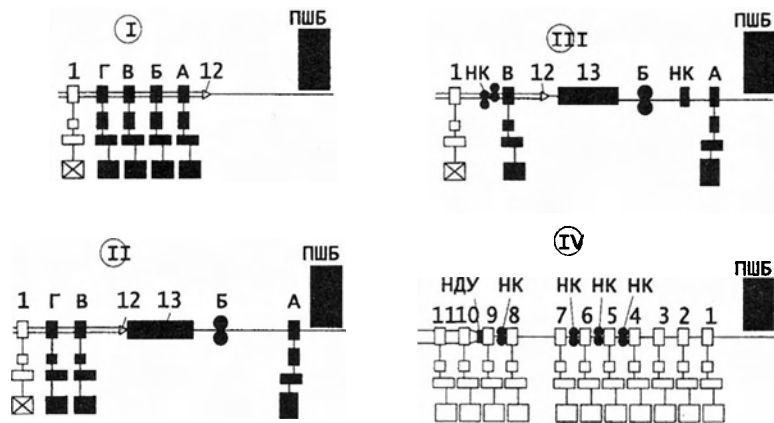


Рис. 68. Схема расположения оборудования головной части стана 250 по вариантам реконструкции I-IV: 1+11 - существующие клетки; 12 - переводная стрелка; 13 - термостат; ПШБ - нагревательная печь с шагающими балками; А + Г - дополнительные приводные клетки; НДУ - неприводное делительное устройство; НК - неприводные клетки. Предлагаемое к установке дополнительное оборудование показано заливкой.

группы. При реализации варианта II снижение температуры в клетях №№1-7 составляет более 100°С и это несмотря на наличие термостата. Вариант реконструкции III характеризуется падением температуры в черновой группе клеток несколько ниже 100°С против существующего температурного режима. Загрузка электродвигателей главного привода клеток №№2, 5 и 6 увеличивается, но это может быть устранено перераспределением обжатий по клетям черновой группы. Расчеты показали, что при реализации IV варианта сохраняется нормальная нагрузка существующих черновых клеток и их приводов. То есть этот вариант наиболее рационален.

В ППО "Донец" разработан также вариант, предусматривающий реконструкцию стана 250-4 КГГМК "Криворожсталь" на основе применения технологии двухкратной двухручьевой прокатки-разделения в клетях №9 и №15. Схема этого варианта показана на рис. 69 [40].

Исходя из анализа скоростных режимов и энергозатрат, определенным с учетом температурно-скоростных и деформационных режимов прокатки стали 35ГС, установлено, что существующие приводы всех клеток стана 250-4 практически удовлетворяют условиям по прочности и мощности электродвигателей. Удельные энергозатраты на прокатку по этому варианту на 12-18% ниже, чем по вариантам I и II (см. рис. 68).

Анализ условий работы ножниц, установленных за черновой группой клеток, показал, что в связи с повышением температуры раската до 1100°С и снижением скорости прокатки в клетки 7 до 1,5 м/с сила реза при обрезке концов раската снижается до 0,15 МН с одновременным понижением требуемой мощности электродвигателя, обеспечивая возможность порезки сечений раската до 5000мм². Основным недостатком предлагаемого варианта является жесткая связь обеих ниток прокатки, что приводит к повышению общего времени простоев стана при сбоях на любом участке технологического потока.

Анализ простоев стана МС 250-4 КГГМК "Криворожсталь" показал, что с учетом упрощения процесса прокатки в черновой группе клеток (одна нитка вместо двух), повышения простоев всего стана по причине бурений по одной из ниток и снижения простоев стана путем организации одновременных переходов с калибра на калибр на обеих нитках, общий рост времени простоев может составить 30-50%. Однако при повышении среднечасовой производительности на 30% с внедрением технологии двухкрат-

ной прокатки-разделения, обеспечивающей скорость прокатки на клетки 12 примерно 15м/с, объем производства повысится на 20-25%.

