

УДК 621.771

Рецензент — канд. техн. наук В.М.ЛУШНИКОВ

УДК 621.721

Расчет систем вытяжных калибров. Минкин А.В. — М.: Металлургия, 1989. 208 с.

Изложены новые методы расчета калибровок валков, кинематических параметров прокатки сортового проката и катанки из черных и цветных металлов на непрерывных станах с общим, групповым и индивидуальным приводом клеток (с двухвалковыми и трехвалковыми калибрами). Подробно описана последовательность решения исходных уравнений, что облегчает составление расчетных программ для ЭВМ. Приведены упрощенные способы расчета. Даны примеры расчета систем вытяжных калибров, наиболее часто применяемых на практике.

Предназначена для инженерно-технических работников, занятых разработкой калибровок валков, внедрением и эксплуатацией прокатного оборудования, а также студентов старших курсов прокатной специальности. Ил. 96. Табл. 1. Библиогр. список: 27 назв.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	4
Глава I. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТА КАЛИБРОВКИ ВАЛКОВ ПРИ СОРТОВОЙ ПРОКАТКЕ	7
1. Выбор системы вытяжных калибров	8
2. Распределение деформации по клетям стана	16
Глава II. УШИРЕНИЕ И ОПЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ПРОКАТКЕ В КАЛИБРАХ	24
1. Уширение при прокатке	24
2. Опережение при прокатке и определение катающих диаметров	31
3. Расчет скоростей вращения валков непрерывного стана	49
Глава III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИИ И РАСЧЕТ УШИРЕНИЯ ПРИ ПРОКАТКЕ	50
1. Уширение при прокатке в гладких валках, ящичных, ромбических и овальных калибрах	53
2. Уширение при прокатке в квадратных и круглых двухвалковых калибрах	65
3. Уширение при прокатке в трехвалковых калибрах	69
4. Расчет уширения при прокатке	72
Глава IV. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ КАЛИБРОВ	80
1. Расчет ящичных калибров	82
2. Расчет калибров системы ромб — квадрат	89
3. Расчет калибров системы овал — квадрат	96
4. Расчет калибров системы овал — круг	103
5. Расчет калибров системы стрелчатый треугольник — круг	113
6. Расчет калибров системы треугольник — треугольник	123
7. Особенности расчета калибровки валков непрерывных станов с общим приводом клеток	131
8. Определение углов захвата в калибрах	135
Глава V. ПРЕДЕЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ВЫТЯЖЕК В КАЛИБРАХ	137
1. Система прямоугольник — квадрат	139
2. Система ромб — квадрат	143
3. Система овал — квадрат	151
4. Система овал — круг	161
5. Система стрелчатый треугольник — круг	167
6. Система треугольник — треугольник	172
Глава VI. РАСЧЕТЫ КАЛИБРОВОК ВАЛКОВ И КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОКАТКИ	175
1. Система ящичных калибров	175
2. Система ромб — квадрат	179
3. Система овал — квадрат	184
4. Система овал — круг	191
5. Системы трехвалковых калибров	200
Библиографический список	207

2607010000—222

М 040 (01) — 89 138—89

ISBN 5-229-00298-0

© Издательство "Металлургия", 1989

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Непрерывный процесс совершенствования технологии и оборудования прокатных станов, широкое применение непрерывной и бесконечной прокатки, увеличение скорости и производительности станов, а также необходимость повышения точности и расширения сортамента проката требуют постоянного развития методов расчета калибровок валков и скоростных режимов прокатки.

Совершенствование технологических расчетов создает дополнительные возможности для повышения эффективности процесса прокатки и качества продукции, способствует созданию и быстрому освоению современного прокатного оборудования.

В настоящее время широко известными и, по сути дела, единственными аналитическими способами расчета калибровок валков и скоростных режимов при сортовой прокатке являются методы соответственной и приведенной полосы, а также метод описанных прямоугольников. Сущность этих методов заключается в том, что прокатываемая полоса с любой конфигурацией поперечного сечения приводится к простому прямоугольному или квадратному сечению. При этом, согласно методу соответственной полосы, прямоугольное сечение имеет такую же, как и у исходного сечения, площадь и соотношение ширины и высоты, а по методу приведенной полосы прямоугольное и исходное сечения при равной площади имеют одинаковую ширину. В соответствии с методом описанных прямоугольников расчеты выполняются для полосы прямоугольного либо квадратного сечения, описанного вокруг исходного профиля.

Для этой условной полосы с учетом соответствующих поправочных коэффициентов рассчитываются величины вытяжки, уширения, опережения и размеры сечений полосы по клетям, как если бы она прокатывалась в гладких валках. Затем по найденным размерам полосы определяются размеры искомых калибров.

Создание указанных методов явилось крупным шагом в направлении совершенствования расчета калибровок валков сортовых и проволочных станов, в том числе и непрерывных, и способствовало дальнейшему прогрессу прокатного производства. Однако именно для случая непрерывной прокатки в наибольшей степени выявилось и несовершенство этих методов, их точность, уже ставшая недостаточной для современного уровня развития сортовой прокатки.

Широкое применение многовалковых непрерывных станов для получения сортового проката предъявляет повышенные требования к точности расчетов технологических параметров процесса прокатки, в том числе калибровки валков. Это обусловлено тем, что компенсация ошибок в расчетах калибровки изменением зазоров между валками и скоростей приводных электродвигателей на современных непрерывных станах (с высокими скоростями прокатки и большим

числом клетей) является чрезвычайно сложной задачей и требует высокой квалификации обслуживающего персонала. Кроме того, такая перенастройка связана со значительными потерями производства. Особенно высокая точность расчета калибровки валков необходима для непрерывных станов с общим приводом, так как возникающие при изменении настройки межклетевые силы невозможно уменьшить соответствующей корректировкой скоростного режима прокатки, как это делается в случае индивидуального привода.

Между тем станы с общим приводом и блочным исполнением клетей в последние годы получили широкое распространение. В частности, установка чистовых блоков на современных проволочных станах позволила повысить скорость прокатки до 90 — 100 м/с. Кроме того, прокатные блоки нашли применение в литейно-прокатных агрегатах для производства катанки, совмещающих в одной непрерывной технологической линии процессы литья, прокатки и смотки готовой продукции. Широкое развитие этого способа производства подтверждает тот факт, что в настоящее время весь выпуск алюминиевой катанки в стране осуществляется на литейно-прокатных агрегатах (ЛПА). При этом существующая тенденция развития производства катанки из цветных металлов предполагает дальнейший рост числа ЛПА и их производительности. Делаются также попытки распространить этот способ производства катанки и на черные металлы.

Несовершенство существующих методов расчета калибровок валков в применении к многоклетевым непрерывным станам стало очевидным в период создания во ВНИИметмаше первых отечественных ЛПА для производства катанки из цветных металлов и сплавов.

Опыт промышленного внедрения первого такого агрегата показал, что проектная калибровка валков нуждается в существенной корректировке, причем в условиях литейно-прокатного агрегата нарушения процесса прокатки приводили к особенно значительным потерям производства. Исправление калибровки в период пуска и наладки потребовало длительного времени. Однако и в дальнейшем, в процессе эксплуатации несовершенство калибровки валков часто являлось причиной неудовлетворительного качества катанки и простоев агрегата.

Дополнительным фактором, повышающим требования к точности расчетов калибровки валков прокатных станов литейно-прокатных агрегатов, является наличие литой заготовки, не допускающей появления сколько-нибудь значительных межклетевых натяжений в первых клетях стана, поскольку это приводит к образованию поверхностных трещин и браку катанки.

Трудности в освоении процесса прокатки, а также задачи, стоящие перед ВНИИметмашем по созданию и освоению новых, более производительных литейно-прокатных агрегатов для производства

катанки с многоклетевыми непрерывными станами, обусловили необходимость совершенствования технологических расчетов. Особенно важной была проблема разработки калибровки валков для станов с трехвалковыми калибрами, методов расчета которых в литературе не имелось.

Работа по созданию нового метода расчета технологических параметров при сортовой прокатке начата более десяти лет назад. В дальнейшем метод постепенно совершенствовался по мере накопления практического опыта и экспериментальных данных об особенностях деформации в калибрах. В своем окончательном виде метод расчета калибровок валков и скоростных режимов прокатки успешно использованы при создании и освоении ряда непрерывных многоклетевых станов с двухвалковыми и трехвалковыми калибрами для производства катанки из цветных металлов, а также при проектировании станов для сортовой и арматурной стали. Кроме того, с их помощью выполнены работы по совершенствованию калибровок валков на литейно-прокатных агрегатах, введенных в строй ранее, что позволило повысить их производительность и качество катанки.

Положительный опыт использования излагаемых здесь методов расчета калибровок валков и кинематических параметров позволяет надеяться, что они окажут практическую помощь специалистам, занятым конструированием и эксплуатацией сортовых и проволочных прокатных станов.

В данной работе рассматриваются вопросы расчета только наиболее известных систем вытяжных калибров, в том числе: системы ящичных калибров прямоугольник — квадрат, систем ромб — квадрат, овал — квадрат, овал — круг, а также всех существующих систем трехвалковых калибров, а именно: стрелчатый треугольник — круг, стрелчатый треугольник — шестиугольник и треугольник — треугольник. Следует отметить, что хотя такие системы калибров, как ромб — ромб, шестиугольник — квадрат и некоторые другие, здесь не рассматриваются, однако предлагаемый подход к расчету калибровок валков применим и для этих систем калибров.

## Глава I. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТА КАЛИБРОВКИ ВАЛКОВ ПРИ СОРТОВОЙ ПРОКАТКЕ

В соответствии с излагаемым здесь методом расчета калибровок валков реальная форма сечения прокатываемой полосы не заменяется на более простую прямоугольную либо квадратную форму. Расчет всех параметров калибровки производится для полосы данной конкретной конфигурации, определяемой соответствующей системой калибров. Выбор и распределение вытяжек либо кинематических коэффициентов скорости по клетям, а также определение необходимого числа клеток в стане основывается на оценке предельных значений деформации в калибрах.

В наиболее полном объеме расчет калибровки валков выполняется для проектируемого стана, так как здесь наряду с размерами калибров и скоростями прокатки подлежат определению такие параметры, как число рабочих клеток и диаметры валков, тип привода (общий, групповой или индивидуальный), кинематические коэффициенты скорости клеток в случае общего привода и т.д.

Расчет калибровки валков осуществляется в следующей последовательности:

1. Выбор соответствующей системы калибров.
2. Распределение деформации по клетям и определение числа клеток.
3. Расчет площади сечения полосы в каждой клетке.
4. Расчет размеров калибров.
5. Определение катающих диаметров и скоростей металла по клетям.

После того как определены все параметры калибровки, рассчитывают усилия, действующие на валки; крутящие моменты и мощность прокатки во всех клетях стана.

В зависимости от типа стана и его привода порядок расчета калибровки может иметь свои особенности. Если при расчете распределения деформации по клетям и при определении числа клеток в качестве меры деформации принимается коэффициент вытяжки, как это делается обычно при расчетах калибровок валков непрерывных станов с индивидуальным приводом клеток, то этим самым одновременно полностью определяется и площадь металла ( $F_i$ ) в данной клетке. Расчет сводится к простому перемножению заданных значений вытяжек всех последующих клеток стана вплоть до чистовой клетки ( $\lambda_n$ ) на площадь поперечного сечения готового проката ( $F_n$ )  $F_i = \lambda_{i+1} \times \lambda_{i+2} \dots \lambda_n \cdot F_n$ . Затем следует определение размеров калибров, катающих диаметров и скоростей вращения валков, обеспечивающих соблюдение закона постоянства секундных объемов металла по клетям.

Расчет по п.3 имеет самостоятельное значение только в том случае, если в качестве меры деформации используются не значения вытяжек, а какие-то другие параметры, например, отношения скорос-

тей вращения валков соседних клетей, называемые также кинематическими коэффициентами скорости. Это необходимо при расчетах калибровок валков непрерывных станов с общим или групповым приводом клетей, но может применяться и в случае индивидуального привода, в частности, если при расчете по заданным вытяжкам существует опасность выхода по скоростям за пределы регулирования приводных двигателей.

Несмотря на отдельные отклонения, указанная последовательность расчета сохраняется для всех типов станов. Принципиальное отличие расчета калибровок непрерывных станов с общим приводом заключается в том, что для соблюдения постоянства секундных объемов металла расчеты площади сечения полосы в каждой клетке, размеров калибров, катающих диаметров и скоростей металла по клетям должны выполняться совместным решением соответствующих уравнений, составленных для всех клетей стана.

### 1. ВЫБОР СИСТЕМЫ ВЫТЯЖНЫХ КАЛИБРОВ

Расчет калибровки валков всегда начинается с выбора системы калибров, оптимальной для данных конкретных условий. Вытяжные системы, используемые при прокатке сортового металла и кантки, обычно подразделяют на системы с однородными калибрами: прямоугольник — прямоугольник, ромб — ромб, овал — овал, треугольник — треугольник и системы с чередующимися калибрами. К этой группе относятся такие системы, как прямоугольник — квадрат, ромб — квадрат, шестиугольник — квадрат, овал — квадрат, овал — круг и некоторые другие, а в станах с трехвалковыми калибрами стрельчатый треугольник — круг и стрельчатый треугольник — шестиугольник.

Расчет каждой из этих групп калибров имеет свои особенности. В вытяжных системах с чередующимися калибрами каждая пара калибров, например ромб и последующий квадрат или овал и последующий круг, должна обеспечивать получение чистового или, по крайней мере, близкого к чистовому квадрата или круга. Это обстоятельство обусловило преимущества систем с чередующимися калибрами, главными из которых являются:

возможность получения готового профиля из любого промежуточного квадратного или круглого калибра, что уменьшает число перевадок и, следовательно, сокращает простой стана при переходах на новый размер проката;

лучшие возможности контроля правильности калибровки и настройки стана по форме сечения полосы после квадратных или круглых калибров.

Благодаря этим преимуществам вытяжные системы с чередующи-

мися калибрами получили более широкое применение в практике прокатного производства, особенно на современных прокатных станах.

Очевидно, что выбор системы калибров в чистовых клетях полностью определяется заданной формой конечного продукта (круг, квадрат, шестиугольник и т.д.). Что же касается вытяжных систем, то выбор той или иной из них зависит от конкретных условий, таких, как заданный сортамент, конструктивные особенности прокатного стана, размеры прокатываемых сечений, пластичность материала и т.д. В основе выбора оптимальной для данных условий системы калибров должна быть объективная оценка ее достоинств и недостатков. Такая оценка возможна благодаря огромному практическому опыту, накопленному в промышленности в результате длительной эксплуатации прокатных станов и работы по совершенствованию технологии прокатки. Ниже дается краткая характеристика наиболее часто применяемых систем двухвалковых и трехвалковых калибров.

#### Системы двухвалковых калибров

Система ящичных калибров (рис. 1) используется для прокатки прямоугольных и квадратных сечений. Основные ее преимущества по сравнению со всеми другими системами, применяемыми для прокатки квадратов, заключаются в том, что для тех же сечений требуется наименьшая глубина вреза в валки, что повышает их прочность, а также наименьший угол захвата при тех же обжатиях в калибре.

Указанные преимущества системы ящичных калибров в наибольшей степени реализуются при прокатке крупных сечений, когда решающими факторами становятся прочность оборудования и надежный захват полосы валками, что и определило область применения этой системы. Кроме того, при прокатке крупных сечений в меньшей степени сказываются недостатки системы ящичных калибров, главными из которых являются повышенная склонность полосы к сворачиванию при прокатке, причем эта склонность повышается с увеличением выпусков, а также неравномерное охлаждение полосы по сечению.

Эти недостатки проявляются прежде всего при прокатке малых

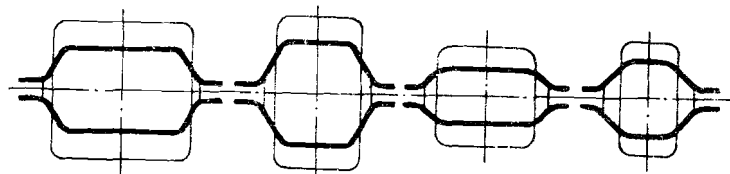


Рис. 1. Система ящичных калибров прямоугольник — квадрат



сечений. В этом случае повышенная потеря тепла в углах сечения не компенсируется внутренним теплом полосы. Вместе с тем увеличение доли металла, идущей на уширение, наблюдаемое при прокатке малых сечений, вызывает необходимость соответствующего увеличения выпусков, что в свою очередь повышает возможность сворачивания полосы в калибре.

Следует также отметить, что в ящичном калибре, вследствие наличия выпусков, невозможно получить геометрически правильный квадрат, поэтому при прокатке квадратов ящичные калибры используются только в черновых клетях; дальнейшая прокатка проводится обычно в системе ромб — квадрат.

*Система ромб — квадрат* (рис. 2) применяется для прокатки чистового квадратного профиля, а также в качестве вытяжной, так как позволяет получать значительные вытяжки. Кроме того, к достоинствам системы ромб — квадрат можно отнести хорошую устойчивость прокатываемой полосы как в ромбическом, так и в квадратном калибрах; более высокое, чем в ящичных калибрах, качество поверхности полосы.

Недостатком системы является больший по сравнению с ящичными калибрами той же площади врез в валки, что снижает их прочность и ухудшает захват полосы, в связи с чем система ромб — квадрат применяется обычно для меньших сечений, чем ящичные калибры. Другим недостатком является быстрое остывание полосы в углах профиля, поэтому в качестве вытяжной система ромб — квадрат применяется для прокатки достаточно крупных сечений, так как здесь за счет большего запаса тепла неравномерность охлаждения приводит к меньшей разнице температур по сечению полосы. Это ограничивает ее применение в качестве вытяжной черновыми клетями сортовых станов. Система ромб — квадрат часто применяется в комбинации с системой ящичных калибров в первых клетях и с системой овал — квадрат в последующих клетях стана. Кроме того, она используется в непрерывно-заготовочных станах.

*Система овал — квадрат* (рис. 3) позволяет получить наибольшие по сравнению со всеми другими системами вытяжки в калибрах, что и послужило причиной ее широкого применения при про-

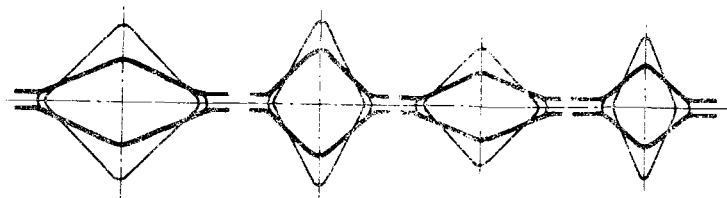


Рис. 2. Система калибров ромб — квадрат

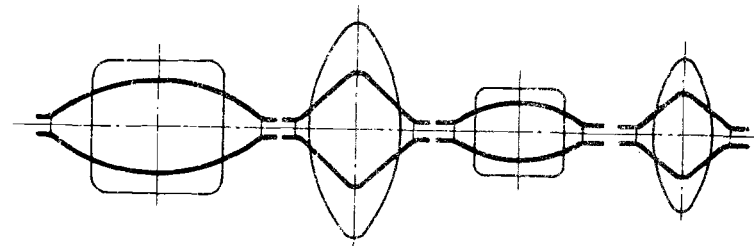


Рис. 3. Система калибров овал — квадрат

катке мелкого сорта и катанки. Другими преимуществами этой системы являются достаточно хорошая устойчивость полосы при прокатке как в овальном, так и в квадратном калибре; более равномерное охлаждение полосы по периметру, достигаемое за счет обновления металла в углах профиля при попеременном обжатии в овальном и квадратном калибрах.

Основной недостаток системы овал — квадрат заключается в необходимости применения кантовочных проволочек, в том числе на станах с чередующимися горизонтальными и вертикальными клетями, что ограничивает ее использование сравнительно мелкими сечениями (обычно для квадратов со стороной менее 50 мм). Кроме того, это исключает возможность применения системы овал — квадрат в современных прокатных блоках из-за малого расстояния между клетями. К недостаткам этой системы калибров относится также значительная неравномерность в распределении нагрузок между овальным и квадратным калибрами.

*Система овал — круг* (рис. 4) применяется в чистовых клетях сортовых и проволочных станов при прокатке круглого профиля. Эта система в качестве вытяжной до последнего времени широко не применялась из-за меньших вытяжных возможностей по сравнению с системой овал — квадрат. Другим ее недостатком является меньшая устойчивость овальной полосы в круглом калибре, чем в квадратном.

В то же время система овал — круг имеет свои преимущества, главными из которых являются отсутствие необходимости кантовки полосы в станах с чередующимися горизонтальными и верти-

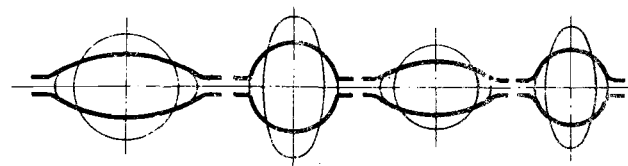


Рис. 4. Система калибров овал — круг

систему чередующихся калибров (стрельчатый треугольник — круг), либо систему однородных треугольных калибров (треугольник — треугольник); причем в этом случае перед чистовым круглым калибром для повышения точности геометрии круга применяется стрельчатый треугольный калибр.

*Система стрельчатый треугольник — круг* (рис. 5, 6) применяется на всех отечественных литейно-прокатных агрегатах с трехвалковыми блоками, выпускающих алюминиевую и медную катанку. Данную систему калибров имеют также прокатные станы литейно-прокатных агрегатов фирмы "Континиус" (Италия).

Обычно в черновых клетях вместо круглых применяются шестиугольные калибры, в которых устойчивость треугольной полосы выше вследствие подпирания действующими стенками калибра. Такая комбинация калибров наиболее распространенный вариант калибровки валков непрерывных трехвалковых станов. Роликовые проводки устанавливаются только перед круглыми (шестиугольными) калибрами для удержания треугольного сечения; перед треугольными калибрами ставятся направляющие трубки.

Основными преимуществами системы стрельчатый треугольник — круг по сравнению с системой треугольник — треугольник являются: возможность получения кругов различного диаметра без дополнительной переделки валков; большая устойчивость прокатываемой полосы в калибрах: меньшая утолщенность заднего конца полосы в случае его сваливания из-за наличия в системе "тесных" калибров (круглых, шестиугольных) и, следовательно, меньшая опасность застревания полосы в стане.

В системе треугольник — треугольник (рис. 7) каждый валок имеет гладкую цилиндрическую поверхность. Три таких вала составляют треугольный калибр. Поперечное сечение полосы, прокатываемой в системе треугольных калибров, имеет обычно форму неправильного шестиугольника.