Таким образом при использовании этого варианта реконструкции обеспечиваются следующие преимущества:

- не требуется установка новых дополнительных клеток перед или в черновой группе клеток, ухудшающая температурный режим прокатки;
- обеспечиваются минимальные капитальные затраты на реконструкцию участка прокатки;
- обеспечивается существенная экономия энергозатрат при прокатке за счет использования технологии двухкратной прокатки-разделения.

Однако, наилучшим по эффективности вариантом реконструкции стана 250 является вариант, не требующий изменения технологических потоков на сортовом переделе и максимально использующий существующее оборудование комбината. Это вариант частичного использования оборудования обжимно-заготовочного передела (НЗС) для переката непрерывнолитой заготовки на требуемые размеры. В условиях КГГМК "Криворожсталь" воплощение этого варианта может выглядеть следующим образом.

МНЛЗ первой очереди строительства будет иметь три кристаллизатора с размерами, соответствующими непрерывнолитой заготовке сечением 250x390мм. Обеспечение мелкосортных и проволочных станов заготовкой 150x150 и 80x80мм может осуществляться существующими НЗС, перекатывающими непрерывнолитую заготовку по традиционной технологии. Причем производство заготовок сечением 80x80мм целесообразно осуществлять на НЗС с применением технологии прокатки-разделения.

Внедрение этого варианта реконструкции позволит:

- снизить энергозатраты на производство заготовок мелких сечений, так как чистовая группа клеток НЗС-1 (6 клеток с мощностью электродвигателей 3 по 1180 кВт и 3 по 1800 кВт) выводится из производственного цикла. Это позволит экономить до 30% затрат электроэнергии при производстве заготовок 80x80мм из слитков и примерно 70% затрат электроэнергии – из непрерывнолитой заготовки сечением 250x390мм при выведении из эксплуатации блюминга №1;
- уменьшить парк валков и их расход на тонну годного за счет вывода из эксплуатации чистовых групп клеток НЗС-1 и НЗС-2.

Таким образом, применение технологии прокатки-разделения на трех участках технологической линии (при производстве заготовки сечением 80x80мм на НЗС и прокатке арматурных профилей и разделении раската сначала в промежуточной, а потом в чистовых группах клеток) позволяет перевести действующие мелкосортные станы на непрерывнолитую заготовку увеличенного сечения.

Практика показывает, что с одной стороны, применение

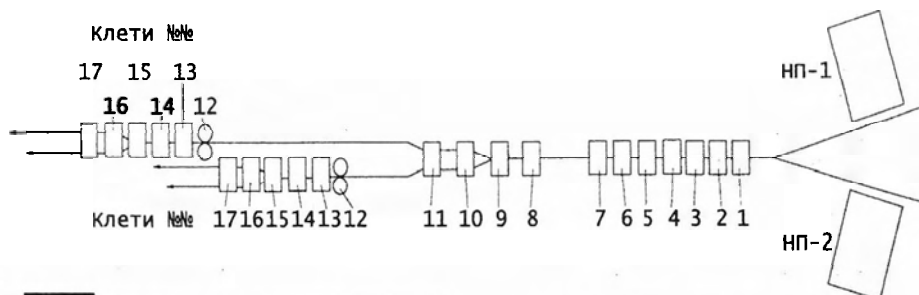


Рис. 69. Схема варианта с применением технологии двухкратной двухручьевой прокатки-разделения: 1+17 - рабочие клетки; НП-1 и НП-2 - нагревательные печи стана 250.

процесса прокатки-разделения целесообразно на действующих мелкосортных станах с относительно низкой скоростью прокатки, а с другой стороны, его реализация требует согласования имеющихся технологических условий прокатки с имеющимися характеристиками оборудования конкретного стана и пропускной способности отдельных его участков.

В связи с этим в НПО "Доникс" с использованием разработанных математических моделей и опыта реализации процесса прокатки-разделения рассчитаны скоростные, температурные и энергосиловые параметры условий прокатки арматурных профилей №№12, 14, 16 на условном девятнадцатиклетевом стане 300 [41].

На рис. 70 показана схема расположения основного оборудования стана 300. Расстояние между промежуточной и чистой группами для левой нитки в 2,5 раза больше, чем для правой. В качестве исходной заготовки при расчете использовали квадрат со стороной 95мм.

Приняли, что при одноручевой прокатке арматурные профили №№14 и 16 получают за 17 проходов с двумя холостыми пропусками в клетях №16 и №17 и выпуском их из клетки №19 со скоростью 15м/с. Рассмотрены варианты прокатки с разделением на две нитки в промежуточной а и чистой 6 группах клетей. В варианте а предусмотрены разделение раската в клетях 9 и выпуск готового профиля из клетки №15, в варианте б – холостые проходы в вертикальных клетях №14 и №16, разделение раската в клетях №17 и выпуск готового профиля из клетки №19.

Анализ эффективности многоручевой прокатки-разделения в зависимости от места разделения и профилеразмера проведен с точки зрения повышения температуры конца прокатки, снижения удельных энергозатрат и вторичного окисления при многоручевой прокатке-разделении по сравнению с соответствующими параметрами одноручевой прокатки.

Расчеты показали, что при использовании многоручевой прокатки-разделения повышение температуры конца прокатки составляет 5-6%, что соответствует 40-70°C, причем на меньших профилеразмерах эта величина больше. Удельные энергозатраты при использовании многоручевой прокатки-разделения со скоростью одноручевой прокатки уменьшаются на 20-34% и зависят от положения разделяющего пропуска и профилеразмера. Разделение раската в промежуточной группе клетей по сравнению с чистой менее эффективно по удельным энергозатратам (на 4-7%). Кроме того, организация двухниточной прокатки в четырех клетях чистой группы с чередующимися горизонтальными и вертикальными клетями усложняет работу стана. И, наконец, изменение положения выпускающего прохода приводит к необходимости существенного изменения скоростного режима в соответствующей клетке, что может способствовать перегрузке привода. Вторичное окисление при использовании многоручевой прокатки-разделения при постоянной кратности снижается на 61-62% независимо от профилеразмера и положения разделяющего пропуска.

Расчеты показали, что при переносе многоручевой прокатки-разделения в правую чистовую нитку, клетки которой расположены ближе к промежуточной, характер изменения показателей эффективности ни качественно, ни количественно не изменяется.

В результате проведенных исследований отмечены два факта: применение процесса многоручевой прокатки-разделения эффективно и его целесообразнее всего применять в чистой группе клетей.

Заклучение

В мире используют процесс прокатки-разделения раскатов как при производстве заготовок, так и готового проката, причем особенно широко – сортового. За рубежом для этой цели применяют "слиттинг-процесс", который пока характеризуется рядом недостатков:

- наличие шейки разрыва перемычки в месте разделения раската ухудшает качество готового проката;
- низкая стойкость формирующего калибра;
- наличие разделяющего устройства сложной конструкции;
- низкая стойкость разделяющих клиновидных роликов;
- низкая продольная устойчивость раската перед разделяющим устройством;
- сложность регулировки вводной привалковой арматуры.

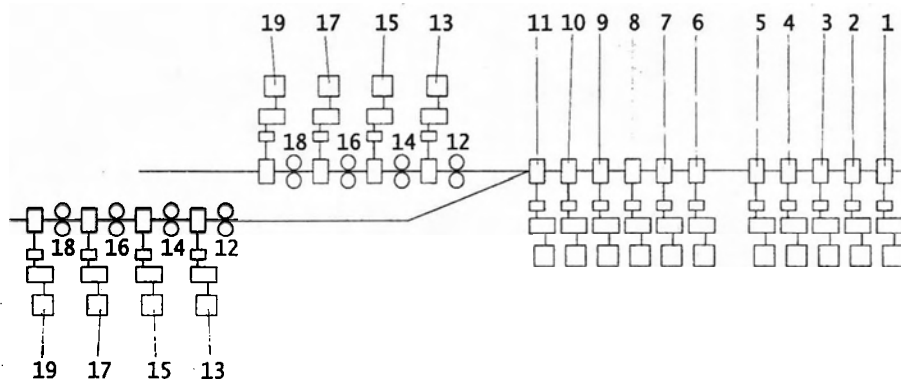


Рис. 70. Схема расположения основного оборудования стана 300 (цифры - номера клетей).