Основные преимущества системы треугольник — треугольник следующие:

более широкий возможный сортамент выпускаемой катанки, так

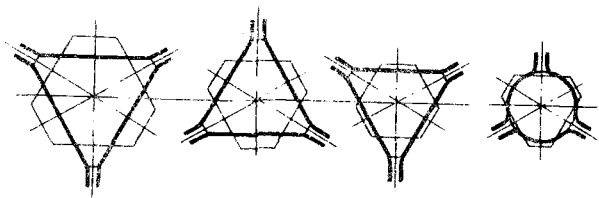


Рис. 7. Система калибров треугольник — треугольник — круг

как любой треугольный калибр при замене его на круглый, может рассматриваться в качестве чистового;

возможность переточки валков на диаметр ближайшей предыдущей клетки, а не через одну клетку, как это необходимо в случае калибровки стрельчатый треугольник — круг, что значительно (теоретически в два раза) уменьшает расход валков;

отсутствие ручьев на рабочих поверхностях упрощает изготовление валков и их переточки (перешлифовки), что кроме снижения трудозатрат позволяет применять валки с высокой твердостью поверхности и, следовательно, повысить их стойкость;

более равномерный износ валков, что также способствует увеличению срока их службы;

более простая сборка валков в клетку, так как не требуется их осевая регулировка.

Систему треугольник — треугольник для прокатки стальной катанки применяет фирма "Кокс" (ФРГ) в трехвалковых проволочных блоках.

Несколько лет назад во ВНИИметмаше проведена работа по изучению целесообразности применения системы треугольник — треугольник при прокатке алюминиевой и медной катанки на литейно-прокатных агрегатах. Полученные результаты позволили значительно расширить представления о возможностях и недостатках этой системы калибров. Оказалось, что основным недостатком системы треугольник — треугольник является плохая устойчивость прокатываемой полосы в калибрах. В связи с этим обжатия в клетях должны быть такими, чтобы не допускать заполнения металлом углов треугольника. В противном случае невозможно предотвратить сваливание полосы и прежде всего ее заднего конца в последующем калибре, что приводит к переполнению калибров и последующему застреванию полосы в стане. Требование обязательной незаполненности металлом треугольного калибра в значительной степени уменьшает вытяжные возможности системы треугольник — треугольник. Кроме того, эта система калибров предъявляет повышенные требования к качеству проводковой арматуры. Применение системы треугольник — треугольник на литейно-прокатных агрегатах потребовало создания усовершенствованных трехвалковых проводок вместо двухроликовых, установленных на стане.

Трехроликовые проводки используются в настоящее время в трехвалковом прокатном блоке литейно-прокатного агрегата, калибровка валков которого в первых шести клетях выполнена по системе треугольник — треугольник. Расположение роликов проводки и калибр, образованный ими, повторяют конфигурацию калибра предыдущей клетки. Диаметры роликов выбираются так, чтобы калибр в проводке был больше калибра предыдущей клетки на величину упру-

гой деформации клетки при прокатке. Для создания возможности выкатывания полосы против хода прокатки в случае внезапной остановки стана целесообразно один из роликов делать подпружиненным, либо предусмотреть его регулировку в радиальном направлении. Недостатком системы треугольник — треугольник является также необходимость применения роликовых проводок во всех клетях стана.

В современных многоклетевых сортовых и проволочных станах обычно применяют комбинации различных вытяжных систем, причем выбор каждой из них должен основываться на знании ее возможностей применительно к данному конкретному случаю.

Следующим этапом расчета калибровки валков является распределение деформации по клетям (пропускам) прокатного стана. Этот этап один из важнейших, особенно при разработке технологии для проектируемого стана, так как от того, какая величина деформации будет принята в каждом калибре, зависит число клеток в стане, мощность приводных двигателей, стабильность процесса прокатки, качество готовой продукции и т.д.

## 2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ПО КЛЕТЯМ СТАНА

При расчетах калибровок валков в качестве меры деформации удобнее всего принимать величину вытяжки в калибре, так как при этом сразу же определяются площади поперечного сечения полосы во всех клетях стана. Однако при непрерывной прокатке задаваться значениями вытяжек практически возможно только в случае индивидуального привода клеток, наличие которого позволяет обеспечить необходимые скорости вращения валков каждой клетки в соответствии с принятыми значениями вытяжек и законом постоянства секундных объемов. В случае же общего или группового привода клеток принятые вытяжки не всегда могут быть реализованы подбором соответствующих зубчатых передач в приводном редукторе.

Распределение деформации по клетям начинается с определения величины общей (суммарной) вытяжки.

Общая вытяжка в стане равна

$$\lambda_0 = F_0 / F_n, \quad (1.1)$$

где  $F_0$  — площадь сечения заготовки;  $F_n$  — площадь сечения готового проката.

Площадь сечения заготовки определяется обычно по заданной часовой производительности стана, сортамента, а иногда и требуемой длины готовой продукции. В случае, если расчеты калибровки выполняются для существующего прокатного стана, при выборе заготовки необходимо учитывать предельные возможности стана по прочности и условиям захвата, а также производительность и размеры на-

гревательных устройств и холодильника, длину подводящих и отводящих рольгангов и т.д.

В вытяжных системах с чередующимися калибрами каждая пара калибров рассматривается как бы состоящей из предчистового (прямоугольного, ромбического, овального, треугольного) и чистового (квадратного, круглого) калибров. В связи с этим здесь, наряду с общей вытяжкой и вытяжкой в калибре, используется частная суммарная вытяжка, представляющая собой отношение площадей исходного и конечного в данной паре калибров квадрата или круга.

Итак, величина частной суммарной вытяжки для  $i$ -того и  $(i + 1)$ -го калибров равна

$$\lambda_{\Sigma i, i+1} = F_{i-1} / F_{i+1} = \lambda_i \lambda_{i+1},$$

где  $\lambda_i, \lambda_{i+1}$  — соответственно вытяжка в  $i$ -том предчистовом и  $(i + 1)$ -ом чистовом (квадратном или круглом) калибрах.

Величина  $\sqrt{\lambda_{\Sigma}}$  называется средней вытяжкой  $\lambda_{\Sigma \text{ ср } i, i+1} = \sqrt{\lambda_{\Sigma i, i+1}} = \sqrt{\lambda_i \cdot \lambda_{i+1}}$ . Величина общей вытяжки  $\lambda_0 = \lambda_{\Sigma \text{ ср }}^{0,5N}$ , где  $\lambda_{\Sigma \text{ ср }}$  — среднее значение частной суммарной вытяжки в стане,

$$\lambda_{\Sigma \text{ ср }} = \sqrt[0,5N]{\lambda_{\Sigma 1} \cdot \lambda_{\Sigma 2} \dots \lambda_{\Sigma n}}.$$

Таким образом, требуемое число клеток в стане можно определить из выражения

$$N = 2 \lg \lambda_0 / \lg \lambda_{\Sigma \text{ ср }}. \quad (1.2)$$

Задача упрощается, если расчет калибровки валков выполняется для действующего прокатного стана. В этом случае искомой величиной является среднее значение частной суммарной вытяжки, величина которой определяется выражением

$$\lambda_{\Sigma \text{ ср }} = \sqrt[0,5N]{\lambda_0}.$$

Общую вытяжку по клетям стана целесообразно распределять таким образом, чтобы в первых и последних клетях частные суммарные вытяжки были меньше средней величины. Необходимо также, чтобы во всех клетях принятые значения  $\lambda_{\Sigma}$  были меньше максимально допустимых значений.

Если калибровка валков стана представляет собой систему одnorodных калибров, то

$$N = \lg \lambda_0 / \lg \lambda_{\Sigma \text{ ср }}, \quad (1.3)$$

где  $\lambda_{\Sigma \text{ ср }}$  — некоторое среднее для стана значение вытяжки в калибре.

Для непрерывных станов, имеющих общий или групповой привод, в том числе для прокатных блоков, как уже упоминалось ранее, вместо вытяжки в клетях удобнее задаваться величиной кинематического коэффициента скорости клеток, понимая под этим отно-

шение скоростей вращения валков данной и предыдущей клетки. Так, для  $i$ -той клетки кинематический коэффициент скорости будет равен

$$\eta_i = n_i / n_{i-1}.$$

Очевидно, что для первой клетки  $\eta_1 = 1,0$ .

Суммарный коэффициент скорости в стане при известной величине общей вытяжки ( $\lambda_0$ ) можно приблизительно определить следующим образом:

$$\eta_0 = \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 \cdots \eta_n (\lambda_0 / \lambda_1) \cdot (D_1 / D_n), \quad (1.4)$$

где  $\lambda_1$  — вытяжка в первой клетки;  $D_1, D_n$  — диаметры валков в вершине калибра первой и последней клетки соответственно.

В чистовых проволочных блоках величина кинематических коэффициентов скорости, а также идеальный диаметр валков обычно принимают одинаковыми для всех клеток. В этом случае суммарный коэффициент скорости блока можно представить в виде  $\eta_0 = n_n / n_1 = \eta^{(N-1)}$ .

Подставляя значение  $\eta_0$  в (1.4) и считая, что вытяжка в первой клетки приблизительно равна  $\eta$ , получим выражение для определения числа клеток в блоке

$$N = \lg (\lambda_0 \frac{D_1}{D_n}) / \lg \eta. \quad (1.5)$$

При распределении деформации по клетям следует стремиться к соблюдению следующих основных принципов:

вытяжка в каждом калибре должна быть по возможности максимальной с учетом назначения калибра и номера клетки;

производство заданного сортамента проката должно осуществляться при минимальном числе перевалок и перенастроек стана;

мощность прокатки во всех клетях должна быть примерно одинаковой, что способствует более равномерной нагруженности оборудования.

Таким образом, в соответствии с требованием п.1 выбору режима обжатия должен предшествовать расчет предельно допустимых деформаций в калибрах.

Величина допустимой деформации в калибре зависит от многих факторов, главными из которых являются пластичность прокатываемого материала, прочность оборудования и мощность привода, условия захвата полосы валками, устойчивость полосы в калибре, точность готового проката, износ калибров.

Влияние пластичности материала на допустимую величину деформации в калибре очевидно — чем меньше пластичность, тем меньше деформации можно допустить. Однако, поскольку пластичность многих металлов и сплавов, кроме химического состава, в значительной степени определяется температурой прокатки, важно распре-

лять вытяжки таким образом, чтобы максимально использовать фактор положительного влияния высоких температур на пластичность. С этой точки зрения в первых клетях, где температура металла достаточно высока, принимаются наибольшие вытяжки. В последующих клетях вытяжку снижают в соответствии с уменьшением температуры прокатки, поскольку с увеличением температуры уменьшается величина сопротивления деформации, такое распределение вытяжек обеспечивает также наименьший расход энергии при прокатке, а, следовательно, и минимальную суммарную мощность приводных электродвигателей стана. Кроме того, с повышением температуры прокатки за счет большого смятия переднего конца при ударе о валки улучшаются условия захвата полосы валками, что также создает возможности повышения обжатия в первых клетях.

Пластичность металла и ее изменение в процессе прокатки лежит в основе самых ранних методов распределения деформаций по клетям (пропускам) стана. Метод распределения обжатия в соответствии с падением температуры прокатки был предложен Л.Жезом. Согласно этому методу деформации по клетям (пропускам) распределяются по линейному закону, при этом наименьшее обжатие назначается в последнем чистовом пропуске, наибольшее — в первом.

В соответствии с методом, предложенным Е.Кирхбергом, который считал, что пластичность металла прямо пропорциональна толщине полосы в данном проходе, обжатия распределяются по клетям по параболическому закону. Наибольшее обжатие принимается здесь также в первом калибре, наименьшее — в последнем чистовом калибре.

По сравнению с методом Жеза метод Кирхберга позволяет менее интенсивно загрузить чистовые калибры, уменьшить тем самым их износ и повысить точность готового профиля. Однако это имеет и отрицательный эффект, так как приводит к необходимости существенного повышения деформации в черновых клетях, что не всегда возможно из-за соображений прочности оборудования и условий захвата.

В количественном отношении оба эти метода весьма приближены, поскольку основываются на единственном факторе — пластичности прокатываемого металла. К тому же при прокатке на современных непрерывных сортовых и проволочных станах фактор пластичности редко определяет допустимую величину деформации в калибре, за исключением, быть может, случаев прокатки малопластичных материалов (отдельные высоколегированные марки стали, некоторые сплавы цветных металлов и т.п.). Это объясняется тем, что при высоких скоростях прокатки в сочетании с интенсивными обжатиями, принятыми на современных станах, падение температуры полосы по длине стана незначительно, а, следовательно, во всех клетях металл сохраняет высокую пластичность.

Современные способы распределения обжатий по клетям стана основываются на анализе предельных значений деформации, обусловленных различными факторами, в том числе пластичностью прокатываемого материала. При этом, поскольку величина допустимой деформации в клетке в зависимости от ее номера, назначения и других причин может определяться разными факторами, то при выборе режима обжатий обычно исходят из того, какие факторы в данных конкретных условиях являются определяющими. Так, если пластичность прокатываемого материала не является фактором, лимитирующим обжатия в стане, то величина принимаемых деформаций в чистовых клетях зависит обычно от требований к точности проката и износа валков, в то время как в черновых клетях определяющими, как правило, являются условия захвата и нагрузки на валки. В остальных клетях фактором, характеризующим величину допустимой деформации, наряду с вышесказанными, часто является устойчивость полосы при прокатке\*<sup>1</sup>.

Метод допустимых деформаций, в частности, положен в основу рекомендаций по выбору режима обжатий\*<sup>2</sup>. Б.П.Бахтинов и М.М.Штернов предлагают полученные на основе практического опыта типовые графики распределения вытяжек по клетям (пропускам) для различных случаев прокатки, предусматривающие снижение обжатий в первых, наиболее нагруженных, и последних чистовых клетях стана. Применительно к прокатке полосы прямоугольного сечения разработаны способы расчета допустимых обжатий, исходя из предельных условий захвата полосы валками, мощности приводных двигателей и прочности валков. Учет этих факторов особенно важен при выборе обжатий в черновых клетях стана.

Очевидно, что для оптимального распределения деформаций по клетям стана необходимо учитывать также и другие факторы, в том числе фактор устойчивости полосы в калибре.

Известно, что устойчивость прокатываемой полосы в калибре, при прочих равных условиях, зависит от соотношения между ее высотой ( $h$ ) и шириной ( $b$ ). Причем вероятность сворачивания полосы вокруг своей продольной оси будет тем больше, чем больше отношение  $h/b$ . Таким образом, предельное соотношение размеров полосы определяет максимальную (из условия устойчивости) величину деформации в калибре. В системах калибров овал — круг и стрелчатый треугольник — круг проблема обеспечения устойчивости полосы существует также в случае очень малых обжатий, когда соотно-

шение размеров сечения предчистового овала или стрелчатого треугольника близко к единице. Это связано с трудностью удержания в проводке близкого к кругу профиля, особенно при малых диаметрах круга.

При прокатке в вытяжных калибрах соотношение размеров поперечного сечения полосы является важным показателем, характеризующим не только ее устойчивость, но и величину деформации. Причем в вытяжных системах с чередующимися калибрами отношение  $h/b$  предчистового профиля однозначно определяет как величину деформации в данном предчистовом, так и ту, которую необходимо осуществить в следующем чистовом калибре. Тем самым величина отношения  $h/b$ , наряду с устойчивостью, при прочих равных условиях определяет угол захвата, нагрузки в клетях, точность готового проката и износ валков. Выражения для определения максимальных (из условий захвата и устойчивости полосы) значений вытяжек ( $\lambda_{\Sigma \max}$ ) для различных систем калибров приведены в гл. V. Формула для расчета максимальной частной суммарной вытяжки в трехвалковых калибрах системы стрелчатый треугольник — круг получена из условия обеспечения правильной формы круга.

Для систем с чередующимися калибрами расчет максимальных значений вытяжек в калибрах и максимальных частных суммарных вытяжек, соответствующих предельному соотношению размеров поперечного сечения прокатываемой полосы, выполняется последовательно, начиная с последнего чистового калибра, размеры сечения полосы в котором обычно заданы. Определив максимальное значение частной суммарной вытяжки в последней паре калибров, найдем площадь сечения полосы, прокатываемой в предпоследней паре калибров ( $F_{n-2}$ ), которую в этом случае можно считать максимальной возможной

$$F_{n-2} = \lambda_{\Sigma \max, n-1} F_n' \quad (1.6)$$

где  $\lambda_{\Sigma \max, n-1}$  — максимальное значение частной суммарной вытяжки в последней паре калибров;  $F_n$  — площадь сечения готового проката.

Далее аналогичным образом проводится расчет величины максимальной частной суммарной вытяжки в предпоследней паре калибров, а затем для всех предыдущих пар, до тех пор, пока сечение полосы не превысит заданную площадь сечения заготовки. Полученное при этом число пар калибров определяет то минимальное число клеток (пропусков), которое требуется для реализации заданного значения общей вытяжки. Необходимые для расчета  $\lambda_{\Sigma \max}$  значения диаметров валков ориентировочно можно определить из соотношений между диаметрами валков и размерами прокатываемых квадратов и круглых профилей, составленных на основании анали-

\*<sup>1</sup> В зависимости от величины обжатия, формы калибров и состояния проводковой арматуры фактор устойчивости полосы может быть определяющим также в черновых и в чистовых клетях.

\*<sup>2</sup> Бахтинов Б.П., Штернов М.М. Калибровка прокатных валков. — М.: Металлургиздат, 1953.

за сортамента действующих отечественных сортовых и проволочных станов:

Диаметр рабочих валков, мм .....	250—300	300—350	350—400	400—500	500—600
Размеры прокатываемых сечений, мм:					
круглых .....	6 — 15	15 — 30	30 — 60	60 — 100	60 — 110
квадратных .....	6 — 15	12 — 30	25 — 50	50 — 80	60 — 100

Для того, чтобы вытяжки в калибрах были меньше предельных, число клеток проектируемого стана целесообразно принимать на одну, либо (в случае применения системы чередующихся калибров) две клетки больше расчетного минимального значения. После определения частных суммарных вытяжек для всех пар калибров вытяжка распределяется между калибрами каждой пары.

Анализ предельных соотношений вытяжек внутри данной пары для различных систем калибров выполнен в гл. V. С помощью уравнений, приведенных в этой главе, определяется диапазон допустимых соотношений вытяжек, в пределах которого должны находиться принимаемые значения вытяжек в калибрах. При этом вытяжки в предчистовых калибрах каждой пары принимаются обычно равными или несколько большими, чем в последующих квадратных или круглых калибрах. Исключением является прокатка строительной арматуры.

В этом случае для лучшего выполнения ребер профиля вытяжку в чистовых круглых калибрах целесообразно принимать несколько большей, чем в предчистовых овалах.

После распределения деформации по клетям стана следует обязательно проверить принятые значения вытяжек из условий захвата (в первую очередь в черновых клетях). Для непрерывных станов в блочном исполнении проверку на максимальный угол захвата, как показывает опыт, можно проводить только для первой клетки блока. В последующих клетях, ввиду малости межклетевых промежутков, захват обеспечивается принудительной задачей полосы валками предыдущих клеток.

Выбор значений кинематических коэффициентов скорости для непрерывных станов с общим приводом клеток также целесообразно выполнять на основе расчета предельных значений вытяжек. В соответствии с (1.4) максимальная величина кинематического коэффициента скорости  $i$ -той клетки стана будет равна

$$\eta_{i \max} = (D_{i-1}/D_i) \lambda_{i \max} \quad (1.7)$$

Если калибровка валков стана представляет собой систему чередующихся калибров, величину  $\eta_{i \max}$  можно представить в виде

$$\eta_{i \max} = \sqrt{(D_{i-1}/D_{i+1})} \lambda_{\Sigma \max, i+1}, \quad (1.8)$$

где  $D_{i-1}$ ,  $D_{i+1}$  — диаметры валков по вершине  $(i-1)$ - и  $(i+1)$ -того круглых либо квадратных калибров;  $\lambda_{\Sigma \max, i+1}$  — максимальная величина частной суммарной вытяжки в  $i$ -том предчистовом и  $(i+1)$ -ом чистовом калибрах.

Величина кинематических коэффициентов скорости клеток не должна превышать максимальных значений  $\eta_i$ , определяемых выражениями (1.7) или (1.8). В том случае, если коэффициент  $\eta$  принят одинаковым для всех клеток стана ( $\eta_i = \text{const}$ ), его величина не должна быть больше наименьшего из значений  $\eta_{i \max}$ , подсчитанных из (1.7) или (1.8) для всех калибров. Если калибровка валков блока представляет систему овал — круг, а в случае трехвалкового блока — стрельчатый треугольник — круг, то при  $\eta_i = \text{const}$ , как показывает анализ, вытяжка в овальном и треугольном калибрах будет несколько больше, чем в последующем круглом ( $\lambda_i > \lambda_{i+1}$ ). Причем разница в вытяжках будет тем значительней, чем больше коэффициент  $\eta$  и площадь сечения полосы.

Ниже приведены значения кинематических коэффициентов скорости некоторых действующих прокатных блоков. В прокатных блоках литейно-прокатных агрегатов для производства катанки из цветных металлов и сплавов конструкции ВНИИметмаш приняты следующие значения кинематических коэффициентов скорости клеток:

в двухвалковых блоках (система калибров овал — круг)  $\eta = 1,25 \div 1,35$  (чистовой шестиклетевой блок 250);

$\eta = 1,41 \div 1,51$  (черновой шестиклетевой блок 350);

в трехвалковых одиннадцати- и семнадцатиклетевых блоках (система калибров стрельчатый треугольник — круг, стрельчатый треугольник — шестиугольник, а также треугольник — треугольник — в первых клетях одного из агрегатов)  $\eta = 1,25 \div 1,32$ .

В прокатных блоках литейно-прокатных агрегатов для цветных металлов и сплавов, выпускаемых фирмами "Саутуайр" (США), "Континиус" (Италия), "Контирод" (ФРГ), приняты примерно такие же величины коэффициентов скоростей. Чистовые блоки для прокатки стальной катанки производства фирм "Морган" (США), "Крупп" (ФРГ), "Скет" (ГДР), "Кокс" (ФРГ) и других имеют несколько меньшие значения кинематических коэффициентов скорости клеток ( $\eta = 1,2 \div 1,3$ ).

Примеры выбора режима обжатий для проектируемого и действующего непрерывного станов как с индивидуальным, так и общим приводом клеток приведены в гл. VII.

## Глава II. УШИРЕНИЕ И ОПЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ПРОКАТКЕ В КАЛИБРАХ

### 1. УШИРЕНИЕ ПРИ ПРОКАТКЕ

При прокатке смещенный объем металла (за счет обжатия валками) распределяется в продольном (по оси прокатки) и поперечном направлениях. Поскольку при пластической деформации объем деформируемого металла практически не изменяется, это можно выразить в виде следующего уравнения, называемого уравнением постоянства объема:

$$\Delta V = \Delta V_x + \Delta V_y,$$

где  $\Delta V$  — смещенный валками объем металла;  $\Delta V_x$ ,  $\Delta V_y$  — объемы металла, смещенные соответственно в продольном и поперечном направлениях.