В Донецком политехническом институте (ныне Донецкий национальный технический университет) разработан новый ресурсосберегающий технологический процесс прокатки-разделения раскатов, заключающийся в формировании в многоручевых калибрах рабочих валков прокатного стана раската, состоящего из нескольких заготовок любой простой формы поперечного сечения, соединенных вдоль одной из осей относительно толстой перемычкой. Продольное разделение такого многониточного раската осуществляется в разделяющем калибре прокатных валков, при этом центрирование двухниточного раската обеспечивается гребнями этого калибра.

В процессе теоретических и экспериментальных исследований разработаны и исследованы различные способы продольного разделения многониточных раскатов. Впервые получены математические модели для определения оптимальных размеров перемычек и формы совмещенных заготовок, которые позволяют производить проектирование и прогнозирование технологии и калибровок валков для различных условий прокатных станов.

Впервые трехручевая прокатка-разделение квадратной заготовки из блюмов была освоена на линейном крупносортном стане 850 ОАО "Макеевский металлургический комбинат", а двухручевая прокатка-разделение квадратной заготовки из блюмов – на линейном стане того комбината. Достигнуто повышение производительности станов на 10-15%. Эти первые исследования впервые в мире позволили установить принципиальную возможность и эффективность нового способа прокатки-разделения, что создало техническую и психологическую базу для дальнейшего выполнения работ и исследований.

Технология трехручевой прокатки-разделения с локализацией зоны физикохимической неоднородности в средней заготовке была освоена в 1986г. на обжимно-заготовочном стане 950/900 ОАО ДМЗ совместно с непрерывным литьем слитков прямоугольного сечения при производстве подшипниковых сталей, что значительно расширило сортамент МНЛЗ.

Двухручьева прокатка-разделение была реализована на следующих мелкосортных станах:

- 300/280 Омутнинского металлургического завода;
- 250 Нижне-Сергенского металлургического завода;
- 280 ОАО "Енакиевский металлургический завод".

Начиная с 1985 г. ДонНТУ, при активном участии НПО "Доникс" осуществляется разработка, исследование и освоение технологии двухручьевого прокатки-разделения на основе новых способов продольного разделения раската в прокатных валках на высокопроизводительных непрерывных мелкосортных станах Криворожского государственного горно-металлургического комбината "Криворожсталь". Технология двухручьевого прокатки-разделения реализована на станах:

- 250-1 при производстве арматурного профиля №8;
- 250-3 при производстве арматурного профиля №10;
- 250-4 при производстве арматурного профиля №12.

Установлено увеличение производительности станков на 30%, снижение удельных энергозатрат на 20-30%, удельного расхода валков на 20-30%, удельного расхода условного топлива на 10-30%, уменьшено окалинообразование. Макроструктура металла в поперечных сечениях промежуточных раскатов и готовых арматурных профилей, полученных по новой технологии характеризуются плотным строением. Механические свойства готового проката, полученного одноручьевого прокаткой и двухручьевого прокаткой разделением близки друг к другу и соответствуют требованиям нормативно-технической документации.

Институтом черной металлургии им.З.И. Некрасова НАН Украины разработан, исследован и освоен процесс прокатки-разделения при производстве катанки на непрерывном проволочном стане 250 ОАО "Енакиевский металлургический завод". Особенностью процесса является разделение раската в черновой группе клетей с помощью специального деформирующе-делительного устройства. В деформирующе-делительном устройстве за счет использования резерва сил трения в очаге деформации предыдущей прокатной клетки осуществляется дополнительное формоизменение сечения раската и его продольное разделение в линии стана без дополнительного расхода энергии. Перенос части общей деформации металла в неприводное устройство позволяет повысить стойкость формирующих калибров и разделительных роликов деформирующе-делительного устройства, а также создавать в месте разделения перемычку необходимой конфигурации и толщины. Разработанная технология позволя-

ет увеличить сечение исходной заготовки, что особенно актуально в связи с пуском на ОАО ЕМЗ МНЛЗ, и при этом снизить почти на 15% расход энергии на прокатку.