Поперечная деформация, вызывающая приращение ширины или уширение полосы, увеличивает затрачиваемую работу, необходимую для получения готового профиля, и тем самым может оказать существенное влияние на технологию прокатки и состав оборудования. Особенно велико влияние уширения на калибровку валков. Определение величины поперечной деформации является важнейшим условием точности расчета калибровки, т.е. соответствия расчетных и фактических размеров профиля, а для непрерывного стана — еще и стабильности процесса прокатки. Поэтому, начиная с работ Е.Бласа, до настоящего времени вопрос распределения деформации при прокатке находится в центре внимания. Среди наиболее известных работ по данному вопросу можно назвать экспериментальные исследования уширения Н.Меца, А.Шпенле, И.М.Павлова, О.Эмике и Е.Пахали, А.П.Чекмарева при прокатке углеродистых и легированных сталей, а также В.Тафеля и Ф.Анке при прокатке меди и алюминия, И.С.Губкина и М.И.Злотникова — при прокатке меди. Более поздними являются работы Ю.М.Чижикова, А.И.Гришкова, В.Н.Серебрянникова и А.Ф.Мельникова и др., а также исследования деформации при прокатке в калибрах, выполненные во Фрейбергской Горной академии (ГДР). Наряду с экспериментальными исследованиями имеется большое число работ, посвященных теоретическому анализу закономерностей деформации при прокатке. На основании этих экспериментальных и теоретических исследований получены многочисленные формулы для определения уширения. В числе наиболее известных можно назвать формулу Жеза, Губкина, Тафеля и Седлачека, Зибеля, Целикова, Бахтинова и др.

Одной из самых первых зависимостей для расчета уширения при

прокатке является известная формула Жеза, предложенная им в 1900 г.,

$$\Delta b = c \Delta h, \quad (2.1)$$

где  $c$  — коэффициент, зависящий от вида прокатываемого материала, для стали равный 0,35.

Формула (2.1) предполагает линейную зависимость между приращением ширины полосы ( $\Delta b$ ) и величиной обжатия ( $\Delta h$ ), причем для стали по этой формуле уширение полосы составляет 35 % обжатия, остальные 65 % идет на удлинение полосы. Очевидно, что формула Жеза весьма приближенна, так как не учитывает влияние других, не менее важных, чем обжатие и вид материала, факторов. В настоящее время она представляет интерес не с практической точки зрения, а скорее в плане историческом, как этап развития научного представления о процессе прокатки.

По мере развития прокатного производства и углубления знаний о процессе прокатки и особенностях течения металла в валках совершенствовались формулы для расчета уширения и росла их достоверность.

В качестве примера более поздних выражений для расчета уширения при прокатке приведем известную формулу Зибеля

$$\Delta b = c_1 (\Delta h / h_0) l, \quad (2.2)$$

где  $c_1$  — коэффициент, зависящий от вида прокатываемого материала;  $h_0$  — высота полосы до прокатки;  $l$  — длина дуги захвата.

Формула (2.2) получена в результате обработки данных, выполненных автором экспериментов по осаиванию и прокатке образцов из свинца и мягкой стали. В данной формуле, кроме обжатия и вида материала, учитывается влияние высоты прокатываемой полосы и диаметр валков — факторов, оказывающих, как показывает опыт, существенное воздействие на величину уширения.

В качестве дальнейшего этапа совершенствования метода расчета уширения при прокатке можно назвать формулу, предложенную А.И.Целиковым,

$$\Delta b = 2c_b c_\sigma \left( l - \frac{\Delta h}{2\mu} \right) \left( \frac{h_1^2}{\Delta h^2} \ln \frac{h_0}{h_1} - \frac{h_1}{\Delta h} + 0,5 \right), \quad (2.3)$$

где  $c_b$ ,  $c_\sigma$  — коэффициенты, учитывающие влияние ширины и натяжения полосы;  $\mu$  — коэффициент трения в зоне контакта полосы с валками;  $h_1$  — высота полосы после прокатки.

Кроме уже упомянутых факторов, т.е. обжатия, высоты полосы и диаметра валков, формула (2.3) учитывает влияние на уширение коэффициента трения, ширины прокатываемой полосы и величины натяжения.

Многочисленные исследования деформации металла при прокат-

ке, а также практика прокатного производства позволили установить, что величина поперечной деформации определяется следующими основными факторами, приведенными ниже.

*Форма и размеры исходной полосы.* Распределение деформации при прокатке зависит от соотношения между шириной ( $b$ ) и длиной ( $l$ ) зоны контакта металла с валками. Очевидно, что чем больше отношение  $b/l$ , тем больше относительная величина сил сопротивления поперечному течению и тем меньше поперечная деформация. В связи с этим величина относительного уширения ( $\Delta b/b_0$ ) при прокатке полос прямоугольного сечения, имеющих отношение  $b_0/h_0 > 1$ , меньше, чем при тех же обжатиях полос квадратного сечения.

*Величина обжатия.* Известно, что абсолютное ( $\Delta b$ ) и относительное ( $\Delta b_0/b_0$ ) приращение ширины полосы за счет уширения при прокатке увеличивается с ростом обжатия. Согласно формуле Жеза, между уширением и обжатием имеется линейная зависимость. Более поздние исследования установили наличие более сложной, нелинейной зависимости между этими параметрами. При прокатке в вытяжных калибрах увеличение обжатия при прочих равных условиях приводит к увеличению заполнения калибра металлом, а это всегда ведет к уменьшению доли поперечной деформации в связи с возрастанием сопротивления поперечному течению металла со стороны наклонных стенок калибра.

*Диаметр валков.* С увеличением диаметра валков растет длина зоны контакта и, следовательно, увеличивается сопротивление продольному течению металла. В связи с этим влияние диаметра прокатных валков на уширение при прокатке вполне однозначно, а именно, чем больше диаметр валков, тем при прочих равных условиях больше поперечная деформация прокатываемой полосы. Уменьшение вытяжки при прокатке в валках большего диаметра отражено, в частности, в известном среди прокатчиков афоризме: "малые валки тянут, большие — куют".

*Размеры и форма калибров.* При прокатке в вытяжных калибрах поперечная деформация, благодаря подпирающему действию стенок калибра, меньше, чем при прокатке в гладких валках. При этом, чем больше угол наклона стенок калибра к оси валка и их подпирающее воздействие, тем меньше величина поперечной деформации и больше вытяжка.

*Трение между прокатываемой полосой и валками.* Уменьшение шероховатости поверхности прокатных валков, применение при прокатке различных технологических смазок, снижающих трение в зоне контакта металла с валками, уменьшает уширение при прокатке. По-видимому, это объясняется тем, что при уменьшении трения критическое сечение смещается в сторону выхода из валков, зона опе-

режения уменьшается и, следовательно, уменьшается сопротивление течению металла в продольном направлении, что и приводит в результате к увеличению продольной и соответственно к уменьшению поперечной деформации.

Практика показывает, что эффективность применения технологических смазок в значительной степени зависит от наличия на поверхности полосы окалина и качества поверхности валков. Чем грубее окалина и ниже чистота поверхности валков, тем меньше сказывается применение смазки на условия трения в зоне контакта и тем, следовательно, меньше ее эффективность. В частности, изменение жирности эмульсии, применяемой в качестве технологической смазки при прокатке катанки из цветных металлов и сплавов на литейно-прокатных агрегатах, особенно заметно сказывается в последних клетях стана, где на поверхности полосы практически отсутствует окалина, а чистота поверхности валков обычно выше, чем в черновых клетях. Именно в чистовых клетях повышение жирности эмульсии наиболее часто приводит к пробуксовкам полосы в валках и, как следствие, к "бурежкам" полосы, в то время как пробуксовки в черновых клетях наблюдаются крайне редко, хотя величина обжатия и угол захвата здесь гораздо выше.

*Температура и скорость прокатки.* Общепринято считать, что влияние температуры и скорости прокатки на соотношение деформаций определяется тем, в какой степени изменение этих параметров сказывается на условиях трения в зоне контакта металла с валками. Поверхностное трение в зоне деформации при горячей прокатке зависит не только от шероховатости валков и применения технологических смазок, но и от наличия, физических свойств и толщины слоя окалины на поверхности полосы, что в значительной степени определяется ее температурой и условиями нагрева (продолжительность нагрева, характер печной атмосферы). Именно влияние условий нагрева является, по-видимому, основной причиной того, что экспериментальные данные, полученные различными авторами, относительно влияния на уширение температуры прокатки столь разноречивы. Тем не менее большинство исследований, а также практика работы на прокатных станах показывают, что для многих марок стали повышение температуры в пределах температурного интервала горячей прокатки приводит к уменьшению поперечной деформации.

Экспериментальные исследования влияния температуры прокатки на уширение меди и алюминия, выполненные разными авторами, показали, что для меди повышение температуры в диапазоне от 700 до 900°C приводит к уменьшению уширения и, наоборот, уширение алюминия в диапазоне горячей прокатки (350 ÷ 550°C) увеличивается с ростом температуры.



Влияние скорости на уширение так же, как и температуры, обусловлено изменением условий трения при изменении скорости прокатки: чем выше скорость прокатки, тем меньше силы трения на контакте с валками, а отсюда меньше и поперечная деформация.

*Вид прокатываемого материала.* Известно, что разные металлы и марки стали имеют различную склонность к уширению. В частности, легированные стали уширяются, как правило, больше, чем углеродистые. Что же касается цветных металлов, то по имеющимся данным при горячей прокатке (в пределах своих температурных диапазонов) медь уширяется примерно так же, как углеродистая сталь, а алюминий несколько больше, чем медь. Причина этого явления заключается в различии физических свойств как самого металла, так и слоя окалины на поверхности полосы.

Несмотря на имеющийся в литературе обширный экспериментальный материал и обилие расчетных формул, вопрос уширения при прокатке не может считаться изученным в степени, достаточной для решения конкретных задач прокатного производства и, в частности, для расчета калибровок валков. Причин здесь несколько.

Прежде всего следует отметить, что большинство экспериментальных исследований и имеющихся формул для расчета уширения, в том числе и приведенные выше, относятся к простейшему случаю прокатки полосы прямоугольного сечения в гладких валках. Это объясняется не только большей простотой выполнения экспериментов и анализа полученных результатов по сравнению с прокаткой в калибрах, но также и методологическим подходом, в соответствии с которым расчет калибров сводится к расчету деформации условной полосы прямоугольного сечения, прокатываемой в гладких валках.

Другое важное обстоятельство, затрудняющее практическое использование имеющихся экспериментальных данных по уширению в расчетах калибровок валков, заключается в самом показателе поперечной деформации, принятом в этих исследованиях. В большинстве работ в качестве меры поперечной деформации принимается абсолютное уширение  $\Delta b = b_1 - b_0$  (где  $b_0, b_1$  — ширина полосы соответственно до и после прокатки), либо относительное уширение  $\beta_y = \Delta b / b_0$ .

Величина абсолютного или относительного приращения ширины полосы может служить в качестве меры поперечной деформации только для случая прокатки полосы прямоугольного либо квадратного сечения в гладких валках, да и то если предположить равномерность этого приращения по высоте полосы. Только в этом случае при известных исходных размерах полосы и величине обжатия значения  $\Delta b$  и  $\beta_y$  однозначно определяют величину поперечной деформации.

В реальных условиях уширение по высоте полосы не бывает равномерным и под величиной  $b_1$  подразумевается обычно максимальная по высоте сечения ширина прокатанной полосы. В этом случае ни абсолютное, ни относительное приращение ширины не могут служить мерой поперечной деформации даже для полос прямоугольного и квадратного сечения, поскольку они зависят не только от величины поперечной деформации, но и от формы боковой поверхности полосы после прокатки — ее бочкообразности.

При прокатке в калибрах приращение ширины тем более не может быть мерой поперечной деформации, так как в зависимости от формы калибра и степени заполнения его металлом можно получить большее увеличение ширины полосы при меньшей поперечной деформации, и наоборот. Поэтому в качестве показателя уширения правильнее использовать не абсолютное или относительное приращение ширины, а величину отношения объема металла, смещенного в поперечном направлении, ко всему смещенному при прокатке объему металла. Назовем это отношение коэффициентом поперечной деформации, или сокращенно коэффициентом уширения  $c_y$ , который выражает не просто приращение ширины, а долю поперечной деформации в общей деформации прокатываемой полосы.

Таким образом, коэффициент  $c_y$  является наиболее общей формой представления уширения и в отличие от других показателей всегда однозначно определяет величину поперечной деформации при прокатке как в гладких валках, так и в калибрах, независимо от формы и размеров прокатываемой полосы.

Очевидно, что при прокатке без межклетового натяжения (подпора) величина коэффициента уширения всегда находится в пределах  $0 < c_y < 1$ : при  $c_y = 0$  — уширение отсутствует, полоса имеет максимальную вытяжку; при  $c_y = 1$  — весь смещенный объем металла идет в уширение, вытяжка полосы отсутствует.

Величину продольной деформации можно представить как  $1 - c_y$ .

Следует сказать, что такое представление величины поперечной деформации при прокатке не является совершенно новым. В частности, соотношение между объемами, смещенными в ширину и по высоте полосы, рассматривалось в качестве меры уширения И.Я.Тарновским. Однако подобных работ сравнительно немного и выглядят они скорее исключением из общепринятого правила выражать поперечную деформацию полосы как приращение ее ширины.

В некоторых работах в качестве меры поперечной деформации рассматривается отношение приращения ширины полосы к обжатию  $\Delta b / \Delta h$ , называемое обычно показателем уширения. Использование отношения  $\Delta b / \Delta h$  в качестве меры поперечной деформации можно считать обоснованным при прокатке полосы квадратного сечения в гладких валках, причем если уширение по высоте полосы

будет равномерным. Только в этом случае это отношение имеет определенный физический смысл, показывая долю поперечной деформации в общей деформации полосы в валках. Во всех остальных случаях прокатки показатель  $\Delta b/\Delta h$  не отражает фактического соотношения между поперечной и продольной деформациями. Действительно, даже для простейшего случая прокатки полосы прямоугольного сечения в гладких валках можно легко подобрать такое соотношение между ее шириной и высотой, при котором этот показатель окажется больше единицы, что противоречит физическому смыслу уширения как части общей деформации полосы.

Величина объемов металла, смещаемых в продольном и поперечном направлениях, вследствие постоянства объема металла при пластической деформации, эквивалентна соответствующим изменениям площади поперечного сечения прокатываемой полосы. Отсюда в соответствии с определением, приведенным выше, коэффициент уширения для профиля любой конфигурации будет равен

$$c_y = \Delta F_y / \Delta F, \quad (2.4)$$

где  $\Delta F_y$  — приращение площади поперечного сечения полосы за счет уширения;  $\Delta F$  — смещенная при прокатке площадь сечения полосы.

Поскольку при прокатке всегда происходит уменьшение площади поперечного сечения полосы за счет вытяжки, то приращение площади  $\Delta F_y$  следует рассматривать в качестве условного, т.е. как превышение фактической площади сечения полосы по сравнению с той, которую имела бы полоса после пропуска при отсутствии поперечной деформации.

Приращение площади полосы за счет уширения можно представить как

$$\Delta F_y = F_1 - F_{01}. \quad (2.5)$$

Смещенная при прокатке площадь полосы равна

$$\Delta F = F_0 - F_{01}, \quad (2.6)$$

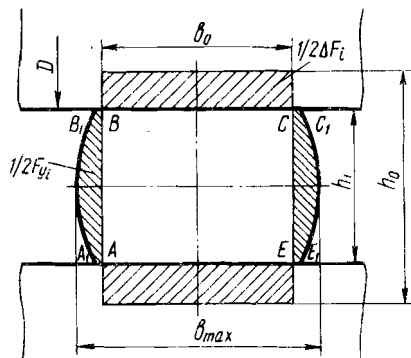


Рис. 8. Деформация прямоугольной полосы в гладких валках

где  $F_0$ ,  $F_1$  — площади сечения полосы соответственно до и после пропуска;  $F_{01}$  — площадь сечения полосы после прокатки при отсутствии поперечной деформации.

Графически площадь сечения  $F_{01}$  представляет собой площадь металла, ограниченную контурами данного калибра, а в местах, соответствующих разъемам валков, контурами исходного сечения.

Для иллюстрации вышесказанного рассмотрим в качестве примера простейший случай прокатки полосы прямоугольного сечения в гладких валках (рис. 8). Принимаем, что полоса сечением  $F_0 = h_0 b_0$  обжимается за один проход до сечения  $F_1 = h_1 b_1$ , тогда площадь сечения  $F_{01}$  будет равна  $F_{01} = F_{ABCE} = h_1 b_0$ ; смещенная площадь металла  $\Delta F = F_0 - F_{ABCE} = F_0 - h_1 b_0$ ; приращение площади полосы за счет уширения  $\Delta F_y = F_{A_1 B_1 C_1 E_1} - F_{ABCE} = F_1 - h_1 b_0$ .

Величина коэффициента уширения

$$c_y = (F_1 - h_1 b_0) / (F_0 - h_1 b_0). \quad (2.7)$$

Представление уширения как приращение площади особенно удобно при расчетах калибровок непрерывных станов. Это связано с необходимостью соблюдения в расчетах основного условия непрерывной прокатки — закона постоянства секундных объемов металла по клетям, выражаемого через площади поперечного сечения прокатываемой полосы.

## 2. ОПЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ПРОКАТКЕ; ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАТАЮЩИХ ДИАМЕТРОВ

Превышение скорости выхода металла из валков над их окружной скоростью называется опережением. В соответствии с этим величину опережения можно представить как  $s = (v_1 - v_b) / v_b$ , где  $v_1$  — скорость выхода металла из валков;  $v_b$  — окружная скорость валков.

Наряду с уширением опережение является тем параметром, от точности определения которого зависит соответствие заданного режима натяжений тому режиму, который действительно создается в непрерывном стане во время работы, а также совпадение расчетных и фактических вытяжек в клетях. Кроме того, опережение, точнее его способность изменяться под действием межклетевых продольных сил, является фактором самовыравнивания скоростей металла в стане и, следовательно, определяет запас устойчивости процесса непрерывной прокатки. В связи с этим становится понятным то большое внимание, которое уделялось и уделяется изучению явления опережения и созданию способов его расчета многими исследователями процесса прокатки.

При прокатке в калибрах опережение металла является величи-

ной переменной по ширине калибра. Это происходит оттого, что точки на валке по периметру калибра имеют различные окружные скорости в зависимости от радиуса валка в данной точке, в то время как металл в каждом поперечном сечении очага деформации движется с некоторой средней скоростью, величина которой определяется условиями прокатки (диаметр валков, величина обжатия, внешнее трение и т.д.). Поэтому здесь, в отличие от прокатки в гладких валках, при расчете скоростей металла удобнее вместо опережения пользоваться понятием "катающий диаметр" или "катающий радиус", подразумевая под этим радиус вращения некоторой точки, окружная скорость которой равна скорости выхода металла из данного калибра. Очевидно, что катающий радиус в зависимости от условий деформации, формы и размеров прокатываемой полосы и калибра, а также величины межклетевых сил может быть равен радиусу любой точки образующей калибра, быть больше радиуса валка по бурту или же быть меньше наименьшего радиуса валка, соответствующего вершине калибра.

Величину катающего диаметра валка находим совместным решением уравнения равновесия горизонтальных проекций внешних сил, действующих на металл в очаге деформации, и уравнения постоянства секундных объемов. Принимая во внимание, что прокатка на непрерывных сортовых и проволочных станах проводится при минимальных натяжениях, наличие которых необходимо только для предупреждения появления межклетевого подпора, расчет кинематических и силовых параметров можно выполнять исходя из условий свободной прокатки, т.е. без межклетевых продольных сил.

Если пренебречь влиянием уширения, то при отсутствии натяже-

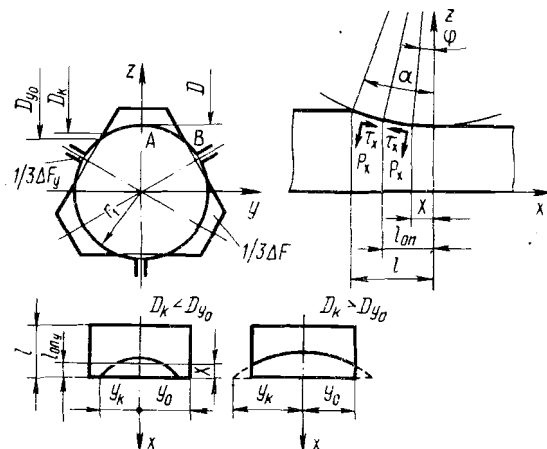


Рис. 9. Схема действия внешних сил и опережение при прокатке в калибре

ний уравнение равновесия проекций внешних сил, действующих со стороны валка на направление движения металла в координатах  $x, y, z$  (рис. 9), независимо от числа валков, образующих калибр, имеет вид:

$$\iint_{S_k} (\tau_x - p_x \operatorname{tg} \varphi) dx dy - 2 \iint_{S_{оп}} \tau_x dx dy = 0, \quad (2.8)$$

где  $\tau_x, p_x$  — касательные и нормальные напряжения на поверхности контакта полосы с валками.

Принимаем, что взаимодействие между прокатываемой полосой и валками в зоне деформации соответствует условию сухого трения, т.е. трения скольжения между телами, поверхности которых не подвергаются смазке. В этом случае в каждой точке контактной поверхности касательные напряжения пропорциональны нормальным контактным напряжениям

$$\tau_x = \mu p_x,$$

где  $\mu$  — коэффициент трения на контактной поверхности валка и прокатываемой полосы.

Коэффициент трения при горячей прокатке зависит от состояния поверхности валков и прокатываемой полосы, вида прокатываемого материала, наличия смазки в зоне контакта, температуры и скорости прокатки. Величину коэффициента трения определяют либо с помощью эмпирических формул, либо используя имеющиеся экспериментальные данные.

Известной формулой для определения коэффициента трения при горячей прокатке углеродистой стали при температурах больших  $700^\circ\text{C}$  является формула Экелунда, полученная на основе анализа опытных данных о влиянии температуры прокатываемой полосы на величину предельного угла захвата.

Формула Экелунда:

$$\mu = k_1 (1,05 - 0,0005 \cdot t),$$

где  $k_1 = 1,0$  — для стальных и чугунных валков с шероховатой поверхностью;  $k_1 = 0,8$  — для гладких стальных валков из отбеленного чугуна;  $k_1 = 0,55$  — для шлифованных стальных валков;  $t$  — температура прокатки,  $^\circ\text{C}$ .

Ш.Гелеи рекомендует для определения коэффициента трения при горячей прокатке следующие выражения, в которых, кроме температуры полосы, учитывается влияние скорости прокатки ( $v$  — скорость прокатки, м/с):

для стальных валков

$$\mu = 1,05 - 0,0005 t - 0,056 v;$$

для чугунных валков

$$\mu = 0,92 - 0,0005 t - 0,056 v;$$

для шлифованных стальных и чугунных валков

$$\mu = 0,82 - 0,0005 t - 0,056 v.$$

Эти выражения действительны, если окружные скорости вращения валков не превышают 5 м/с и температура прокатки более 700°C. Приняв за основу формулу Экедунда, Б.П.Бахтинов и М.М.Штернов предложили учитывать влияние скорости прокатки и химического состава стали с помощью коэффициентов  $k_2, k_3$ .

Уравнение для коэффициента трения в этом случае имеет следующий вид:  $\mu = k_1 k_2 k_3 (1,05 - 0,0005 t)$ .

Характер изменения коэффициента  $k_2$ , учитывающего влияние скорости прокатки на коэффициент трения при скоростях больших 2 м/с можно представить в виде следующего уравнения, полученного У.Зандером

$$k_2 = 0,4 + 0,6 e^{0,2(2-v)}.$$

Значения коэффициента  $k_3$ , учитывающего влияние химического состава стали, приведены ниже:

Углеродистые, Ст1 .....	1,0
Ледебуритные, РФ1 .....	1,10
Перлитно-мартенситные, ШХ15 .....	1,30
Аустенитные, ХВН4Т9 .....	1,40
Аустенитные с включением феррита или ледебурита, 12Х18Н9Т .....	1,47
Ферритные, 1Х17Ю5 .....	1,55

При горячей прокатке цветных металлов без технологической смазки (валки охлаждаются водой) величина коэффициента трения по данным различных авторов находится в пределах: для меди и алюминия  $\mu = 0,42 \div 0,52$ ; для латуни  $\mu = 0,34 \div 0,45$ .

При горячей прокатке с эмульсией коэффициент трения для меди и алюминия несколько меньше и составляет 0,25 — 0,35.

При прокатке в калибрах длина дуги захвата  $l_y$  изменяется по ширине зоны деформации. Максимальная длина соответствует обычно вершине калибра (исключением является прокатка квадрата в очальном калибре), а по мере приближения к крайним точкам зоны деформации длина дуги захвата уменьшается. Характер изменения протяженности дуги захвата по ширине для всех систем вытяжных калибров выражается сложными уравнениями, что затрудняет интегрирование уравнения (2.8). При этом выражения для катающих диаметров получаются настолько громоздкими, что практически непригодны для использования в расчетах.

Для упрощения решения уравнения (2.8) воспользуемся теоремой о среднем значении интеграла, в соответствии с которой принимаем

$$l_y = l, \quad \operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg} (\alpha/2) = l/D_{\text{ср}},$$

где  $\alpha$  — средний по ширине зоны деформации угол захвата.

В качестве средней ширины горизонтальной проекции зоны дефор-

мации для простоты принимаем величину  $y_0$ , представляющую собой абсциссу точки пересечения контуров данного и предыдущего калибров при наложении их друг на друга в плоскости выхода из валков (расчет координат  $y_0, z_0$  для различных систем калибров приведен в конце главы).

Принимаем также, что касательные и нормальные контактные напряжения распределены по длине и ширине зоны контакта равномерно, т.е.

$$p_x = p_{\text{ср}}, \quad \tau_x = \tau_{\text{ср}} = \mu p_{\text{ср}}.$$

В этом случае в зависимости от величины катающего диаметра ( $D_k$ ) уравнение (2.8) примет следующий вид:

если  $D_k < D_{y_0}$ , то

$$l y_0 \left(1 - \frac{1}{\mu} \frac{l}{D_{\text{ср}}}\right) - 2 \int_0^{y_k} l_{\text{оп}y} dy = 0, \quad (2.9)$$

если  $D_k \geq D_{y_0}$ , то

$$l y_0 \left(1 - \frac{1}{\mu} \frac{l}{D_{\text{ср}}}\right) - 2 \int_0^{y_0} l_{\text{оп}y} dy = 0, \quad (2.10)$$

где  $D_{y_0}$  — диаметр валка в точке с координатами  $y_0, z_0$  (см. рис. 9);  $l_{\text{оп}y}$  — длина зоны опережения.

Среднюю длину горизонтальной проекции дуги захвата можно представить в виде:  $l = \sqrt{\Delta h_{\text{ср}}} D_{\text{ср}}$ .

При расчетах калибровок валков и режимов прокатки удобнее проверять не линейными размерами, а площадями сечений прокатываемой полосы и величинами вытяжек в клетях. Поэтому целесообразно использовать эти же параметры и при определении среднего обжатия в калибре.

В соответствии с этим среднее обжатие от одного валка в калибре выражаем следующим образом:

$$\Delta h_{\text{ср}} = \Delta F / 2 N \beta_0 y_0, \quad (2.11)$$

где  $\Delta F$  — смещенная площадь металла при прокатке;  $N$  — число валков, образующих калибр;  $\beta_0$  — коэффициент, зависящий от формы данного и предыдущего калибра.

Величину коэффициента  $\beta_0$  определяем как

$$\beta_0 = \frac{1}{y_0} \int_0^{y_0} (l_y / l_0) dy,$$

где  $l_0$  — наибольшая по ширине калибра длина дуги захвата;  $l_y$  — длина дуги захвата в сечении  $y - y$ ,  $l_y = \sqrt{\Delta h_y} D_y$ .

Величину обжатия  $\Delta h_y$  можно найти, используя уравнения образующих (контуров) данного и предыдущего калибров. В координатах  $y, z$  (см. рис. 12 — 18) обжатие от одного валка в сечении  $y - y$

будет равно разности значений координаты  $z$  образующих двух последовательных калибров.

Так для  $i$ -того калибра  $\Delta h_{yi} = z_{i-1} - z_i$ .

Диаметр валка в месте калибра можно представить в виде уравнения  $D_{yi} = D_{0i} - 2z_i$ , где  $D_{0i}$  — идеальный диаметр валков в  $i$ -той клетки.

Величину интеграла  $\int_0^{y_0} (l_y/l_0) dy$  можно вычислить одним из приближенных способов; например, с помощью формулы прямоугольников либо графоаналитическим способом.

Здесь произведение  $2\beta_0 y_0$  представляет собой среднюю ширину горизонтальной проекции зоны контакта полосы с валком без учета уширения. Выражая величину смещенной площади металла в соответствии с (4.4), получим следующую формулу для определения средней длины горизонтальной проекции дуги захвата при прокатке в калибре:

$$l = \sqrt{\frac{F_1(\lambda - 1) D_{cp}}{2N\beta_0 y_0 (1 - c_y)}}. \quad (2.12)$$

Примерные значения коэффициента  $\beta_0$ , полученные на основании числового анализа формы контактной поверхности (числитель) при прокатке в различных калибрах (знаменатель), приведены ниже:

Ромб/квадрат .....	0,75
Квадрат/ромб .....	0,75
Квадрат/овал .....	0,85
Овал/квадрат .....	0,85
Овал/круг .....	0,75
Круг/овал .....	0,85
Круг/стрельчатый треугольник .....	0,85
Стрельчатый треугольник/круг .....	0,75
Стрельчатый треугольник/шестиугольник .....	0,75

Для треугольных калибров в системе треугольник — треугольник можно принять  $\beta_0 = 1,0$ .

Величину среднего по ширине зоны деформации диаметра валка определяем как

$$D_{cp} = 0,5(D + D_{y_0}), \quad (2.13)$$

где  $D$  — диаметр валка в вершине калибра.

При прокатке в калибрах положение нейтрального сечения изменяется по ширине калибра, т.е. каждому продольному сечению очага деформации соответствует различная протяженность зоны опережения. Линия равных скоростей прокатываемого металла и валка представляет собой кривую, характер которой зависит от формы калибра.

Уравнение линии равных скоростей найдем из условия постоянства секундных объемов металла в очаге деформации

$$v_x F_x = v_1 F_1, \quad (2.14)$$

где  $v_1, F_1$  — соответственно скорость и площадь сечения полосы при выходе из валков,  $v_1 = R_k \omega$ ;  $\omega$  — угловая скорость валка;  $v_x, F_x$  — скорость и площадь металла в сечении  $x - x$ .

При  $x = l_{опу}$  имеем  $v_x = R_y \omega \cos \gamma_y$ ,  $F_x = F_y$ , где  $R_y, \gamma_y$  — радиус валка и нейтральный угол в сечении  $y - y$ ,  $F_y$  — площадь сечения прокатываемой полосы при  $x = l_{опу}$ .

Для реальных углов захвата величина  $\cos \gamma_y$  близка к единице. Таким образом, при  $x = l_{опу}$ , принимая  $\cos \gamma_y = 1$ , из уравнения (2.14) получим

$$R_k = R_y \frac{F}{F_1}. \quad (2.15)$$

Очевидно, что при отсутствии уширения уравнение изменения площади сечения полосы по длине очага деформации равнозначно уравнению изменения высоты полосы или уравнению дуги захвата. Это справедливо также и при прокатке с уширением в том случае, если считать соотношение между продольной и поперечной деформациями по длине дуги захвата постоянным.

Действительно, при  $c_{yx} = c_y = \text{const}$  площадь полосы в сечении  $x - x$  можно представить как

$$F_x = F_{0x} + c_y (F_0 - F_{0x}), \quad (2.16)$$

где  $F_{0x}$  — площадь полосы в сечении  $x - x$  при отсутствии уширения;  $F_0$  — площадь полосы до прокатки.

Поскольку при отсутствии уширения уменьшение площади сечения полосы по длине очага деформации было бы пропорциональным уменьшению ее средней по ширине калибра высоты, уравнение дуги захвата в калибре с учетом (2.11) можно представить в виде

$$F_{0x} = F_{01} + R_{cp} 2N\beta_0 y_0 (1 - \sqrt{1 - \frac{x^2}{R_{cp}^2}}).$$

Здесь величина  $x^2/R_{cp}^2 \ll 1$  и, следовательно, с достаточной точностью можно считать, что

$$\sqrt{1 - \frac{x^2}{R_{cp}^2}} = 1 - \frac{x^2}{2R_{cp}^2}.$$

Отсюда с учетом (2.12) уравнение дуги захвата при отсутствии уширения будет иметь следующий вид:

$$F_{0x} = F_{01} + \Delta F \frac{x^2}{l^2} = F_{01} + (F_0 - F_{01}) \frac{x^2}{l^2}, \quad (2.17)$$

где  $F_{01}$  — площадь сечения полосы после выхода из валков при отсутствии уширения.

В соответствии с (2.4) площадь  $F_{01}$  можно представить как

$$F_{01} = F_1 - \Delta F_y = F_1 - (F_0 - F_{01}) c_y,$$

отсюда

$$F_{01} = (F_1 - F_0 c_y) / (1 - c_y).$$

После подстановки значений  $F_{0x}$  и  $F_{01}$  в (2.16) и необходимых преобразований получим уравнение дуги захвата при прокатке с уширением

$$F_x = F_1 + (F_0 - F_1)(x^2/l^2). \quad (2.18)$$

Как видим, уравнения для дуги захвата при прокатке с постоянным по длине очага деформации коэффициентом уширения (2.18) и при отсутствии уширения (2.17) эквивалентны.

Из уравнения (2.18) при  $x = l_{опy}$  имеем

$$F_x = F_y = F_1 + (F_0 + F_1) \frac{l_{опy}^2}{l^2}.$$

Подставив сюда значение  $F_y$  из (2.15), получим:

$$l_{опy} = l \sqrt{\frac{D_k - D_y}{(\lambda - 1) D_y}}. \quad (2.19)$$

Для случая прокатки полосы прямоугольного сечения в гладких валках при отсутствии уширения, уравнение (2.19) легко преобразуется в общеизвестную формулу опережения, предложенную Д. Дрезденом.

Действительно, при  $D_y = D$ ,  $c_y = 0$  и  $\lambda = h_0/h_1$ ,  $l = \sqrt{(h_0 - h_1)R}$  имеем  $D_k/D_y = 1 + s$ ,  $l \sqrt{1/(\lambda - 1)} = \sqrt{h_1 R}$ ,  $l_{опy} = R\gamma$ .

После подстановки значения входящих величин в уравнение (2.19) получим формулу опережения Дрездена

$$x = \frac{R}{h_1} \gamma^2. \quad (2.20)$$

В вытяжных калибрах сортовых и проволочных станов изменение диаметра валка в месте калибра составляет обычно несколько процентов его величины и, следовательно, не внося сколько-нибудь заметной погрешности в  $l_{опy}$ , диаметр  $D_y$  в знаменателе первой части уравнения (2.19) можно заменить его средним значением. Это позволит существенно упростить интегрирование уравнений (2.9), (2.10). В этом случае уравнение для определения протяженности зоны опережения будет иметь следующий вид:

$$l_{опy} = l \sqrt{\frac{D_k - D_y}{(\lambda - 1) D_{cp}}}. \quad (2.21)$$

Диаметр валка в месте калибра ( $D_y$ ) определяется уравнением образующей калибра.

Многообразие форм вытяжных калибров, применяемых при прокатке сорта и катанки, может быть сведено к двум основным случаям.

*Первый случай.* В координатах  $y, z$  образующая калибра представляет собой прямую линию, наклоненную под углом  $\beta$  к оси  $y$ . В этом случае в двухвалковой клети имеем ромбический либо, при  $\beta = 45^\circ$ , квадратный калибр. В трехвалковой клети при  $\beta = 30^\circ$  имеем шестиугольный калибр.

Уравнение образующей ромбического калибра имеет вид:

$$D_y = D + 2y \operatorname{tg} \beta, \quad (2.22)$$

где  $D$  — диаметр валка в вершине калибра (при  $y = 0$ ).

При  $y = y_0$

$$D_y = D_{y_0} = D + 2y_0 \operatorname{tg} \beta. \quad (2.23)$$

Таким образом, если  $D_k < D_{y_0}$ , величину  $D_k$  можно представить как

$$D_k = D + 2y_k \operatorname{tg} \beta. \quad (2.24)$$

Для квадратного калибра ( $\beta = 45^\circ$ )  $D_y = D + 2y$ ; при  $y = y_0$

$$D_y = D_{y_0} = D + 2y_0. \quad (2.25)$$

Для трехвалкового шестиугольного калибра ( $\beta = 30^\circ$ )

$$D_y = D + \frac{2}{\sqrt{3}} y, \quad D_{y_0} = D + \frac{2}{\sqrt{3}} y_0.$$

При  $\beta = 0$  имеем гладкие (некалиброванные) валки.

В двухвалковых клетях этому случаю соответствуют либо "бочка", либо ящичные калибры, в трехвалковых — треугольные.

*Второй случай.* В координатах  $y, z$  образующая калибра представляет собой дугу окружности радиуса  $R_{обр}$ .

Уравнение образующей овального калибра имеет вид

$$D_y = D + 2R_{обр} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{y^2}{R_{обр}^2}}\right); \quad (2.26)$$

для круглого калибра

$$D_y = D + 2r_k \left(1 - \sqrt{1 - \frac{y^2}{r_k^2}}\right), \quad (2.27)$$

где  $r_k$  — радиус калибра.

При определении катающих диаметров представление значения  $D_y$  в виде (2.26) либо (2.27) затрудняет интегрирование и значительно усложняет вид конечных формул. Однако задача упрощается, если принять во внимание, что величина отношения  $y^2/R_{обр}^2 \ll 1$ . В этом случае, используя приближенную формулу

$$\sqrt{1 - y^2/R_{обр}^2} = 1 - y^2/2R_{обр}^2,$$

получим следующее уравнение образующей овального калибра

$$D_y = D + (y^2/R_{обр}), \quad D_{y_0} = D + (y_0^2/R_{обр}). \quad (2.28)$$

Как показывает числовая проверка для реальных соотношений размеров прокатываемой полосы и калибра, погрешность, вносимая при этом в величину  $D_y$ , не превышает долей процента. Для круглых калибров эта погрешность несколько больше, однако ошибка в катающем диаметре в этом случае также незначительна.

Таким образом, уравнение образующей круглого калибра будет:

$$D_y = D + (y^2/r_k), \quad D_{y_0} = D + (y_0^2/r_k). \quad (2.29)$$

После подстановки значения  $D_y$  из (2.22) либо (2.28), (2.29) в (2.21), а затем значения  $l_{онy}$  в уравнение (2.9) или (2.10) и интегрирования получим следующие выражения для расчета катающего диаметра при прокатке в вытяжных калибрах:

Для калибров с прямолинейными образующими

Если  $D_k \leq D_{y_0}$  —

$$\frac{D_k}{D} = 1 + \sqrt[3]{\frac{9}{4} \frac{y_0^2}{D^2} (\lambda - 1) \left(1 - \frac{1}{\mu} \frac{l}{D_{cp}}\right)^2 \frac{D_{cp}}{D} \operatorname{tg}^2 \beta}; \quad (2.30)$$

если  $D_k > D_{y_0}$  —

$$\begin{aligned} \frac{D_k}{D} = 1 + \sqrt[3]{\left[\frac{3}{2} \frac{y_0}{D} \left(1 - \frac{1}{\mu} \frac{l}{D_{cp}}\right) \sqrt{(\lambda - 1)} \frac{D_{cp}}{D} \operatorname{tg} \beta + \right.} \\ \left. + \sqrt{\left(\frac{D_k}{D} - \frac{D_{y_0}}{D}\right)^3}\right]^2}. \end{aligned} \quad (2.31)$$

Решение этого уравнения относительно  $D_k/D$  можно получить с помощью метода последовательных приближений. Сложность вычислений катающих диаметров с помощью выражений (2.30), (2.31) заключается в том, что перед началом вычислений неизвестно соотношение между диаметрами  $D_k$  и  $D_{y_0}$ , следовательно, неизвестно, какое из этих выражений следует использовать в данном конкретном случае. Поэтому первоначально катающий диаметр следует рассчитывать с помощью выражения (2.30), предварительно определив из (2.23) величину  $D_{y_0}/D$ . Если в результате окажется, что найденное значение катающего диаметра меньше, чем  $D_{y_0}$  ( $D_k/D < D_{y_0}/D$ ), то расчет можно считать законченным. В случае, если  $D_k/D > D_{y_0}/D$ , то расчет следует продолжать с помощью выражения (2.31), используя в качестве начального приближения полученное значение  $D_k/D$ . Подставив его в первую часть выражения (2.31), найдем новое значение катающего диаметра. Следующее вычисление выполняем, подставляя в правую часть вновь найденное значение катающего диаметра и т.д. Вычисления проводим до тех пор, пока разница значений катающего диаметра, полученных при данном и предыдущем приближениях, будет меньше или равна заданной погрешности.

При прокатке в гладких валках ( $\beta = 0$ )

$$l_{онy} = l_{он} = l \sqrt{\frac{D_k - D}{D(\lambda - 1)}}.$$

Подставляя это значение  $l_{он}$  в уравнение (2.10) и проведя интегрирование, получим:

$$D_k/D = 1 + \frac{1}{4} (\lambda - 1) \left(1 - \frac{1}{\mu} \frac{l}{D}\right)^2. \quad (2.32)$$

Это выражение можно использовать также для предварительных расчетов катающих диаметров при прокатке в калибрах.

Для полос прямоугольного (квадратного) сечения при прокатке в гладких валках и ящичных калибрах

$$\lambda - 1 = \frac{h_0 b_0}{h_1 b_1} - 1 = \frac{h_0 b_0 - h_1 (b_0 + \Delta b)}{h_1 (b_0 + \Delta b)},$$

где среднее по высоте приращение ширины полосы за счет поперечной деформации можно представить как

$$\Delta b = \Delta F_y / h_1 = b_0 \Delta h c_y / h_1.$$

Отсюда выражение для катающего диаметра будет иметь следующий вид:

$$\frac{D_k}{D} = 1 + \frac{\Delta h (1 - c_y)}{4 h_1 (1 + \Delta h c_y / h_1)} \left(1 - \frac{1}{\mu} \sqrt{\Delta h / 2D}\right)^2, \quad (2.33)$$

где  $\Delta h$  — величина обжатия;  $\Delta h = h_0 - h_1$ .

Если в (2.33) пренебречь уширением ( $c_y = 0$ ), будем иметь:

$$\frac{D_k}{D} = 1 + \frac{\Delta h}{4 h_1} \left(1 - \frac{1}{\mu} \sqrt{\Delta h / D}\right)^2.$$

Легко проверить, что данное выражение может быть получено совместным решением уравнения С.Экелунда для протяженности зоны опережения и формулы Дрездена для опережения (2.20).

Для калибров с криволинейными образующими

Для овальных и стрелчатых треугольных калибров, если  $D_k < D_{y_0}$ ,

$$\frac{D_k}{D} = 1 + \frac{2}{\pi} \frac{y_0}{D} \left(1 - \frac{l}{\mu D_{cp}}\right) \sqrt{(\lambda - 1)} \frac{D_{cp}}{R_{обр}}; \quad (2.34)$$

если  $D_k > D_{y_0}$ ,

$$\begin{aligned} \frac{D_k}{D} = 1 + \frac{y_0}{D \arcsin \sqrt{(D_{y_0} - D) / (D_k - D)}} \times \\ \times \left[ \left(1 - \frac{1}{\mu} \frac{l}{D_{cp}}\right) \sqrt{(\lambda - 1)} \frac{D_{cp}}{R_{обр}} - \sqrt{\frac{D_k - D_{y_0}}{R_{обр}}} \right]. \end{aligned} \quad (2.35)$$

Для круглых двухвалковых и трехвалковых калибров, если  $D_K < D_{y_0}$ ,

$$\frac{D_K}{D} = 1 + \frac{2}{\pi} \frac{y_0}{D} \left(1 - \frac{l}{\mu D_{cp}}\right) \sqrt{(\lambda - 1)} \frac{D_{cp}}{r_K}; \quad (2.36)$$

если  $D_K > D_{y_0}$ ,

$$\frac{D_K}{D} = 1 + \frac{y_0}{D \arcsin \sqrt{(D_{y_0} - D)/(D_K - D)}} \times \\ \times \left[ \left(1 - \frac{l}{\mu D_{cp}}\right) \sqrt{(\lambda - 1)} \frac{D_{cp}}{r_K} - \sqrt{\frac{D_K - D_{y_0}}{r_K}} \right]. \quad (2.37)$$

При  $D_K = D_{y_0}$  из (2.32) для овальных, стрельчатых треугольных и круглых калибров —

$$\frac{D_K}{D} = 1 + 0,4 (\lambda - 1) \left(1 - \frac{l}{\mu D_{cp}}\right)^2. \quad (2.38)$$

Вычисления катающих диаметров выполняются в следующей последовательности. Первоначально расчет производится с помощью выражений (2.34), (2.36), затем делается сравнение вычисленного значения  $D_K$  с величиной диаметра  $D_{y_0}$ , предварительно найденной из выражений (2.28), (2.26). В случае, если  $D_K \leq D_{y_0}$ , расчет считается законченным, если же  $D_K > D_{y_0}$ , для дальнейших расчетов используются уравнения (2.35), (2.37) и вычисления проводятся с помощью метода последовательных приближений. В качестве начального приближения используется значение  $D_K$ , найденное ранее из (2.34) либо (2.36). Подставляя это значение  $D_K (D_K^{(0)})$  в правую часть уравнений (2.35), (2.37), находим новое значение катающего диаметра  $D_{K.p}^{(0)}$ . В качестве следующего при-

ближения используется величина  $D_K$ , равная  $D_K^{(1)} = 1/2 (D_K^{(0)} + D_{K.p}^{(0)})$ . При следующей операции вычисления в качестве последующего приближения используется значение

$$D_K^{(2)} = 1/2 (D_K^{(1)} + D_{K.p}^{(1)}). \quad \text{и т.д.}$$

Вычисления повторяем до тех пор, пока значения катающего диаметра двух соседних приближений не будут достаточно близки друг другу.

Для упрощения вычислений катающего диаметра в случае, если его величина, найденная из выражений (2.30), (2.34) или (2.36), окажется больше диаметра валка в точке с координатами  $y_0, z_0$ , т.е. при  $D_K^{(0)} > D_{y_0}$ , можно пользоваться кривыми, представленными на рис. 10 и 11. В этом случае величину катающего диаметра определяем из выражения

$$\frac{D_K}{D} = 1 + \left(\frac{D_K^{(0)}}{D} - 1\right) \delta, \quad (2.39)$$

где  $D_K^{(0)}$  — значение катающего диаметра, найденное в зависимости от формы калибра из выражений (2.30) или (2.34), (2.36);  $\delta$  — поправочный коэффициент.