Технология прокатки-разделения, разработанная в ИЧМ, реализована на непрерывных мелкосортных станах Запсибметкомбината и мелкосортно-проволочных станах 320/150 Белорусского и Молдавского металлургических заводов.

В ИЧМ разработаны также предложения по организации процесса прокатки-разделения на стане 550 ОАО "Днепропетровский металлургический завод им. Петровского" при производстве угловых и арматурных профилей.

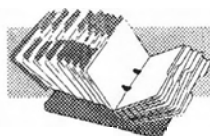
ИЧМ, НПО "Доникс" и ДонНТУ предложено применять процесс прокатки-разделения при реконструкции мелкосортных и проволочных станков, что позволит использовать на стане заготовки большего сечения и массы с минимальными затратами.

Таким образом, разработан пакет технологий производства сортовой заготовки на непрерывных, линейных и реверсивных станах, сортовых профилей на непрерывных, полунепрерывных, линейных и других типах станков из рядовых, низколегированных и легированных марок стали. Процесс прокатки-разделения является постоянной технологией производства арматурных профилей на станах 250-1, 250-3 и 250-4 КГГМК "Криворожсталь". По этой технологии на 1 января 2003г. прокатано более 8 млн. т арматурных профилей. Экономический эффект по КГГМК "Криворожсталь" за годы применения процесса прокатки-разделения (1995-2002) составил 87,7 млн. гривен.

Разработана программа расширения внедрения ресурсосберегающего процесса прокатки-разделения на прокатных станах Донецкой и Днепропетровской областей на период 2003-2005гг.

На технологию в целом, ее элементы и устройства ее обеспечивающие получено около 200 авторских свидетельств и патентов СССР, Украины, Белоруссии, Великобритании, Канады. Лицензии на право использования двухручьевого прокатки-разделения проданы в Германию и Кубу.

Результаты теоретических и промышленных исследований и освоение процесса многоручьевого прокатки-разделения представлены в трех монографиях и более, чем в 100 печатных работах, обсуждены на научно-технических конференциях, семинарах, совещаниях, состоявшихся в Украине, России, Германии, Турции, Швеции.



ЛИТЕРАТУРА

1. Теория и практика непрерывного литья заготовок/ А.Н.Смирнов, А.Я.Глазков, В.Я.Тимошенко и др. - Донецк: ДонНТУ, ООО "Лебедь", 2000. — 364с.
2. Кан Ю.Е., Кугушин А.А. Проблемы производства сортового проката из непрерывнолитых заготовок// Сб. "Труды второго конгресса прокатчиков" - М.: АО "Черметинформация", 1998. — С.303-306.
3. Бахтинов Ю.Б. О путях совершенствования производства сортовых заготовок// Производство проката. — 2000. - №2. С.14-19.
4. Процесс прокатки с продольным разделением непрерывнолитых слябов в обжимной клетке// В.Г.Логинов, А.В.Титов, О.Тулупов и др.// Труды IV конгресса прокатчиков. - М.:АО "Черметинформация".-2002.-С.253-255.
5. Чижиков Ю.М. Редуцирование и прокатка металла непрерывной разливки. — М.: Металлургия, 1974. — 384с.
6. Особенности реализации процесса прокатки-разделения на обжимном стане// А.Н.Бондаренко, В.В.Филиппов, В.А.Тищенко и др.// Металлургическая и горнорудная промышленность.-2002.-Сентябрь.-С.267-270.
7. Следнев В.П. Спаренная прокатка сортовых профилей. — М.: Металлургия, 1988. — 168с.
8. Boubli H, Oklitz R/ Advanced concepts and technologies for bar mills// MPT. — 1996. — June. — P.64-74.
9. Anmerling W., Muller H. Current development in merchant bar and medium section mills// Metallurgical Plant and Technology. — 1984. - №5. — P.46-48.
10. Canadians license bar — slitting technology// Iron and Steel international. — 1978. — V.51. - №1. — P.13.
11. Saton R. The rolling of bar products using the slit-rolling process// Nippon Konan Technical Report. — 1980. - №30. — P.42-46.
12. Fudguta J., Okado M., Hirchi M. Etal — "Metec" 84/Int Walzwerscongress. Dusseldorf 22-24 Juni. — 1984. — Bd 1 "Dusseldorf" A 3/1. — A 3/14.
13. Boubli H, Oklitz R/ Advanced concepts and technologies for bar mills// MPT. — 1996. — June. — P.64-74.
14. Освоение технологии прокатки-разделения арматурной стали на непрерывном мелкосортном стане 320/150/ А.П.Лохматов, С.М.Жучков, Л.В.Кулаков и др.// Бюл. НТИ "Черная металлургия". — 1989. - №1. — С.66-68.