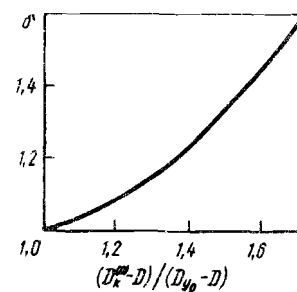


Рис. 10. Величина коэффициента  $\delta$  для калибров с прямолинейными образующими

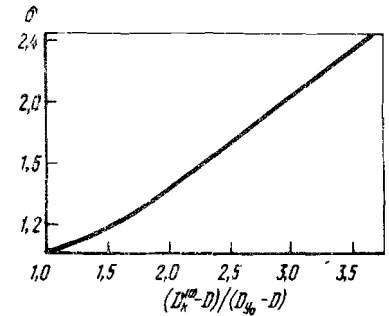


Рис. 11. Величина коэффициента  $\delta$  для калибров с криволинейными образующими

Значение коэффициента  $\delta$  в зависимости от величины отношения  $D_K^{(0)} - D / (D_{y_0} - D)$  и формы калибра находим из графиков, приведенных на рис. 10, 11.

Значения координат  $y_0, z_0$  точки пересечения контуров данного и предыдущего калибров при наложении их друг на друга в плоскости выхода из валков находим совместным решением уравнений образующих калибров.

Система ромб — квадрат (рис. 12)

Ромбический калибр. Уравнение образующей  $i$ -того ромбического калибра имеет вид

$$z = 1/2 h_{ki} - y \operatorname{tg} \beta_i. \quad (2.40)$$

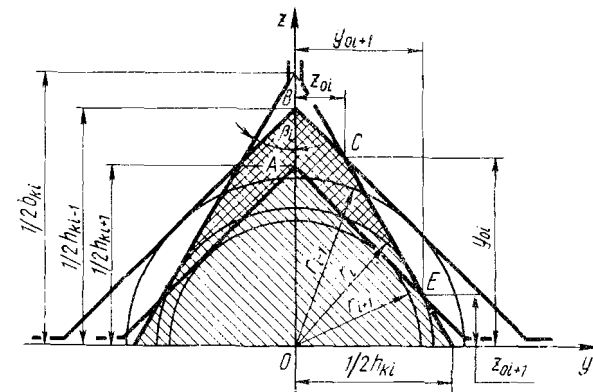


Рис. 12. К расчету координат  $y_0, z_0$  для калибров системы ромб — квадрат



Уравнение образующих  $(i - 1)$ -го и  $(i + 1)$ -го квадратных калибров соответственно

$$z = \frac{1}{2} h_{\kappa i-1} - y; \quad (2.41)$$

$$z = \frac{1}{2} h_{\kappa i+1} - y. \quad (2.42)$$

Приравняв правые части уравнений (2.40), (2.41), получим

$$\left. \begin{aligned} y_{0i} &= \frac{h_{\kappa i-1} - h_{\kappa i}}{2(1 - \operatorname{tg} \beta_i)}, \\ z_{0i} &= \frac{h_{\kappa i} - h_{\kappa i-1} \operatorname{tg} \beta_i}{2(1 - \operatorname{tg} \beta_i)}. \end{aligned} \right\} \quad (2.43)$$

**Квадратный  $(i + 1)$ -й калибр.** Уравнение образующей предшествующего ромбического калибра

$$z = \left( \frac{1}{2} h_{\kappa i} - y \right) \frac{1}{\operatorname{tg} \beta_i}.$$

С учетом уравнения (2.42) имеем

$$\left. \begin{aligned} y_{0i+1} &= \frac{h_{\kappa i} - h_{\kappa i+1} \operatorname{tg} \beta_i}{2(1 - \operatorname{tg} \beta_i)}, \\ z_{0i+1} &= \frac{h_{\kappa i+1} - h_{\kappa i}}{2(1 - \operatorname{tg} \beta_i)}. \end{aligned} \right\} \quad (2.44)$$

Система овал — квадрат (рис. 13)

**Овальный калибр.** Очевидно, что  $y_{0i} = \frac{1}{2} h_{i-1}$ . Уравнение образующей  $i$ -того овального калибра

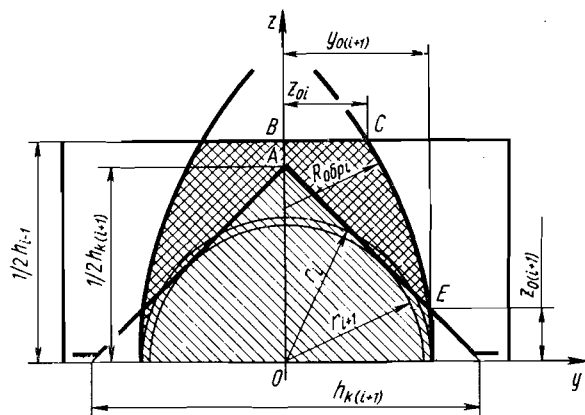


Рис. 13. К расчету координат  $y_0, z_0$  для калибров системы овал — квадрат

$$y^2 + (z + R_{обр i} - \frac{1}{2} h_{\kappa i})^2 = R_{обр i}^2.$$

Отсюда при  $y = y_{0i} = \frac{1}{2} h_{i-1}$

$$z = z_{0i} = \frac{1}{2} h_{\kappa i} + \sqrt{R_{обр i}^2 - \frac{1}{4} h_{i-1}^2} - R_{обр i}, \quad (2.45)$$

где  $h_{\kappa i}$  — высота овального калибра.

**Квадратный калибр.** Уравнения образующих  $(i + 1)$ -го квадратного и предшествующего овального калибров соответственно

$$z = \frac{1}{2} h_{\kappa i+1} - y;$$

$$z^2 + (y + R_{обр i} - \frac{1}{2} h_{\kappa i})^2 = R_{обр i}^2.$$

Решая их совместно, получим

$$\left. \begin{aligned} y_{0i+1} &= 0,5 \left[ \frac{h_{\kappa i+1} + h_{\kappa i}}{2} - R_{обр i} + \sqrt{2R_{обр i}^2 - \left( R_{обр i} + \frac{h_{\kappa i+1} - h_{\kappa i}}{2} \right)^2} \right]; \\ z_{0i+1} &= 0,5 \left[ R_{обр i} + \frac{h_{\kappa i+1} - h_{\kappa i}}{2} - \sqrt{2R_{обр i}^2 - \left( R_{обр i} + \frac{h_{\kappa i+1} - h_{\kappa i}}{2} \right)^2} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (2.46)$$

Система овал — круг (рис. 14)

**Овальный калибр.** Уравнение образующей  $i$ -того овального калибра

$$y^2 + [z + R_{обр i} - r_i]^2 = R_{обр i}^2.$$

Уравнение образующей предыдущего  $(i - 1)$ -го круглого калибра

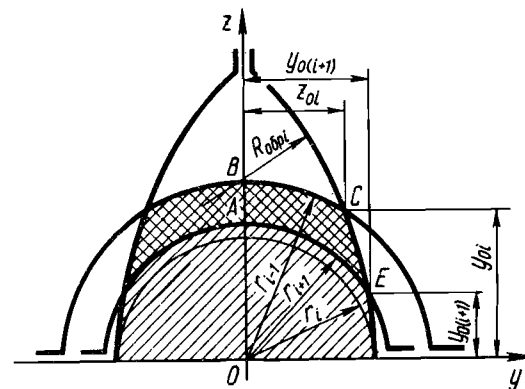


Рис. 14. К расчету координат  $y_0, z_0$  для калибров системы овал — круг

$$y^2 + z^2 = r_{i-1}^2.$$

Решая уравнения совместно, получим

$$\begin{aligned} y_{0i} &= \sqrt{r_{i-1}^2 - z_{0i}^2}; \quad z_{0i} = r_i \times \\ &\times \left( 2 \frac{R_{обр i}}{r_i} - 1 - \frac{d_{i-1}^2}{d_i^2} \right) / 2 \left( \frac{R_{обр i}}{r_i} - 1 \right). \end{aligned} \quad (2.47)$$

**Круглый калибр.** Уравнение образующей  $(i+1)$ -го круглого калибра

$$y^2 + z^2 = r_{i+1}^2.$$

Уравнение образующей  $i$ -того овального калибра

$$[y + R_{обр i} - r_i]^2 + z^2 = R_{обр i}^2.$$

Решая уравнения совместно, получим

$$\left. \begin{aligned} y_{0i+1} &= r_i \left( 2 \frac{R_{обр i}}{r_i} - \frac{r_{i+1}^2}{r_i^2} - 1 \right) / 2 \left( \frac{R_{обр i}}{r_i} - 1 \right); \\ z_{0i+1} &= r_{i+1} \sqrt{1 - \frac{y_{0i+1}^2}{r_{i+1}^2}}. \end{aligned} \right\} \quad (2.48)$$

**Система стрелчатый треугольник – круг**

**Стрелчатый треугольный калибр (рис. 15).** Уравнение образующей  $i$ -того стрелчатого треугольного калибра

$$y^2 + [z + R_{обр i} - r_i]^2 = R_{обр i}^2.$$

Уравнение предыдущего круглого калибра имеет вид:

$$y^2 + z^2 = r_{i-1}^2.$$

Решая эти уравнения совместно, найдем

$$\begin{aligned} y_{0i} &= \sqrt{r_{i-1}^2 - z_{0i}^2}; \quad z_{0i} = r_i \times \\ &\times \left( 2 \frac{R_{обр i}}{r_i} - 1 - \frac{r_{i-1}^2}{r_i^2} \right) / 2 \left( \frac{R_{обр i}}{r_i} - 1 \right). \end{aligned} \quad (2.49)$$

**Круглый калибр (рис. 16).** Как видно из рис. 16,

$$y_{0i+1} = r_{i+1} \sin \alpha_1.$$

$$\text{где } \alpha_1 = \frac{\pi}{3} - \alpha_2 = \frac{\pi}{3} - \arcsin \frac{y'_{0i+1}}{r_{i+1}}.$$

Отсюда

$$y_{0i+1} = r_{i+1} \sin \left( \frac{\pi}{3} - \arcsin \frac{y'_{0i+1}}{r_{i+1}} \right); \quad (2.50)$$

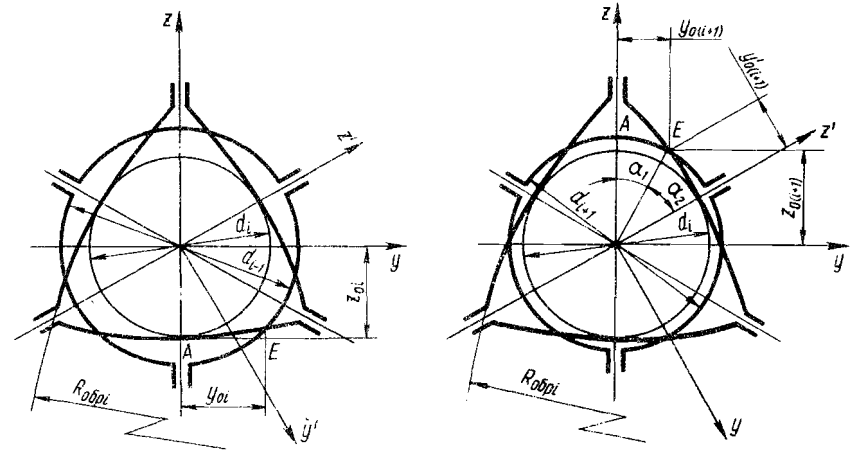


Рис. 15. К расчету координат  $y_{0i}, z_{0i}$  стрелчатого треугольного калибра (система стрелчатый треугольник – круг)

Рис. 16. К расчету координат  $y_{0i+1}, z_{0i+1}$  круглого трехвалкового калибра (система стрелчатый треугольник – круг)

$$\begin{aligned} z_{0i+1} &= r_{i+1} \sqrt{1 - \sin^2 \left( \frac{\pi}{3} - \arcsin \frac{y'_{0i+1}}{r_{i+1}} \right)} = \\ &= r_{i+1} \cos \left( \frac{\pi}{3} - \arcsin \frac{y'_{0i+1}}{r_{i+1}} \right). \end{aligned} \quad (2.51)$$

Величину  $y'_{0i+1}$  находим совместным решением уравнений образующих  $(i+1)$ -го круглого калибра и  $i$ -того стрелчатого треугольного калибра в координатах  $y'z'$ .

Уравнение образующей круглого калибра

$$y'^2 + z'^2 = r_{i+1}^2.$$

Уравнение образующей стрелчатого треугольного калибра

$$y'^2 + [z + R_{обр i} - r_i]^2 = R_{обр i}^2.$$

Решая эти уравнения совместно, найдем

$$\begin{aligned} y'_{0i+1} &= r_i \sqrt{r_{i+1}^2 / r_i^2 - (2R_{обр i} - r_i - \frac{r_{i+1}^2}{r_i})^2 / 4 \times} \\ &\times (R_{обр i} - r_i)^2. \end{aligned} \quad (2.52)$$

Как видно из рис. 17, в треугольном калибре при прокатке по схеме треугольник — треугольник имеем

$$\begin{aligned} y_{0i} &= AD \operatorname{tg} 30^\circ = (OD - OA) \operatorname{tg} 30^\circ = \frac{1}{\sqrt{3}} (d_{i-1} - \frac{1}{2} d_i); \\ z_{0i} &= \frac{1}{2} d_i. \end{aligned} \quad (2.53)$$

При прокатке по схеме треугольник — круг (рис. 18) координаты точки пересечения образующей данного круглого калибра с образующей предыдущего треугольного калибра находим следующим образом:

уравнение образующей  $(i+1)$ -го круглого калибра —

$$y^2 + z^2 = r_{i+1}^2;$$

уравнение образующей предыдущего треугольного калибра —

$$z = d_i - y \sqrt{3}.$$

Решая эти уравнения совместно, найдем

$$y_{0i+1} = \frac{\sqrt{3}}{2} r_i \left[ 1 - \sqrt{\frac{1}{3} \left( \frac{r_{i+1}^2}{r_i^2} - 1 \right)} \right]; \quad (2.54)$$

$$z_{0i+1} = \frac{1}{2} r_i \left[ 1 + \sqrt{3 \left( \frac{r_{i+1}^2}{r_i^2} - 1 \right)} \right]. \quad (2.55)$$

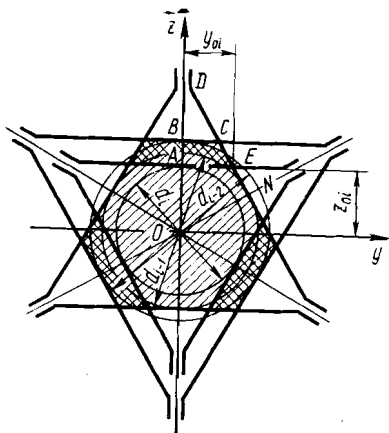


Рис. 17. К расчету координат  $y_{0i}, z_{0i}$  треугольного калибра (система треугольник — треугольник)

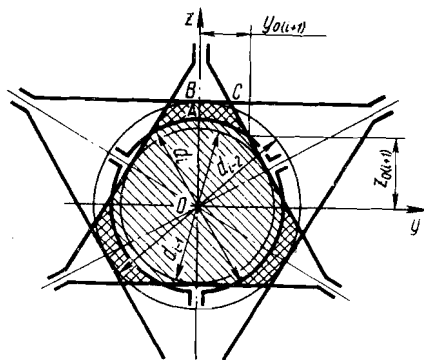


Рис. 18. К расчету координат  $y_{0i+1}, z_{0i+1}$  круглого трехвалкового калибра (система треугольник — треугольник — круг)

### 3. РАСЧЕТ СКОРОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ ВАЛКОВ НЕПРЕРЫВНОГО СТАНА

Как уже отмечалось в предыдущей главе, для непрерывных станов с индивидуальным приводом клеток в качестве меры деформации в калибре обычно принимается величина вытяжки. В этом случае определение скоростей вращения валков в клетях стана является заключительным этапом расчета калибровки и выполняется после того, как найдены размеры калибров.

Расчет скоростей вращения валков выполняется последовательно, начиная с последней клетки стана, скорость выхода полосы из которой предполагается известной.

Скорость вращения валков последней клетки определяется по формуле

$$\eta_n = 60 v_n / (\pi D_{\kappa n}), \quad (2.56)$$

где  $v_n, D_{\kappa n}$  — скорость прокатки и величина катающего диаметра в последней клетки стана.

Скорость вращения валков остальных клеток определяется из условия постоянства секундных объемов металла по клетям.

В соответствии с этим скорость вращения валков предпоследней клетки стана определяется как

$$\eta_{n-1} = \frac{60 v_n}{\pi D_{\kappa n-1} \lambda_n},$$

где  $\lambda_n$  — вытяжка в последней клетки стана.

Для любой предшествующей клетки имеем

$$\eta_i = \frac{60 v_n}{\pi D_{\kappa i} \lambda_n \lambda_{n-1} \dots \lambda_{i-1}}. \quad (2.57)$$

При выборе режимов обжатий для непрерывных станов с общим приводом в качестве меры деформации в калибрах удобнее принимать не вытяжку, а величину соотношения скоростей вращения валков соседних клеток или, иначе, кинематический коэффициент скорости. Вытяжки в клетях, а следовательно и площади поперечного сечения прокатываемой полосы, определяются в этом случае по принятым значениям кинематических коэффициентов скорости.

На основании закона постоянства секундных объемов металла по клетям при непрерывной прокатке площадь металла в  $i$ -той клетки может быть выражена следующим образом:

$$F_i = F_{i+1} \eta_{i+1} \frac{D_{\kappa i+1}}{D_{\kappa i}}, \quad (2.58)$$

где  $F_{i+1}, \eta_{i+1}$  — площадь металла и кинематический коэффициент скорости валков в  $(i+1)$ -й клетки,  $\eta_{i+1} = v_{i+1}/v_i$ .

Вытяжка в  $(i+1)$ -й клетки

$$\lambda_{i+1} = \frac{F_i}{F_{i+1}} = \eta_{i+1} \frac{D_{ki+1}}{D_{ki}}. \quad (2.59)$$

Уравнения для катающих диаметров содержат значения вытяжек в клетях, а также другие параметры, величина которых зависит от размеров и формы калибров, в том числе длина и ширина зоны контакта металла с валком, диаметры вала в вершине калибра и в точке, соответствующей средней ширине зоны контакта ( $D_{cp}$ ). Таким образом, для определения площади сечения металла и вытяжек по клетям непрерывного стана с общим приводом необходимо решить систему уравнений, составленных для всех клеток стана, включающую в себя уравнения для катающих диаметров, уравнения для определения размеров калибров и коэффициентов уширения, а также уравнения, выражающие постоянство секундных объемов металла по клетям. Решение системы уравнений может быть найдено с помощью метода последовательных приближений. Расчет площадей металла осуществляется, начиная с предчистовой клетки, для которой

$$F_{n-1} = F_n \eta_n \frac{D_{kn}}{D_{kn-1}}.$$

Предполагается, что площадь чистового профиля ( $F_n$ ) известна. Подробнее об особенностях расчета калибровки валков непрерывного стана с общим приводом клеток изложено в гл. IV.

### Г л а в а III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИИ И РАСЧЕТ УШИРЕНИЯ ПРИ ПРОКАТКЕ

Недостаточная для практических целей изученность особенностей течения металла при прокатке в вытяжных калибрах, а также определяющая роль соотношений между продольной и поперечной деформациями для расчетов технологических параметров обусловили необходимость проведения специальных экспериментальных исследований. Эти исследования являлись составной частью работ по проектированию, наладке и освоению нового прокатного оборудования, разрабатываемого во ВНИИметмаше, и проводились периодически в течение нескольких лет по мере возникновения в них конкретной необходимости. В процессе их изучались особенности деформации металла при прокатке в двухвалковых и трехвалковых калибрах и влияние на соотношение между продольной и поперечной деформацией таких факторов, как размеры и форма поперечного сечения заготовки, величина обжатия, форма и размеры калибров и т.д. Постепенное накопление экспериментальных данных позволило судить о влиянии различных факторов на величину поперечной деформации при прокатке и послужило основой для раз-

работки соответствующих эмпирических зависимостей для определения уширения.

Исследовали следующие случаи прокатки:

- прокатка заготовок прямоугольного сечения в гладких валках и ящичных калибрах;
- прокатка заготовок квадратного сечения в гладких валках, ящичных, ромбических и овальных калибрах;
- прокатка заготовок круглого сечения в гладких валках и овальных калибрах;
- прокатка заготовок овального сечения в квадратных и круглых двухвалковых калибрах;
- прокатка заготовок круглого и шестиугольного сечения в треугольных и стрельчатых треугольных калибрах;
- прокатка заготовок треугольного сечения в круглых трехвалковых калибрах.

Основная часть исследований деформации при прокатке в двухвалковых клетях выполнена на лабораторном стане ВНИИметмаш дуо 250. Рабочая клеть стана имеет два горизонтальных вала номинальным диаметром 250 мм, оснащена механизмом регулировки валков и вводными проводками. Клеть приводится от двигателя мощностью 40 кВт, скорость вращения валков может регулироваться в пределах от 0,087 до 0,435 м/с.

Для проведения экспериментов изготовлены несколько пар рабочих валков с ящичными, ромбическими, овальными, круглыми и квадратными калибрами. Шероховатость поверхности новых валков в местах калибров и на "бочке" соответствовала чистоте обработки рабочих валков проволочных станов. Прокатку проводили на новых валках и на валках с мелкими трещинами разгара. Одновременно с прокаткой в клетях дуо 250 часть образцов круглого сечения прокатывали в гладких валках диаметром 180 и 350 мм.

Уширение исследовали при прокатке стальных, медных и алюминиевых образцов. При прокатке медных и алюминиевых образцов на валки в качестве технологической смазки подавали эмульсию, химический состав и жирность (4 — 7 %) которой соответствовали эмульсии, применяемой на литейно-прокатных агрегатах при производстве катанки из цветных металлов. Образцы из стали прокатывали (0,4 м/с) с водой.

Образцы прокатывали при различных температурах, соответствующих примерно крайним значениям температурного диапазона горячей прокатки данного материала. Образцы перед прокаткой нагревали в электрической нагревательной печи с силитовыми стержнями и автоматическим поддержанием температуры. Этим обеспечивалась стабильность заданной температуры нагрева всех загруженных в печь образцов данной серии. Одновременно в печь загружали

не более трех — пяти образцов. Температура прокатки определялась по тарировочным кривым охлаждения. Для построения кривых охлаждения предварительно, перед проведением экспериментов на нескольких, обычно двух-трех образцах каждого размера с помощью оптического пирометра или контактной термопары определялось падение температуры нагретого образца на воздухе в единицу времени.

Температуру замеряли сразу же после извлечения образца из печи через каждые 5 — 10 с в течение 1 — 2 мин в зависимости от площади сечения образца. В дальнейшем при проведении опытов для всех прокатываемых образцов с помощью секундомера измеряли время от момента извлечения образца из печи до захвата его валками. При известной температуре в печи температура прокатки определялась как разность между температурой нагрева и величиной падения температуры образца за измеренное время. Для контроля на части образцов температуру замеряли непосредственно перед прокаткой. Температуру стальных и медных образцов замеряли с помощью оптического пирометра; для измерения температуры алюминиевых образцов применяли контактную термопару.

С самого начала исследований было установлено, что полученные экспериментальные данные по уширению в значительной степени зависят от правильности положения и устойчивости полосы в калибре при прокатке, поэтому особое внимание в опытах уделялось тщательности установки вводных проводок.

Размеры поперечных сечений исходных и прокатанных образцов измерялись с помощью штангенциркуля при комнатной температуре в трех местах по длине образца, а именно, в середине образца и в точках, отстоящих на 40 — 50 мм от концов. Площади сечений образцов до и после прокатки ( $F_0$ ,  $F_1$ ) подсчитывали на основе среднеарифметических этих трех измерений.

Для части образцов площадь поперечного сечения после прокатки определялась через вытяжку  $F_1 = F_0(l_1/l_0)$ . Чтобы исключить влияние концевого эффекта, вытяжку оценивали удлинением расстояния между рисками, нанесенными на поверхности образца на расстоянии 40 — 50 мм от его концов. Таким образом, в качестве  $l_0$ ,  $l_1$  принимали не длину образца, а расстояния между рисками до и после прокатки.

Как показали опыты, способ определения площади поперечного сечения образца после прокатки через вытяжку дает достаточно надежные результаты только в том случае, если образец сохраняет устойчивое положение в валках в течение всего пропуски, в том числе и после выхода его заднего конца из вводной проводки. В частности, такой способ расчета  $F_1$  можно с уверенностью применять для образцов круглого сечения, способных сохранять устойчивость при прокатке, как в гладких валках, так и в калибрах. Во всех осталь-

ных случаях, вследствие сваливания заднего конца образца при выходе его из вводной проводки, определение площади сечения образца после прокатки через отношение длин приводило к большим погрешностям при подсчете экспериментальных значений коэффициента уширения.

Доля поперечной деформации образцов независимо от их размеров, формы поперечного сечения и конфигурации калибров, оценивалась с помощью коэффициента уширения  $c_y$ . Расчет опытных значений коэффициента уширения выполняли следующим образом:

$$c_y = \frac{\Delta F_y}{\Delta F} = \frac{F_1 - F_{01}}{F_0 - F_{01}}$$

Значения площади  $F_{01}$  определяли из соответствующих выражений, приведенных далее.

Анализ возможной погрешности обоих способов измерения площади сечения прокатанных образцов показывает, что ими можно пользоваться только в случае, если обжатие по высоте заготовки превышает 10 %. При меньших обжатиях погрешность измерения  $F_1$  становится соизмеримой с величиной смещенной при прокатке площади металла, в результате чего резко возрастает ошибка при определении экспериментальных значений коэффициента уширения  $c_y$ . Кроме того, при обжатии меньше 10 % по этой же причине становится необходимым учет потерь металла в окалину при нагреве, причем ошибка быстро растет с уменьшением обжатия.

#### 1. УШИРЕНИЕ ПРИ ПРОКАТКЕ В ГЛАДКИХ ВАЛКАХ, ЯЩИЧНЫХ, РОМБИЧЕСКИХ И ОВАЛЬНЫХ КАЛИБРАХ

Исследования проводили при прокатке образцов квадратного, прямоугольного и круглого сечения из углеродистой и хромистой коррозионностойкой стали, меди и алюминия, длина образцов 450 — 500 мм. Цель исследования — изучение влияния на величину поперечной деформации размеров и формы сечения образцов, величины обжатия, диаметра валков, формы калибров и степени заполнения их металлом, температуры прокатки, чистоты поверхности валков и прокатываемых образцов, вида прокатываемого материала. Размеры ящичных, ромбических и овальных калибров, в которых проводилась прокатка, показаны на рис. 19, 20.

*Прокатка стали.* В качестве исходных заготовок были взяты образцы квадратного сечения со стороной 12, 16, 18, 20, 25 и 28 мм из стали 45 и Ст3, прямоугольного ( $h_0 \times b_0$ ) — 16 X 25, 25 X 16, 40 X 26 из стали Ст3 и круглого сечения диаметром 11 и 12 мм из стали 2Х13 и 3Х13, а также диаметром 16, 20, 25 и 30 мм из стали 20, 45 и Ст3. Всего было прокатано свыше 600 образцов при 1000 — 1180°C. Кроме того, часть образцов прокатана при температурах око-

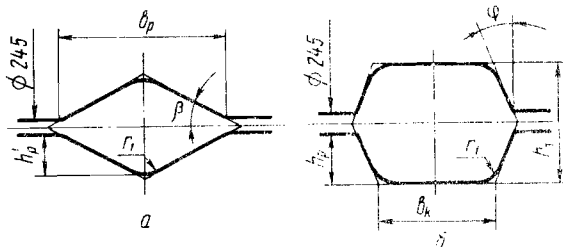


Рис. 19. Форма и размеры калибров при исследовании уширения:

Ромбический калибр	K1	K2	Ящичный калибр	K1	K2	K3
$h_p$ , мм	6,8	8,4	$h_p$ , мм	13	13	13
$b_p$ , мм	36,0	34,0	$b_k$ , мм	26	26	26
$\beta$ , град	21	28	$\varphi$ , град	30	23	12
$r_1$ , мм	3	5	$r_1$ , мм	4	3	2

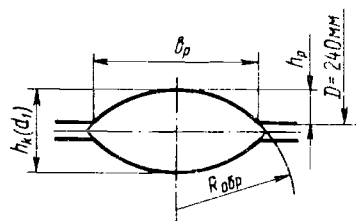


Рис. 20. Форма и размеры овальных калибров при исследовании уширения, мм:

Калибр	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
$R_{обp}$	10,0	15,5	19,0	20,0	20,0	22,0	30,0	40,0
$h_p$	2,5	2,5	4,0	2,5	5,3	4,9	4,5	7,5
$b_p$	13,2	16,9	23,3	19,4	27,1	27,7	31,6	46,6

ло 900°C, что соответствует нижнему значению температурного интервала горячей прокатки стали.

Для изучения влияния качества поверхности прокатываемых образцов на величину поперечной деформации часть образцов квадратного сечения со сторонами 16, 20 и 25 мм имели шлифованную поверхность. Кроме того, часть квадратных образцов со стороной 25 мм была прокатана после полного удаления с их поверхности слоя печной окалины, образовавшейся при нагреве.

**Прокатка меди и алюминия.** Исследования деформации проводили при прокатке в гладких и овальных калибрах образцов круглого сечения диаметром 10, 12, 16, 20, 25, 30 и 40 мм из меди М1 и М2 и диаметром 10, 18 и 20 мм из алюминия марок А7Е и АД1. Прокатка медных образцов осуществлялась в диапазоне от 600 до 850°C, алюминиевых образцов — от 350 до 500°C. Всего было прокатано более 300 образцов.

В зависимости от формы поперечного сечения заготовки и калибра значения площади  $F_{01}$  подсчитывали из следующих выражений\*.

Прокатка образцов квадратного и прямоугольного сечения:

в гладких валках и ящичных калибрах  $F_{01} = h_1 b_0$ , где  $h_1$  — высота образца после прокатки;  $b_0$  — ширина образца до прокатки.

Прокатка образцов квадратного сечения:

в ромбических калибрах

$$F_{01} = F_0 - \frac{(h_{к0} - h_{к1})^2}{2(1 - \lg \beta)} - 2r_1^2 (\lg \beta - \beta),$$

где  $h_{к0}$  — диагональ исходного квадрата;  $h_{к1}$ ,  $r_1$ ,  $\beta$  — высота, радиус закругления и угол наклона образующей ромбического калибра;

в овальных калибрах

$$F_{01} = 2R_{обp}^2 \arcsin \frac{h_0}{2R_{обp}} + R_{обp} h_0 \sqrt{1 - h_0^2/4R_{обp}^2} - h_0 (2R_{обp} - h_1),$$

где  $R_{обp}$  — радиус образующей овального калибра;  $h_0$  — сторона исходного квадрата;  $h_1$  — высота образца после прокатки.

Прокатка образцов круглого сечения:

в гладких валках

$$F_{01} = F_0 \left[ 1 - \frac{2}{\pi} \left( \arcsin \sqrt{1 - \frac{d_1^2}{d_0^2}} - \frac{d_1}{d_0} \sqrt{1 - \frac{d_1^2}{d_0^2}} \right) \right],$$

где  $d_0$  — диаметр образца до прокатки;  $d_1$  — высота образца после прокатки;

в овальных калибрах

$$F_{01} = F_0 \left\{ 1 - \frac{2}{\pi} \left[ \arcsin \frac{2y_0}{d_0} - 4 \frac{R_{обp}^2}{d_0^2} \arcsin \frac{y_0}{R_{обp}} + \frac{2y_0}{d_0^2} (2R_{обp} - d_1) \right] \right\},$$

$$\text{где } y_0 = 0,5 d_0 \sqrt{1 - \left[ \frac{d_1}{d_0} \cdot \frac{4R_{обp} - d_1 - d_0^2/d_1}{2(2R_{обp} - d_1)} \right]^2}.$$

Результаты исследований приведены на рис. 21 — 46. Анализ полученных экспериментальных данных позволяет сделать следующие основные выводы относительно характера распределения деформации при различных случаях прокатки.

1. В зависимости от условий прокатки поперечная деформация может составлять существенную часть от смещенного объема металла. Особенно значительна доля поперечной деформации при про-

\* Вывод выражений для  $F_{01}$  в зависимости от формы сечения заготовки и калибра приведен в гл. IV

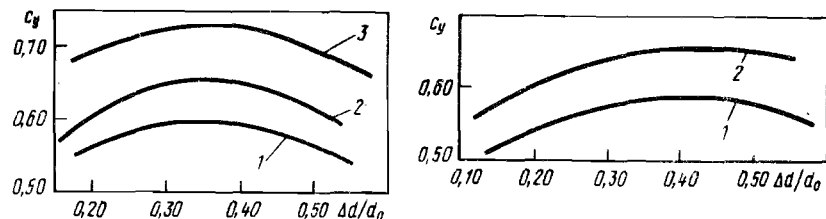


Рис. 21. Уширение круга диаметром 10 мм (медь М1, М2) при 730 – 760°C в гладких валках диаметром, мм:  
1 – 180; 2 – 240; 3 – 350

Рис. 22. Уширение круга диаметром 16 мм (сталь Ст3) при 1100 – 1150°C в гладких валках диаметром 240 мм (1) и 350 мм (2)

катке в гладких валках. Так, например, при прокатке круга диаметром 10 мм из меди М1 в гладких валках диаметром 350 мм (рис. 21) доля поперечной деформации достигает 74 % от смещенного объема, т.е. в 2,7 раза превышает объем металла, перемещаемого в продольном направлении.

2. С увеличением диаметра прокатных валков доля поперечной деформации при прокатке возрастает. Так, при прокатке круга диаметром 16 мм из стали Ст3 в гладких валках диаметром 240 мм максимальная величина коэффициента уширения составила 0,58 (рис. 22), в то время как в валках диаметром 350 мм при тех же условиях прокатки – 0,65. При прокатке медных образцов диаметром 10 мм увеличение диаметра валков со 180 до 350 мм (см. рис. 21) привело к увеличению коэффициента уширения в 1,2 раза (с 0,60 до 0,74).

Анализ полученных экспериментальных данных относительно влияния высоты исходной заготовки ( $h_0$  или  $d_0$ ) и диаметра прокатных валков показывает, что воздействие этих факторов на величину поперечной деформации имеет противоположный характер, однако в количественном отношении оно примерно одно и то же. Другими словами, приращение поперечной деформации при увеличении диаметра валков приблизительно равно уменьшению ее при таком же относительном увеличении высоты исходной заготовки. Например, как видно из рис. 22, увеличение диаметра валков с 240 до 350 мм, т.е. в 1,45 раза, привело к возрастанию максимальной величины коэффициента уширения  $c_y$  при прокатке круга диаметром 16 мм из стали 45 и Ст3 с 0,58 до 0,65, т.е. приблизительно на 12 %, а при примерно таком увеличении диаметра исходной заготовки (с 16 до 25 мм) максимальная величина коэффициента  $c_y$  уменьшилась с 0,58 (кривая 1, рис. 22) до 0,50 (кривая 1, рис. 38), т.е. на

14 %. К этому же заключению можно прийти, анализируя результаты прокатки медных образцов (см. рис. 21, 27).

Таким образом, результаты приведенных экспериментов подтверждают сложившееся представление о том, что в качестве параметра, характеризующего суммарное воздействие указанных двух факторов на величину поперечной деформации при прокатке, можно рассматривать отношение  $D/h_0$ , либо для заготовок круглого сечения,  $D/d_0$ .

3. Сравнение результатов прокатки в гладких валках образцов с различной формой поперечного сечения показывает, что доля поперечной деформации образцов квадратного сечения заметно меньше, чем образцов круглого сечения. Так, из рис. 23, 24 видно, что максимальное значение коэффициента уширения при прокатке квадрата 20 из стали Ст3 составляет 0,42, а для круга диаметром 20 мм в тех же условиях эта величина равна 0,55. Доля поперечной деформации при прокатке прямоугольных образцов при прочих равных условиях определяется соотношением ширины и высоты ( $b_0/h_0$ ) исходного прямоугольного сечения: чем больше отношение  $b_0/h_0$ , тем меньше доля поперечной деформации. Так, сравнивая величину уширения при прокатке квадратов 16 X 16 мм и 25 X 25 мм и образцов прямоугольного сечения размером ( $h_0 \times b_0$ ) 16 X 25 мм и 25 X 16 мм (рис. 25, 26), видим, что увеличение ширины исходной заготовки с 16 до 25 мм приводит к уменьшению доли поперечной деформации с 0,45 до 0,31, т.е. примерно в 1,5 раза, а уменьшение ширины с 25 мм до 16 мм – к увеличению доли поперечной деформации с 0,38 до 0,50, т.е. примерно в 1,3 раза.

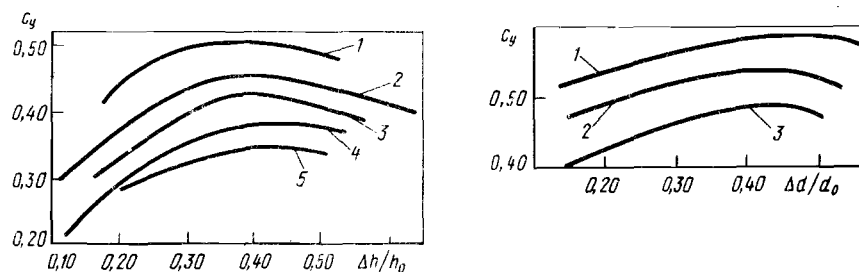


Рис. 23. Уширение заготовок квадратного сечения (сталь Ст3, сталь 45) в гладких валках ( $D = 240$  мм) при 1050 – 1150°C:  
1 – квадрат 12 X 12 мм; 2 – квадрат 16 X 16 мм; 3 – квадрат 20 X 20 мм; 4 – квадрат 25 X 25 мм; 5 – квадрат 28 X 28 мм

Рис. 24. Уширение заготовок круглого сечения (сталь Ст3, сталь 45) в гладких валках ( $D = 240$  мм) при 1100 – 1150°C, диаметром, мм:  
1 – 16 мм; 2 – 20 мм; 3 – 30 мм

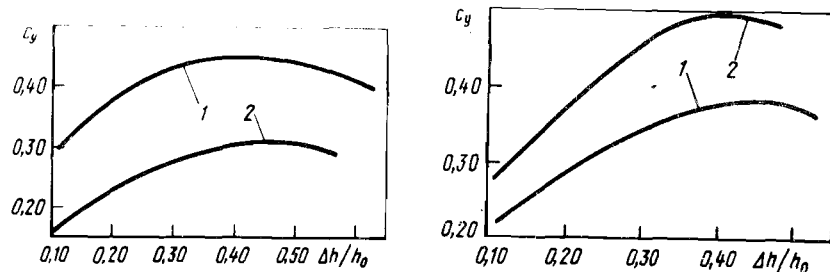


Рис. 25. Уширение заготовок квадратного и прямоугольного сечения (сталь Ст3) в гладких валках ( $D = 240$  мм) при  $1100 - 1150^\circ\text{C}$ :

1 — квадрат  $16 \times 16$  мм; 2 — прямоугольник ( $h \times b$ )  $16 \times 25$  мм

Рис. 26. Уширение заготовок квадратного и прямоугольного сечения при  $1100 - 1150^\circ\text{C}$  (сталь Ст3) в гладких валках ( $D = 240$  мм):

1 — квадрат  $25 \times 25$  мм; 2 — прямоугольник ( $h \times b$ )  $25 \times 16$  мм

4. Независимо от формы поперечного сечения и материала исходной заготовки величина коэффициента уширения  $C_y$  возрастает с уменьшением ее высоты. Так, при прокатке квадрата 28 из стали Ст3 в гладких валках (рис. 23) доля поперечной деформации составила максимально около 35% от смещенного объема, в то время как для квадрата 12 при тех же условиях эта величина достигает 51 %. При прокатке круга диаметром 40 мм из меди М1 в гладких валках наибольшая величина поперечной деформации составляет 0,38 (рис. 27), а при прокатке круга диаметром 10 мм — 0,66 %.

5. Независимо от формы поперечного сечения исходных загото-

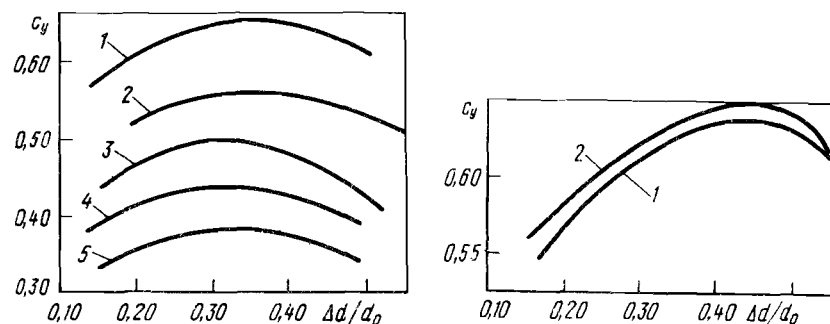


Рис. 27. Уширение заготовок круглого сечения (медь М1, М2) при  $750 \div 850^\circ\text{C}$  в гладких валках диаметром 240 мм:

1 — 10 мм; 2 — 16 мм; 3 — 20 мм; 4 — 30 мм; 5 — 40 мм

Рис. 28. Уширение круга диаметром 16 мм (сталь 20) в гладких валках: 1 —  $1100 - 1150^\circ\text{C}$ ; 2 —  $900 - 950^\circ\text{C}$

вок доля поперечной деформации при прокатке в гладких валках увеличивается с ростом обжатия, достигая максимума при обжатии по высоте заготовки равных 35 — 45 %; при дальнейшем увеличении обжатия величина коэффициента уширения уменьшается. Такой характер зависимости поперечной деформации от обжатия сохраняется для всех исследованных материалов, однако для медных и алюминиевых образцов максимум уширения смещен в сторону меньших обжатий по сравнению с образцами из стали. Из рис. 24, 27 видно, что коэффициент уширения стальных образцов достигает максимального значения при обжатиях (40 — 45 %), а медных и алюминиевых образцов — при обжатиях около 35 %.

6. Прокатка стальных образцов при различных температурах показала, что изменение температуры прокатки в диапазоне  $900 - 1150^\circ\text{C}$  незначительно влияет на соотношение между поперечной и продольной деформациями. При повышении температуры прокатки образцов круглого сечения диаметром 16 мм из стали 20 и диаметром 25 мм из стали Ст3 с  $900$  до  $1150^\circ\text{C}$  (рис. 28, 38) доля поперечной деформации уменьшилась с 65 до 63 % и с 51 до 50 % соответственно. Примерно такая же картина наблюдалась при прокатке образцов квадратного сечения размером  $16 \times 16$  мм из стали Ст3, прокатанных при  $900$  и  $1100^\circ\text{C}$ . Уширение образцов из стали 2Х13 (рис. 36) при температурах прокатки  $900$  и  $1050^\circ\text{C}$  также оказалась практически одинаковой.

Влияние температуры прокатки на уширение меди и алюминия более заметно, особенно при температурах, соответствующих верхнему пределу температурного интервала горячей прокатки этих металлов. В частности, для медных образцов повышение температуры прокатки с  $700$  до  $850^\circ\text{C}$  вызывает уменьшение доли поперечной деформации приблизительно на 7 — 10 %, в то время как в интервале от  $600$  до  $700^\circ\text{C}$  влияние температуры на уширение заметно меньше. Уширение алюминиевых образцов в интервале  $300 - 450^\circ\text{C}$  также мало зависит от температуры, однако повышение температуры более  $450^\circ\text{C}$  вызывает заметное увеличение доли поперечной деформации.

7. Прокатка образцов с различным качеством поверхности не показала заметной разницы в величине поперечной деформации. По-видимому, это объясняется наличием на поверхности образцов слоя окислы, который и определяет в основном условия трения между валками и прокатываемым металлом. Как показали опыты, поперечная деформация образцов, с поверхности которых перед прокаткой был удален слой печной окислы, несколько больше, чем образцов с окислой.

8. Как и следовало ожидать, доля поперечной деформации при прокатке в калибрах за счет противодействия со стороны боковых



стенок калибра оказалась существенно меньше, чем при прокатке в гладких валках. При этом, чем больше степень стеснения калибра, т.е. чем меньше соотношение между его шириной и высотой, тем (при прочих равных условиях) меньше доля поперечной деформации. Исключение представляет случай прокатки образцов квадратного сечения в овальных калибрах с обжатиями, меньшими 15 % ( $\Delta h/h_0 < 0,15$ ). Здесь доля поперечной деформации такая же или даже несколько больше, чем при тех же обжатиях в гладких валках (рис. 33). Это можно объяснить тем, что при прокатке в овальном калибре квадрат первоначально обжимается не по граням, как в гладких валках, а по углам профиля, что и вызывает увеличение поперечной деформации. При больших обжатиях это увеличение поперечной деформации компенсируется ее последующим уменьшением за счет подпирания действия стенок калибра.