15. Непрерывный мелкосортно-проволочный стан 320/150 Белорусского металлургического завода/ А.П.Лохматов, С.М.Жучков, В.А.Токмаков и др.// Сталь. – 1987. - №7. – С.41-46.
16. Jahr A., Schxssler V.E. Innovation in rolling mill guides// MPT. – 1996. - ?3. – P.46-48.
17. Matsumiya K., Kumagai K., Shinomoto I. Outline of high productive by rolling mill for steel bar// Kobe Steel Engineering Report. – 1985. – V.35. - №2. – P.58-62.
18. Многооручевая прокатка-разделение// В.М.Клименко, С.П.Ефименко, В.Ф.Губайдулин, Г.М.Шульгин. — М.: Металлургия, 1987. — 168с.
19. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. — М.: Наука, 1969, — 420с.
20. Пластичность и разрушение/ Под редакцией В.Л.Колмогорова. — М.: Металлургия, 1977. — 336с.
21. Прокатка сортовой заготовки с разделением многооручевым способом/ В.М.Клименко, Г.М.Шульгин, А.К.Пеленов и др.//Черная металлургия. Бюл. Ин-та "Черметинформация", 1981- №1. – С.45-46.
22. Опытнo-промышленное исследование многооручевой прокатки/ В.М.Клименко, Ю.М.Чуманов, В.Ф.Губайдулин и др.//Сталь.-1979.-№9.-С.687-689.
23. Исследование качества готовой продукции, полученной методом многооручевой прокатки из непрерывнолитых слябов/ Ю.М.Чуманов, В.Ф.Губайдулин, Г.М.Шульгин и др.// Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1979. - №2. – С.15-16.
24. Технология многооручевой прокатки на обжимно-заготовочном стане/В.М.Клименко, В.Ф.Губайдулин, Г.М.Шульгин и др.//Сталь.-1982.-№7.-С.41-44.
25. Губайдулин В.Ф., Клименко В.М., Кукуй Д.П. Методика оценки формоизменения металла при многооручевой прокатке// Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1987. - №6. – С.150-151.
26. Повышение качества сортового проката из непрерывнолитой заготовки стали ШХ15/ В.И.Листопад, В.М.Паршин, В.П.Следнев, В.Ф.Губайдулин// Сталь. – 1988. - №8. – С.23-24.
27. Исследование качества сортового проката из слитков стали ШХ-15, отлитых на УПНРС/ В.И.Листопад, О.Д.Монич, В.Ф.Губайдулин, Е.Ф.Яковлева// Сталь. – 1985. - №1. – С.30-31.
28. Производство арматурной периодической стали методом двухоручевой прокатки-разделения/ Г.М.Шульгин, И.И.Овсюк, В.И.Руденко и др.// Черная металлургия. – 1985. - №17. – С.56-57.
29. Производство арматурной стали на Криворожском металлургическом комбинате "Криворожсталь" двухоручевой прокаткой-разделением/ Г.М.Шульгин, А.А.Минаев, В.Ф.Губайдулин и др.// Металл и литье Украины. – 1997. - №5. – С.22-26.
30. Двухоручевая прокатка-разделение арматурной стали мелких сечений на КГТМК "Криворожсталь"/ Г.М.Шульгин, Д.П.Кукуй, А.Г.Маншилин и др.// Металл и литье Украины. – 2000. - №5-6. – С.42-43.
31. Применение нетрадиционных технических решений при прокатке на сортовых станах заготовок увеличенного сечения// С.М.Жучков, Э.В.Сивак, И.И.Букреев и др.// Сталь. – 2001. - №1. – С.39-42.
32. Освоение технологии прокатки-разделения в черновой группе проволочного стана 250 ОАО ЕМЗ/ С.М.Жучков, А.Ю.Оробцев, Э.В.Сивак и др.// Труды V Международной научно-технической конференции. Теоретические проблемы прокатного производства// Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2000. - №8-9. – С.223-225.
33. Опыт волочения низкоуглеродистой катанки, произведенной с использованием процесса прокатки-разделения/ В.В.Парусов, С.М.Жучков, А.М.Нестеренко и др.// Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2002. - №3. – С.56-57.
34. Matsuo G, Suzuki M. The latest Technology of Multi-stil rolling// SEA ISI Quartely.-1995.-№3.-P.49-58.
35. Прокатка-разделение. Тенденции развития технологи и оборудования/ С.М.Жучков, В.В.Филиппов, Л.В.Кулаков и др.//АО "Черметинформация". Бюллетень "Черная металлургия".-2002.-№7.-С.9-24.
36. Солод В.С., Маншилин А.Г., Нечепоренко В.А. Теоретический анализ различных модификаций способа разрыва при продольном разделении раскатов в многооручевых калибрах// Металлургическая и горнорудная промышленность.-2002.-№8-9.-С.273-277.
37. Расширение сортамента и повышение эффективности производства сортового проката с применением нетрадиционных технологических решений/ С.М.Жучков, Б.С.Полатовский, Г.В.Бергеман и др.// Новости черной металлургии России и зарубежных стран. Часть I. Бюллетень АО "Черметинформация" Черная металлургия. -2000.-№5-6. -С.34-38.
38. Жучков С.М. Эффективность использования современных технологических концепций при реконструкции непрерывных сортовых станов// Металлург. – 1998. - №1. – С. 29-32.
39. Сравнительный анализ экономических показателей вариантов реконструкции действующих станов/ Л.В.Кулаков, А.П.Лохматов, С.М. Жучков и др.// Новости черной металлургии России и зарубежных стран. Часть I. Бюллетень АО "Черметинформация". Черная металлургия. -1998. -№3-4. – С.47-50.
40. Кукуй Д.П., Солод В.С., Шеремет В.А. Выбор рационального пути реконструкции мелкосортных станов при переходе на непрерывнолитую заготовку большого сечения// Металлургическая и горнорудная промышленность.-2002.-№8-9.-С.184-188.
41. Маншилин А.Г., Солод В.С. Эффективность технологии многооручевой прокатки в зависимости от параметров оборудования// Сталь.-2002.-№8.-С.67,68.