9. При прокатке в калибрах влияние величины обжатия на соотношение между поперечной и продольной деформациями зависит от формы калибра. Так, при прокатке прямоугольной заготовки в ящичных калибрах (рис. 29) величина поперечной деформации в исследованном диапазоне обжатий ( $\Delta h/h_0 = 0,2 - 0,4$ ) мало зависит от величины обжатия и определяется в основном углом наклона боковых стенок калибра ( $\varphi$ ); чем меньше угол наклона боковых стенок относительно вертикальной оси калибра, тем меньше коэффициент уширения. Как видно из рис. 29, относительная разница в величине коэффициента  $c_y$  в калибрах с углом  $\varphi$  равным  $12^\circ$

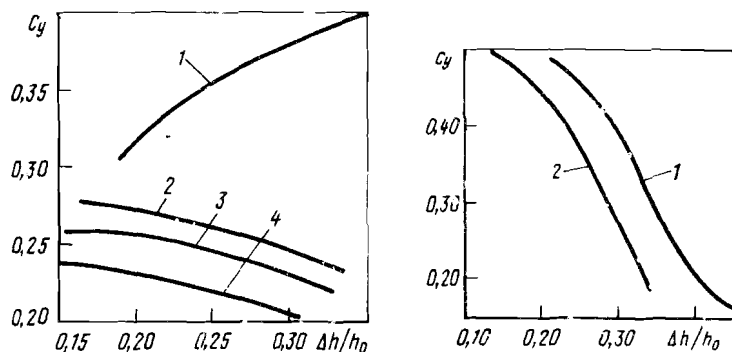


Рис. 29. Уширение заготовок прямоугольного сечения ( $h \times b$ ) 40 × 26 мм (сталь Ст3) при 1130 – 1150°C в гладких валках (кривая 1) и ящичных калибрах, К1 (2), К2 (3), К3 (4)

Рис. 30. Уширение квадрата 18 × 18 мм (сталь Ст3) при 1100 – 1150°C в ромбических калибрах К1 (1), К2 (2)

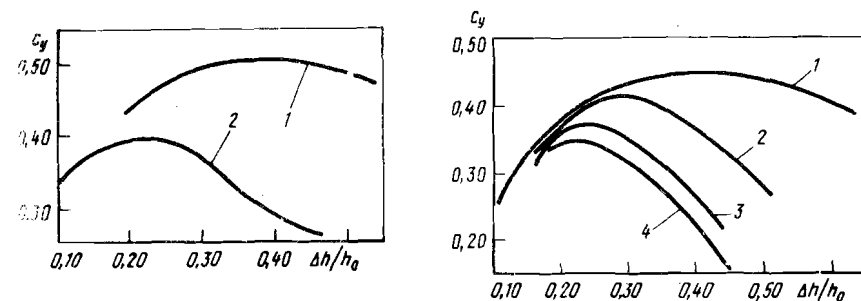


Рис. 31. Уширение квадрата 12 × 12 мм (сталь Ст3) в гладких валках диаметром 240 мм (кривая 1) и овальном калибре К2 (кривая 2) при 1050 – 1100°C

Рис. 32. Уширение квадрата 16 × 16 мм (сталь Ст3) при 1100 – 1150°C в гладких валках диаметром 240 мм (кривая 1) и овальных калибрах К7 (2), К6 (3), К5 (4)

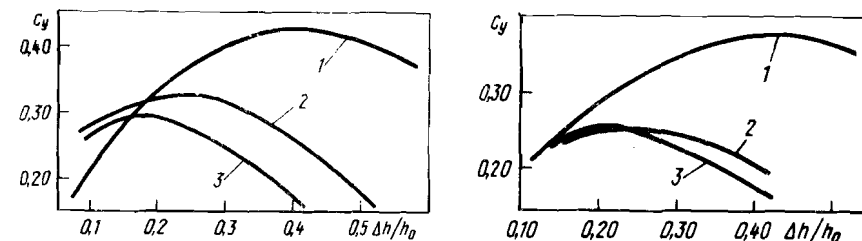


Рис. 33. Уширение квадрата 20 × 20 мм (сталь Ст3, сталь 45) при 1100 – 1150°C в гладких валках диаметром 240 мм (кривая 1) и овальных калибрах К7 (2) и К6 (3)

Рис. 34. Уширение квадрата 25 × 25 мм (сталь Ст3) при 1100 – 1150°C в гладких валках диаметром 240 мм (кривая 1) и овальных калибрах К8 (2), К7 (3)

и  $30^\circ$  достигает 20 %. В ромбических и овальных калибрах влияние обжатия на величину поперечной деформации более значительно.

10. Уширение при прокатке в ромбических калибрах тем меньше, чем больше угол наклона образующей к горизонтальной оси калибра ( $\beta$ ). Так, при одном и том же обжатии ( $\Delta h_k/h_{k0} \approx 0,3$ ) доля поперечной деформации при прокатке в калибре К1 составляет около 40 % (рис. 30), а то время как в калибре К2 – около 28 %. С ростом обжатия доля поперечной деформации в ромбическом калибре уменьшается, причем тем значительно, чем больше угол  $\beta$ . На рис. 30 видно, что при увеличении обжатия с 0,2 до 0,35 величина поперечной деформации при прокатке в калибре К1 уменьшается

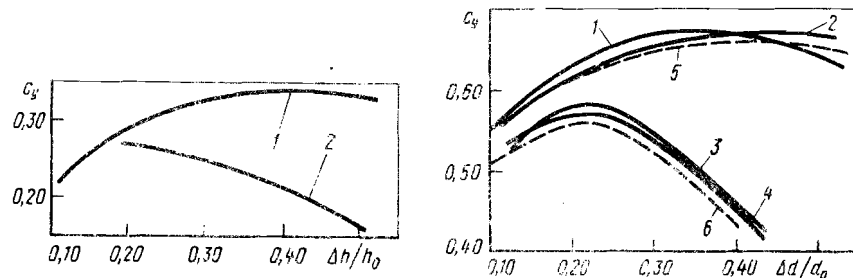


Рис. 35. Уширение квадрата 28 X 28 мм (сталь Ст3) при 1120 – 1150°C в гладких валках диаметром 240 мм (кривая 1) и овальном калибре К8 (кривая 2)

Рис. 36. Уширение круга диаметром 11, 12 мм (сталь 2Х13, 3Х13) в гладких валках (кривые 1, 2, 5) и овальном калибре К2:

1 – 11 мм, 900°C; 2 – 11 мм, 1050°C; 3 – 11 мм, 900°C; 4 – 11 мм, 1050°C; 5 – 12 мм, 1100°C; 6 – 12 мм, 1100°C

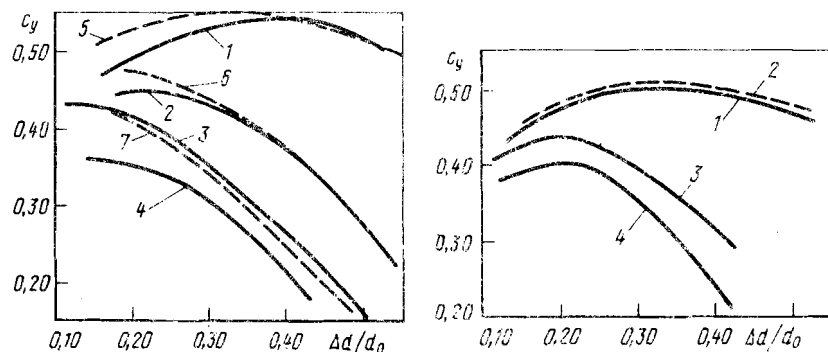


Рис. 37. Уширение круга диаметром 20 мм (сталь Ст3, сталь 45) при 1100 – 1150°C в гладких валках диаметром 240 мм (кривые 1, 5) и овальных калибрах. Кривые 5, 6, 7 – образцы со шлифованной поверхностью: в К7 (2, 6), в К6 (3, 7), в К5 (4)

Рис. 38. Уширение круга диаметром 25 мм (сталь Ст3, сталь 20) при 1100 – 1150°C в гладких валках диаметром 240 мм (кривые 1, 2) и овальных калибрах:

1 – 1100 – 1150°C; 2 – 920 – 950°C; 3 – К8; 4 – К5

ется с 0,5 до 0,3, или на 40 %, а при тех же условиях в более тесном калибре К2 – с 0,45 до 0,18, или в 2,5 раза.

11. При прокатке в овальных калибрах образцов как круглого, так и квадратного сечения доля поперечной деформации тем меньше, чем больше обжатие и меньше радиус образующей калибра. Так, при прокатке квадрата 16 X 16 мм из стали Ст3 в калибре К5 (см.

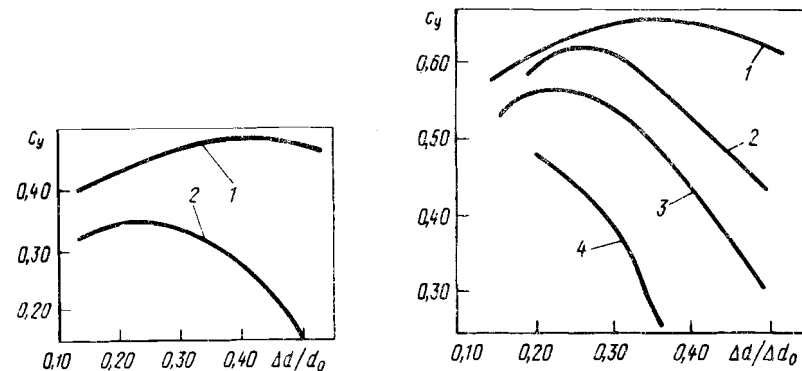


Рис. 39. Уширение круга диаметром 30 мм (сталь Ст3, сталь 45) при 1130 – 1150°C в гладких валках диаметром 240 мм (кривая 1) и овальном калибре К8 (кривая 2)

Рис. 40. Уширение круга диаметром 10 мм (медь М1, М2) при 750 – 780°C в гладких валках диаметром 240 мм (кривая 1) и овальных калибрах:

К4 (2); К2 (3); К1 (4)

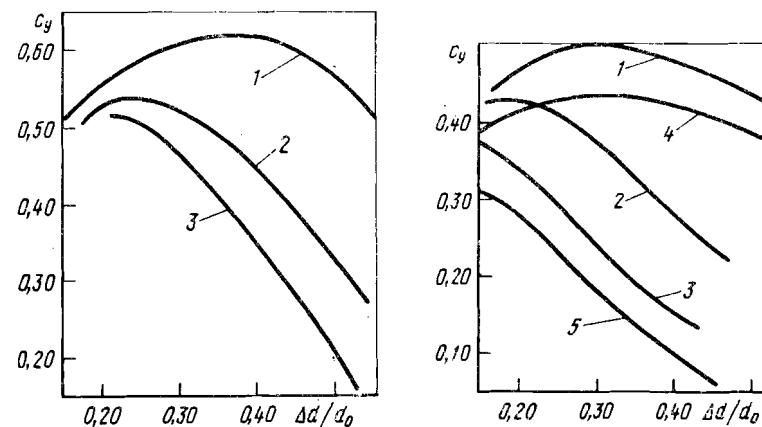


Рис. 41. Уширение круга диаметром 12 мм (медь М1, М2) при 750 – 800°C в гладких валках диаметром 240 мм (кривая 1) и овальных калибрах: в К4 (2); в К2 (3)

Рис. 42. Уширение круга диаметром 20 и 30 мм (медь М1, М2) при 800 – 850°C в гладких валках диаметром 240 мм и в овальных калибрах:

1 – в гладких валках, круг диаметром 20 мм; 2 – в К7, круг диаметром 20 мм; 3 – в К5, круг диаметром 20 мм; 4 – в гладких валках, круг диаметром 40 мм; 5 – в К8, круг диаметром 40 мм

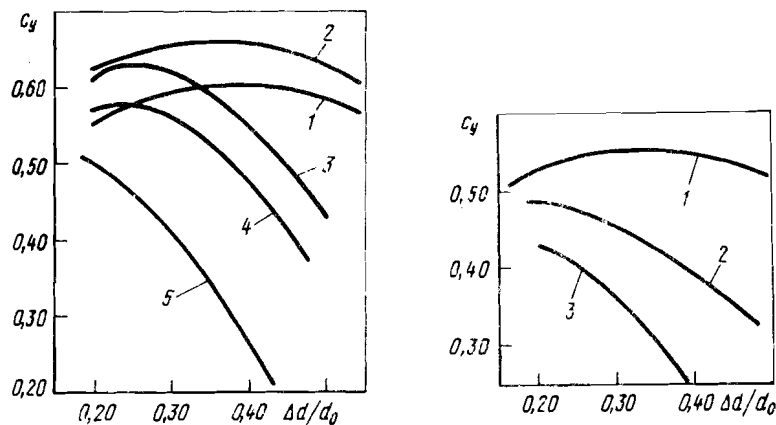


Рис. 43. Уширение круга диаметром 10 мм (алюминий А7Е) при 370 — 400°C в гладких валках диаметром 180 мм (кривая 1) и диаметром 240 мм (кривая 2) и в овальных калибрах: в К4 (3); в К2 (4); в К1 (5)

Рис. 44. Уширение круга диаметром 18 мм (алюминий А7Е) при 380 — 420°C в гладких валках диаметром 240 мм (кривая 1) и овальных калибрах в К7 (2); в К5 (3)

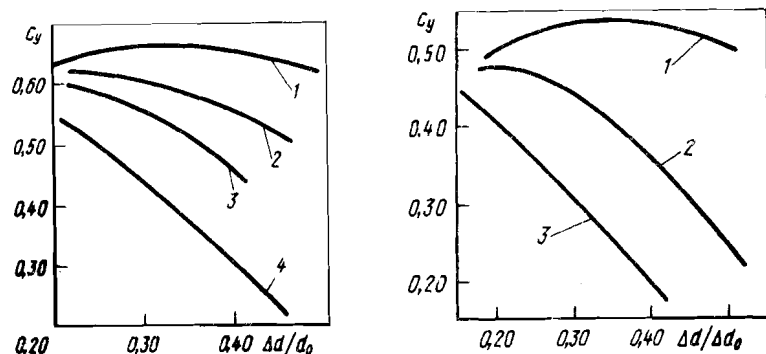


Рис. 45. Уширение круга диаметром 10 мм (алюминий АД1) при 370 — 400°C в гладких валках диаметром 240 мм (кривая 1) и в овальных калибрах К4 (2); К2 (3); К1 (4)

Рис. 46. Уширение круга диаметром 20 мм (алюминий АД1) при 400 — 420°C в гладких валках диаметром 240 мм (кривая 1) и в овальных калибрах К7 (2); К5 (3)

рис. 32), доля поперечной деформации при обжатии 0,22 составляет 35 %, а при 45 всего 15 %.

Исследования показали, что чем меньше радиус образующей калибра, тем значительнее влияние обжатия на величину поперечной деформации. Так, при прокатке образцов диаметром 10 мм из алюминия марки АД1 (см. рис. 45) в калибре К4 при увеличении обжатий с 0,25 до 0,45 величина коэффициента уширения уменьшилась с 0,62 до 0,52, т.е. примерно на 16 %, в то время как для того же интервала обжатий, но при прокатке в более тесном калибре К1, уменьшение коэффициента уширения составило более 50 %. Аналогичная картина наблюдается при прокатке в овальных калибрах заготовок квадратного сечения.

Из сравнения результатов прокатки в овальных калибрах образцов квадратного и круглого сечения видно, что при одинаковых линейных размерах их поперечного сечения (сторона квадрата равна диаметру круга) уширение квадратных образцов (рис. 31, 33 — 35) в тех же калибрах при тех же обжатиях в среднем примерно на 30 % меньше, чем образцов круглого сечения (рис. 37 — 39).

12. Как и следовало ожидать, исследования показали различную склонность к уширению разных материалов. Так, уширение хромистых сталей 2Х13, 3Х13 (рис. 36) несколько больше, чем углеродистых (сталь 20, 45, Ст3) и на 10 — 15 % выше, чем образцов того же диаметра из меди М1, М2 (рис. 41). Сравнивая данные, приведенные на рис. 37, 39 и 42, видим, что уширение образцов из углеродистой стали на 7 — 10 % больше, чем медных образцов того же диаметра и примерно такое же, как уширение образцов из алюминия марок А7Е и АД1 (рис. 44, 46). В то же время уширение медных образцов при пониженных температурах (рис. 40) всего на 2 — 3 % меньше, чем алюминиевых того же диаметра (рис. 43, 45). В общем на основании приведенных опытов можно заключить, что разница в уширении материалов, использованных в данных исследованиях, сравнительно невелика и находится в пределах порядка  $\pm 10$  % от уширения углеродистой стали.

## 2. УШИРЕНИЕ ПРИ ПРОКАТКЕ В КВАДРАТНЫХ И КРУГЛЫХ ДВУХВАЛКОВЫХ КАЛИБРАХ

Часть образцов, прокатанных в гладких валках и в овальных калибрах, использовалась затем в качестве заготовок для исследования деформации при прокатке в круглых и квадратных калибрах. Прокатывали стальные (Сталь 45, Ст3) и медные (медь М1 и М2) образцы в круглых диаметром 8, 10, 13,2 и 21 мм и квадратных калибрах со стороной квадрата 12 и 16 мм. Температура прокатки в зависимости от сечения образца находилась в пределах: для стальных образцов от 1050 до 1150°C, для медных от 700 до 850°C.

Особое внимание при проведении опытов уделялось обеспечению устойчивого положения прокатываемой полосы в калибре во время пропуска. Это связано с тем, что в условиях полного или почти полного заполнения квадратного или круглого калибра металлом даже незначительное отклонение полосы от вертикального положения приводит к существенным погрешностям при определении величины поперечной деформации. Тем не менее, несмотря на тщательную установку проводковой арматуры, в некоторых случаях наблюдалось сваливание заднего конца полосы после выхода его из вводной проводки. Это, естественно, исключило возможность определения площади сечения этих образцов через отношение длин и соответственно повысило требования к тщательности измерений размеров поперечного сечения образцов после прокатки.

В процессе исследований изучалась зависимость распределения деформации при прокатке от величины обжатия, размеров калибра, степени заполнения калибра металлом и кривизны поверхности поперечного сечения исходных заготовок, определяемой радиусом об разующей овального калибра, в котором предварительно прокатаны заготовки.

Как и при прокатке в гладких валках и овальных калибрах, для медных образцов в качестве технологической смазки использовали эмульсию, стальные образцы прокатывали с водой.

В отличие от исследований прокатки в гладких валках, ящичных, ромбических и овальных калибрах, где при установлении связи между уширением и обжатием величина последнего выражалась как деформация по высоте заготовки, при прокатке в квадратных и круглых калибрах в качестве меры обжатия принималось отношение

$$\epsilon = \frac{F_0 - F_{01}}{F_0} = \frac{\Delta F}{F_0},$$

где  $F_0$  — площадь сечения образца до прокатки;  $\Delta F$  — смещенная площадь металла при прокатке в данном квадратном или круглом калибре.

Это связано с тем, что высота полосы, входящей в квадратный или круглый калибр, как правило, не равна ширине предшествующего ромбического или овального калибра и, следовательно, является величиной неизвестной даже при известной площади сечения полосы. Поэтому использование здесь в качестве меры обжатия деформации по высоте заготовки затруднило бы практическое использование полученных экспериментальных данных в расчетах калибровок валков.

Величина площади  $F_{01}$  для образцов овального сечения определялась из следующих выражений:

при прокатке в квадратных калибрах

$$F_{01} = 0,5 h_1^2 \left[ 1 + \frac{4 R_{обр}^2}{h_1^2} \arcsin \frac{z_0}{R_{обр}} - \frac{2 z_0}{h_1} \left( \frac{2 R_{обр}}{h_1} + \frac{h_k}{h_1} - 1 \right) \right],$$

где  $h_1$  — ширина исходного овального образца, равна высоте овального калибра, в котором этот образец был прокатан;  $h_k$  — высота квадратного калибра;

$$z_0 = \frac{1}{4} [2 R_{обр} + h_k - h_1 - \sqrt{8 R_{обр}^2 - (2 R_{обр} + h_k - h_1)^2}];$$

при прокатке в двухвалковых круглых калибрах

$$F_{01} = 0,5 d_k^2 \left[ \frac{\pi}{2} + \frac{4 R_{обр}^2}{d_k^2} \arcsin \frac{z_0}{R_{обр}} - \arcsin \frac{2 z_0}{d_k} - \frac{2 z_0 h_1}{d_k^2} \left[ \frac{2 R_{обр}}{d_1} - 1 \right] \right],$$

где  $d_k$  — диаметр круглого калибра;

$$z_0 = 0,5 d_k \sqrt{1 - \frac{h_1^2}{d_k^2} \frac{(4 R_{обр} - h_1 - d_k^2 / h_1)^2}{4 (2 R_{обр} - h_1)^2}}.$$

Степень заполнения квадратного или круглого калибра металлом выражалась отношением  $b_1/b_k$ , где  $b_1$  — ширина прокатанного профиля;  $b_k$  — ширина калибра.

Результаты исследований деформации приведены на рис. 47 — 49. Анализ экспериментальных данных позволил сделать следующие выводы:

1. Распределение деформации при прокатке в круглых и квадратных калибрах зависит от степени заполнения калибра металлом, причем чем больше заполнение калибра, тем меньше доля поперечной деформации. Например, при прокатке в квадратном калибре со стороны 16 мм (рис. 49) при заполнении калибра на 90 % величина коэффициента уширения составляет 0,20, а при полном заполнении ( $b_1/b_k = 1,0$ ) около 0,16.

2. При одном и том же заполнении калибра доля поперечной деформации тем меньше, чем больше размер калибра. Так, при прокатке медных заготовок (см. рис. 48) в круглом калибре диаметром 10 мм величина коэффициента уширения при  $b_1/b_k = 1,0$  составляет примерно 0,30, а при прокатке в калибре диаметром 21 мм составляет 0,18, т.е. уменьшается на 40 %.

3. При обжатиях больше 20 % ( $\Delta F/F_0 > 0,2$ ) влияние величины обжатия на поперечную деформацию в круглом и квадратном калибре незначительно. При меньших обжатиях величина поперечной де-

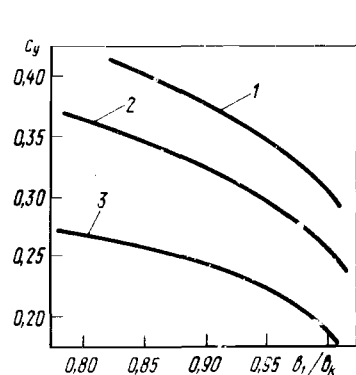


Рис. 47. Уширение в круглых калибрах (сталь Ст3; сталь 45, 1050 – 1150°C,  $D = 240$  мм) диаметром:

1 – 10 мм; 2 – 13,2 мм; 3 – 21 мм

Рис. 48. Уширение в круглых калибрах (медь М1, М2, 700 – 350°C,  $D = 240$  мм) диаметром:

1 – 8 мм; 2 – 10 мм; 3 – 13,2 мм; 4 – 21 мм

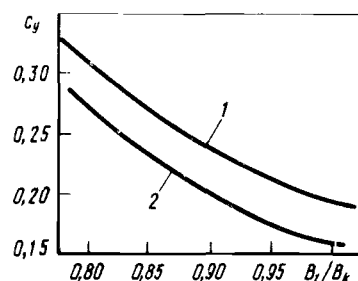


Рис. 49. Уширение в квадратных калибрах (сталь Ст3, сталь 45, 1100 – 1150°C,  $D = 240$  мм):

1 – квадрат 12 × 12 мм; 2 – квадрат 16 × 16 мм

формации уменьшается с уменьшением обжатий. В данных опытах не удалось установить зависимости между кривизной поверхности овальной заготовки и величиной поперечной деформации в последующем круглом или квадратном калибре, хотя наличие такой взаимосвязи можно предполагать. Исключение составляет прокатка в круглых калибрах заготовок, предварительно прокатанных в гладких валках. В этом случае при прочих равных условиях доля поперечной деформации несколько больше, чем при прокатке заготовок овального сечения.

4. Соотношение между уширением медных образцов и образцов из углеродистой стали в круглых калибрах при принятых в опытах условиях приблизительно такое же, как и при прокатке в гладких валках, т.е. уширение медных образцов несколько меньше.