Возможные схемы реализации двухручьевой прокатки - разделения профилей проката в условиях сортовых станов различного типа

МПР

Схема очага деформации к определению напряженного состояния металла при многоручьевой прокатке - разделении

Принципиальная схема двухручьевой прокатки - разделения при производстве арматурных профилей

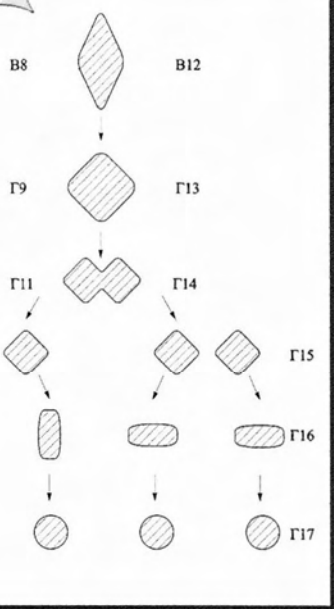


Схема двухручьевой прокатки - разделения угловых профилей с продольным разделением раската на заготовки простой или сложной формы сечения

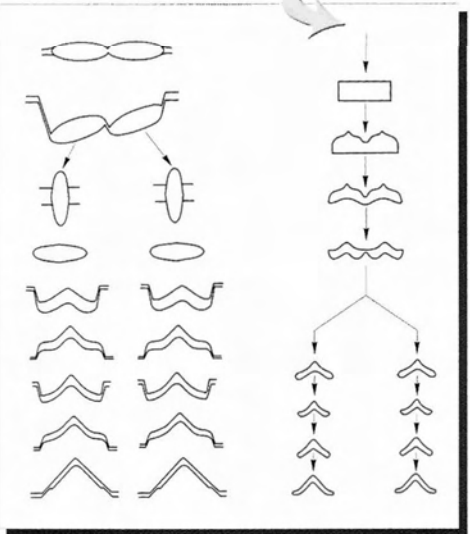
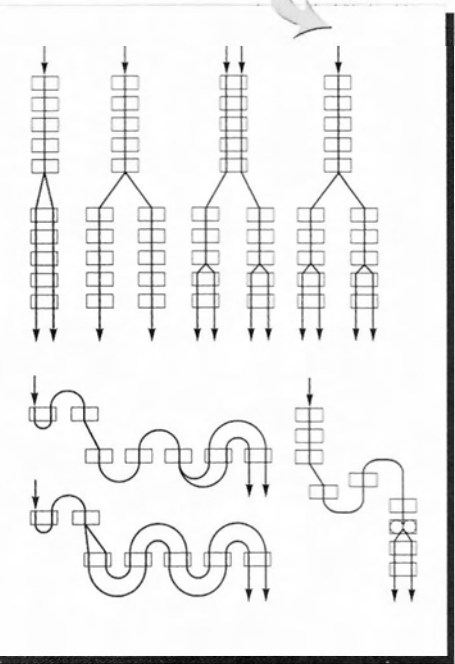
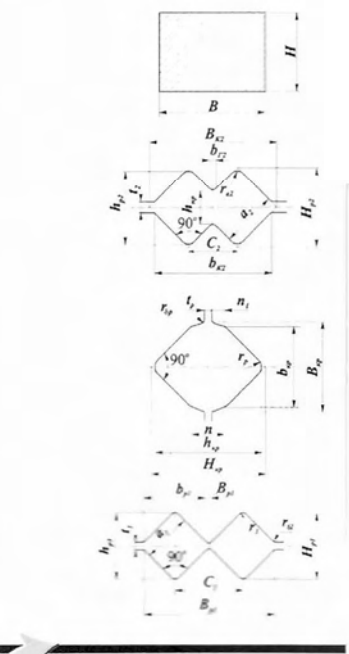
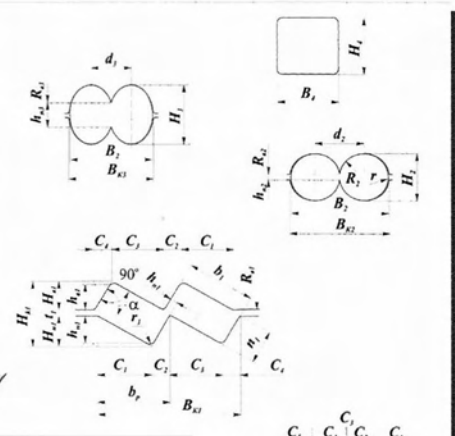


Схема калибровки валков для двухручьевой прокатки - разделения сортовых профилей с продольным разделением раската срезом перемычки



МПР



Схема калибровки валков для двухручьевой прокатки - разделения сортовых профилей с продольным разделением раската прокаткой в гладких цилиндрических валках

Схема калибровки валков для двухручьевой прокатки - разделения квадратных профилей с продольным разделением раската контролируемым разрывом

Схема калибровки валков для двухручьевой прокатки - разделения сортовых профилей с продольным разделением раската в двухручьевом калибре с ручьями, наклоненными к осям валков

МПР