### 3. УШИРЕНИЕ ПРИ ПРОКАТКЕ В ТРЕХВАЛКОВЫХ КАЛИБРАХ

Экспериментальные исследования проводили в трехвалковых клетях 280 литейно-прокатного агрегата медной катанки. Исследовалась деформация образцов круглого (диаметром 12 и 18 мм) и шестиугольного (диаметр вписанной окружности – 12 и 17 мм) сечения из стали Ст3 и образцов круглого сечения диаметром 10, 18, 40 мм из меди М1 при прокатке в треугольных и стрелчатых треугольных калибрах. После выполнения соответствующих измерений часть стальных и медных образцов, прокатанных в треугольных и стрелчатых треугольных калибрах, прокатывали после повторного нагрева в трехвалковых круглых калибрах диаметром 8 и 12,5 мм. Образцы нагревали в газовой печи, температура нагрева контролировалась оптическим пирометром.

Образцы до и после прокатки измеряли так же, как при исследованиях деформации в двухвалковых клетях. Однако, поскольку поперечные сечения профилей, прокатанных в трехвалковых калибрах, имеют не две, а три оси симметрии, для измерения использовано специальное устройство, позволяющее измерить диаметр окружности, вписанной в данное сечение. Измерение осуществлялось с помощью индикатора.

Величина площади  $F_{01}$ , в зависимости от формы сечения исходной заготовки и калибра, определялась из выражений, приведенных ниже:

прокатка в треугольном калибре образцов шестиугольного сечения –

$$F_{01} = \frac{\sqrt{3}}{4} d_1^2 \left[ 2 \frac{d_0}{d_1} - \left( \frac{d_0}{d_1} - 1 \right)^2 \right],$$

где  $d_0$  – диаметр окружности, вписанной в исходное шестиугольное сечение образца;  $d_1$  – диаметр окружности, вписанной в треугольный калибр (диаметр калибра);

прокатка в треугольном калибре образцов круглого сечения –

$$F_{01} = F_0 \left[ 1 - \frac{3}{\pi} \left( \arcsin \sqrt{1 - \frac{d_1^2}{d_0^2}} - \frac{d_1}{d_0} \sqrt{1 - \frac{d_1^2}{d_0^2}} \right) \right];$$

прокатка образцов круглого сечения в стрелчатом треугольном калибре –

$$F_{01} = F_0 \left\{ 1 - \frac{3}{\pi} \left[ \arcsin \frac{2y_0}{d_0} - \frac{4R_{обр}^2}{d_0^2} \arcsin \frac{y_0}{R_{обр}} + \frac{2y_0}{d_0^2} (2R_{обр} - d_1) \right] \right\},$$

где  $R_{обр}$  – радиус образующий стрелчатого треугольного калибра;

$$y_0 = 0,5 d_0 \sqrt{1 - \left[ \frac{d_1}{d_0} \cdot \frac{4R_{обр} - d_1 - (d_0^2/d_1)}{2(2R_{обр} - d_1)} \right]^2};$$

прокатка образцов, поперечное сечение которых представляет собой стрельчатый треугольник, в трехвалковом круглом калибре:

$$F_{01} = \frac{\pi}{4} d_k^2 \left\{ 1 - \frac{3}{\pi} \left[ \arcsin \frac{2y'_0}{d_k} - \frac{4R_{обр}^2}{d_k^2} \arcsin \frac{y'_0}{R_{обр}} + \frac{2y'_0}{d_k^2} (2R_{обр} - d_1) \right] \right\},$$

где  $d_1$  — диаметр окружности, вписанной в поперечное сечение исходного образца (диаметр стрельчатого треугольного калибра, в котором был предварительно прокатан образец);  $d_k$  — диаметр круглого калибра.

Величину  $y'_0$  найдем из выражения (2.52). Результаты экспериментов, приведенные на рис. 50 — 55, позволяют сделать следующие выводы:

1. В пределах исследованного диапазона обжатий ( $\Delta d/d_0 = 0,15 \div 0,30$ ) величина поперечной деформации при прокатке в треугольных калибрах заготовок круглого и шестиугольного сечения той же площади приблизительно одна и та же (рис. 50, 51). При этом, как видно из кривых, изображенных на рис. 50 — 54, величина обжатия незначительно влияет на величину поперечной деформации.

2. При прочих равных условиях доля поперечной деформации при прокатке в стрельчатых треугольных калибрах меньше, чем в треугольных калибрах. Как видно из рис. 52 — 54, разница в уширении тем значительнее, чем больше величина обжатия.

3. Сравнение кривых, представленных на рис. 52 — 54, показывает, что при одном и том же обжатии разница между величиной ко-

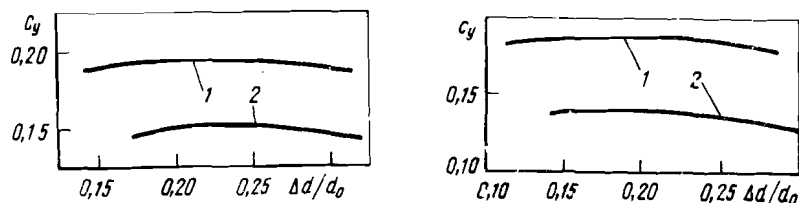


Рис. 50. Уширение круга в треугольных калибрах (сталь Ст3,  $t = 1100 - 1150^\circ\text{C}$ ): 1 — заготовка диаметром 12 мм ( $D = 272$  мм), 2 — заготовка диаметром 18 мм ( $D = 268$  мм)

Рис. 51. Уширение шестигранника в треугольных калибрах: (сталь Ст3,  $1050 - 1150^\circ\text{C}$ ):

1 —  $d_0 = 12$  мм,  $D = 272$  мм; 2 —  $d_0 = 17$  мм,  $D = 268$  мм

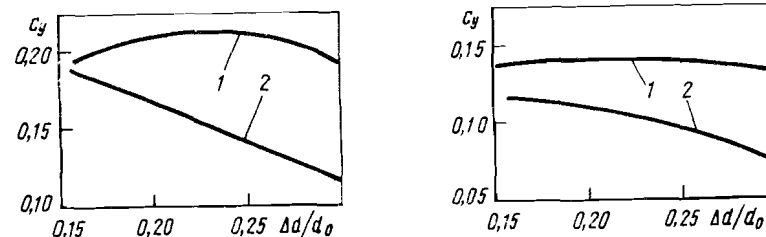


Рис. 52. Уширение круга диаметром 10 мм (медь М1,  $720 - 750^\circ\text{C}$ ): 1 — в треугольном калибре,  $D = 274$  мм; 2 — в стрельчатом треугольном калибре,  $D = 274$  мм,  $R_{обр} = 16$  мм

Рис. 53. Уширение круга диаметром 18 мм (медь М1,  $800 - 850^\circ\text{C}$ ): 1 — в треугольном калибре,  $D = 268$  мм; 2 — в стрельчатом треугольном калибре,  $D = 268$  мм,  $R_{обр} = 30$  мм

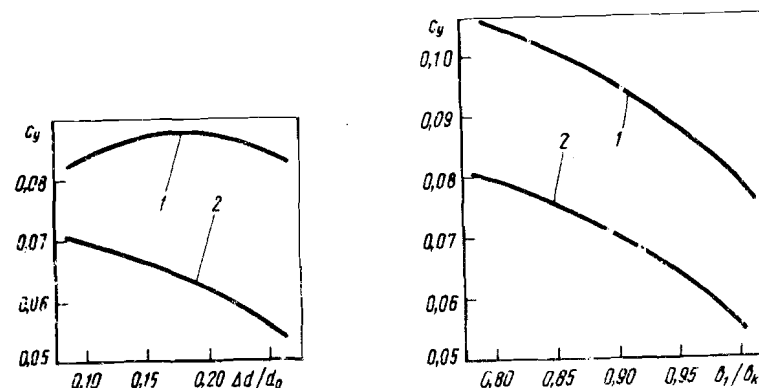


Рис. 54. Уширение круга диаметром 40 мм (медь М1,  $800 - 850^\circ\text{C}$ ): 1 — в треугольном калибре,  $D = 250$  мм; 2 — в стрельчатом треугольном калибре,  $D = 250$  мм,  $R_{обр} = 80$  мм

Рис. 55. Уширение в круглых трехвалковых калибрах (медь М1,  $750 - 800^\circ\text{C}$ ): 1 — в круге диаметром 8 мм; 2 — в круге диаметром 12,5 мм

эффициента уширения при прокатке в треугольном и стрельчатом треугольном калибре тем больше, чем больше стрельчатость калибра, т.е. чем меньше отношение радиуса образующей калибра к радиусу вписанной в калибр окружности. Так, при  $\Delta d/d_0 = 0,2$  разница в величине коэффициента уширения составляет при прокатке заготовок диаметром 10 мм около 23 % (рис. 52), а заготовок диаметром 40 мм (рис. 54) — 30 %.

4. Основной особенностью деформации в трехвалковых калибрах

по сравнению с двухвалковыми является значительно меньшая величина поперечной деформации. Эта разница в уширении особенно видна при сравнении результатов прокатки в круглых двухвалковых и трехвалковых калибрах, форма которых даже при наличии выпусков практически одна и та же. Так, при прокатке в круглом двухвалковом калибре диаметром 13,2 мм заготовок из меди М1 (см. рис. 48) величина коэффициента уширения при полном заполнении калибра металлом составляет 0,24, а в близком по диаметру трехвалковом калибре диаметром 12,5 мм (рис. 55) всего лишь 0,08.

5. Так же, как при прокатке в двухвалковых калибрах, с увеличением размеров сечения прокатываемого образца величина поперечной деформации уменьшается. Как видно из рис. 52, 54, коэффициент уширения при прокатке в треугольном калибре заготовок из меди М1 диаметром 10 мм равен 0,19 – 0,22, в то время как при прокатке круга 40 мм равен 0,07 – 0,09.

#### 4. РАСЧЕТ УШИРЕНИЯ ПРИ ПРОКАТКЕ

Экспериментальные исследования деформации, а также опыт осеждения и исследования непрерывных многоклетевых станов для производства катанки создали возможность выявить основные закономерности течения металла при прокатке, что позволило в конечном итоге получить довольно простые уравнения для определения величины поперечной деформации, составляющие основу расчета калибровки валков. Ниже дается краткое описание метода математической обработки полученных экспериментальных данных и составления уравнений для определения коэффициента уширения при различных случаях прокатки.

При составлении уравнений, основывающихся на результатах экспериментальных исследований, необходимо стремиться к тому, чтобы эти уравнения не только достаточно точно представляли экспериментальные данные, но и удовлетворяли крайним условиям, определяемым физическим смыслом искомого параметра, в данном случае коэффициента уширения, поскольку тогда область их пригодности будет максимальной.

В гл. II упоминалось, что в условиях свободной или близкой к свободной прокатки, характерных для непрерывных заготовочных, сортовых и проволочных станов, коэффициент уширения как параметр, определяющий долю поперечной деформации в общей деформации полосы при прокатке, является всегда величиной положительной и меньшей единицы, т.е. должен находиться в пределах  $0 < c_y < 1$ . В соответствии с этим наиболее удобной формой уравнения для коэффициента уширения является гиперболическая функция

$$c_y = 1/(1 + \varphi), \quad (3.1)$$

поскольку в этом случае крайние условия для  $c_y$  выполняются при любом положительном значении  $\varphi$ . Это существенно облегчает подбор соответствующих функций, отражающих влияние на величину поперечной деформации каждого из действующих факторов. Как легко проверить, величина  $\varphi$  представляет собой соотношение между продольной и поперечной деформациями  $\varphi = (1 - c_y)/c_y$ .

Для того чтобы оценить влияние каждого из факторов, все экспериментальные данные сгруппированы таким образом, что внутри группы переменной величиной был только тот фактор, влияние которого анализировалось. Переходя к анализу влияния последующих факторов, эта операция повторялась путем соответствующей перегруппировки экспериментальных данных. После этого для каждой группы данных построены графики, показывающие характер зависимости коэффициента уширения от данного фактора. Последняя операция анализа заключалась в подборе для полученных кривых наиболее подходящих уравнений.

В результате такого анализа из всей совокупности действующих факторов удалось выделить те, которые оказывают наибольшее влияние на величину поперечной деформации при прокатке в гладких валках. Такими факторами являются форма и размеры поперечного сечения исходной заготовки, диаметр валков и величина обжатия; воздействие температуры прокатки, качества поверхности валков и полосы, вида материала проявляется в значительно меньшей степени.

При прокатке в калибрах, кроме перечисленных факторов, большое воздействие на величину поперечной деформации оказывает наличие подпирающих сил со стороны боковых стенок калибра.

Количественный анализ результатов экспериментов позволил установить, что функцию  $\varphi$  (3.1), отражающую суммарное воздействие всех этих факторов, можно представить в виде произведения нескольких функций, каждая из которых характеризует влияние на величину поперечной деформации какого-либо из факторов:

$$\varphi = A \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \varphi_4,$$

где  $\varphi_1$  — функция, характеризующая влияние соотношения диаметра валков и высоты исходной заготовки;  $\varphi_2$  — функция, характеризующая влияние величины обжатия;  $\varphi_3$  — функция, характеризующая влияние соотношения ширины и высоты исходной заготовки;  $\varphi_4$  — функция, характеризующая влияние подпирающего действия на прокатываемый металл боковых стенок калибра;  $A$  — некоторый коэффициент, зависящий от вида прокатываемого материала и температуры прокатки.

Опуская все промежуточные операции, связанные с подбором наиболее подходящих функций, отражающих воздействие отдельных

факторов, приведем здесь лишь конечные уравнения для определения величины поперечной деформации при прокатке заготовок с различной формой поперечного сечения, полученные на основании экспериментальных исследований деформации.

#### Поперечная деформация при прокатке в гладких валках

Величину поперечной деформации при прокатке в гладких валках заготовок квадратного сечения можно представить в виде следующего уравнения:

$$c_y = \frac{1}{1 + A h_0^2 (h_0 + \Delta h) / \Delta h h_1 (4h_0 + D)} \quad (3.2)$$

где  $h_0, h_1$  — высота полосы до и после прокатки ( $\Delta h = h_0 - h_1$ );  $D$  — диаметр валков.

Здесь отношение  $h_0 / (4h_0 + D)$  представляет собой функцию  $\varphi_1$ , отражающую влияние высоты исходной заготовки и диаметра валков, а отношение  $h_0 (h_0 + \Delta h) / \Delta h h_1$  — функцию  $\varphi_2$ , характеризующую влияние величины обжатия.

Оказалось, что для квадратных, прямоугольных и круглых заготовок вид функции  $\varphi_1$  не зависит от формы сечения заготовки, а также от прокатываемого материала и других факторов прокатки. В частности, для заготовок круглого сечения функция  $\varphi_1$  имеет вид

$$\varphi_1 = d_0 / (4d_0 + D),$$

где  $d_0$  — диаметр заготовки.

Что же касается функции  $\varphi_2$ , то, как видно из данных, представленных на рис. 21 — 28, характер кривых изменения величины поперечной деформации от обжатия при прокатке в гладких валках зависит от формы поперечного сечения заготовки и вида прокатываемого материала. При этом воздействие материала сказывается в основном при обжатиях, по высоте заготовки превышающих 45 — 50 %, что можно объяснить разной степенью наклепа, который приобретают различные материалы при значительных обжатиях и наличие которого уменьшает величину поперечной деформации. Поскольку такие большие обжатия на практике обычно не встречаются, это позволяет в функции  $\varphi_2$  не учитывать фактор влияния вида прокатываемого материала. Влияние формы сечения заготовки в наибольшей степени сказывается при небольших (менее 25 %) обжатиях.

В частности, из опытов следует, что при прокатке в гладких валках заготовок круглого сечения зависимость поперечной деформации от обжатия характеризуется функцией вида  $\varphi_2 = d_0 / d_1 \cdot d_0 / \Delta d$ , где  $d_1$  — высота полосы после прокатки,  $\Delta d = d_0 - d_1$ .

Таким образом, уравнение для определения величины поперечной деформации при прокатке в гладких валках заготовок круглого сечения будет иметь следующий вид:

$$c_y = \frac{1}{1 + \frac{4}{3} \cdot \frac{A d_0}{4d_0 + D} \cdot \frac{d_0}{d_1} \sqrt{\frac{d_0}{\Delta d}}} \quad (3.3)$$

Сравнительный анализ экспериментальных значений коэффициента уширения при прокатке заготовок квадратного сечения и заготовок той же исходной высоты, но имеющих различную ширину, позволил определить вид функции, учитывающей влияние соотношения ширины и высоты прокатываемой полосы на распределение деформаций при прокатке. Для исследованного диапазона значений отношений  $b_0 / h_0$  от 0,6 до 1,7 влияние ширины заготовки на величину поперечной деформации можно представить функцией вида

$$\varphi_3 = b_0 / h_0 \sqrt[3]{b_0 / h_0},$$

где  $h_0, b_0$  — соответственно высота и ширина заготовки.

Уравнение для определения величины поперечной деформации при прокатке в гладких валках заготовок прямоугольного сечения имеет вид

$$c_y = \frac{1}{1 + \frac{A h_0}{4h_0 + D} \cdot \frac{h_0 (h_0 + \Delta h)}{\Delta h h_1} \cdot \frac{b_0}{h_0} \sqrt[3]{\frac{b_0}{h_0}}} \quad (3.4)$$

Величина коэффициента  $A$  отражает влияние на величину поперечной деформации совокупности факторов, таких, как вид прокатываемого материала, температура прокатки, условия трения на контактной поверхности и др. Значения коэффициента  $A$ , полученные на основании наших опытов, приведены в табл. 1.

Для стали и меди большие величины коэффициента  $A$ , приведенные в табл. 1, соответствуют большим значениям температуры прокатки. Для алюминия, наоборот, большая величина коэффициента  $A$

Таблица 1. Экспериментальные значения коэффициента  $A$  для различных материалов

Наименование материала	Температура прокатки, °C	Коэффициент $A$
<i>Прокатка с водой</i>		
Углеродистая сталь (сталь 20, 45, Ст3)	950 — 1150	4,1 — 4,7
Хромистая коррозионностойкая сталь (2Х13) .....	950 — 1100	3,7 — 4,1
<i>Прокатка с эмульсией</i>		
Медь (М1, М2) .....	600 — 850	4,5 — 5,0
Алюминий (А7Е, АД1) .....	350 — 500	4,5 — 4,0



соответствует меньшим из указанных в табл. 1 значениям температуры. Как показывает опыт, в расчетах калибровок валков при прокатке стали и меди для всех клетей стана можно принимать наибольшие значения коэффициента  $A$ , поскольку по характеру влияния на величину уширения уменьшение температуры прокатываемой полосы по клетям в какой-то степени компенсируется повышением скорости прокатки.

Как видно из приведенных на рис. 21 — 28 графиков, влияние обжатия на величину поперечной деформации заметно сказывается только при малых (менее 20 %) и больших (более 50 %) его значениях. В диапазоне обычно применяемых на практике высоких деформаций ( $0,20 < \Delta h/h_0 < 0,50$ ) независимо от формы и размеров прокатываемой полосы и вида материала изменение коэффициента уширения не превышает нескольких процентов. Это обстоятельство позволяет упростить полученные уравнения для определения коэффициента уширения при прокатке в гладких валках, заменив в них текущее значение функции обжатия на ее среднее для данного диапазона обжатий значение. В этом случае уравнения для расчета поперечной деформации при прокатке в гладких валках будут иметь следующий вид:

для заготовок квадратного сечения

$$c_y = \frac{1}{1 + \frac{6Ah_0}{4h_0 + D}}; \quad (3.5)$$

для заготовок прямоугольного сечения

$$c_y = \frac{1}{1 + \frac{6Ab_0}{4h_0 + D} \sqrt[3]{\frac{b_0}{h_0}}}; \quad (3.6)$$

для заготовок круглого сечения

$$c_y = \frac{1}{1 + \frac{3,5Ad_0}{4d_0 + D}}. \quad (3.7)$$

#### Поперечная деформация при прокатке в калибрах

На основании многочисленных исследований процесса прокатки, а также всего имеющегося практического опыта известно, что при прочих равных условиях величина поперечной деформации при прокатке в вытяжных калибрах вследствие подпирающего действия стенок калибра меньше, чем на гладких валках. Отступлением от этого общего правила является прокатка квадрата в овальных калибрах с малыми обжатиями ( $\frac{\Delta h}{h_0} < 0,15$ ). В этом случае величина поперечной деформации (см. рис. 33) может быть даже несколько боль-

ше, чем при тех же обжатиях в гладких валках. С практической точки зрения важной является область более значительных обжатий, которые в овальных калибрах обычно превышают 15 %. При составлении уравнения для определения величины поперечной деформации при прокатке квадрата в овальном калибре это отступление во внимание не принималось.

Наряду с формой калибра фактором, определяющим величину поперечной деформации при прокатке в калибрах, является обжатие. Исключение представляют квадратные и круглые калибры, где влияние обжатия на соотношение между поперечной и продольной деформациями (при  $\Delta F/F_0 > 0,20$ ) незначительно. Что же касается ромбических, овальных, стрелчатых, треугольных калибров, то здесь величина обжатия оказывает весьма существенное влияние на уширение: чем больше обжатие, тем меньше доля поперечной деформации. При прокатке в ящичных и треугольных калибрах влияние обжатия на величину поперечной деформации сказывается в меньшей степени.

Таким образом, в общем случае функция  $\varphi_4$ , характеризующая условия прокатки в калибре, зависит от формы калибра, величины обжатия и при любых значениях входящих параметров должна быть больше единицы.

На основании анализа результатов проведенных экспериментальных исследований получены уравнения для расчета величины поперечной деформации при прокатке в вытяжных калибрах, которые рассмотрены ниже.

#### Уширение при прокатке в ящичных калибрах

При условии, что ширина калибра составляет 0,95 — 1,0 ширины заготовки, входящей в калибр, величину поперечной деформации можно найти из следующих уравнений:

для заготовок прямоугольного сечения

$$c_y = \frac{1}{1 + \frac{6Ab_0}{4h_0 + D} \left(1 + \sqrt{\frac{\Delta h}{h_1 \lg \varphi}}\right)^3 \sqrt[3]{\frac{b_0}{h_0}}}, \quad (3.8)$$

где  $D$  — диаметр валка по дну калибра;  $h_0$ ,  $b_0$  — высота и ширина заготовки;  $h_1$  — высота полосы после прокатки;  $\varphi$  — угол наклона боковых стенок к вертикальной оси калибра (угол выпуска калибра);

для заготовок квадратного сечения

$$c_y = \frac{1}{1 + \frac{6Ah_0}{4h_0 + D} \left(1 + \sqrt{\frac{\Delta h}{h_1 \lg \varphi}}\right)}. \quad (3.9)$$

$$c_y = \frac{1}{1 + \frac{3Ah_{k0}}{4h_{k0} + D} [1 + 35A \left( \frac{\Delta h_k}{h_{k1}} \tan \beta \right)^3]} \quad (3.10)$$

где  $h_{k0}$  — диагональ исходного квадрата;  $h_{k1}$  — высота ромбического калибра без учета закругления угла при вершине калибра;  $\Delta h_k = h_{k0} - h_{k1}$ ;  $D$  — диаметр валка по вершине калибра;  $\beta$  — угол наклона образующей калибра к линии разреза валков.

Выражение (3.10) получено при условии, что радиус закругления угла при вершине ромбического калибра не превышает  $0,2 h_{k1}$ .

Уширение при прокатке в овальных калибрах

прокатка квадрата

$$c_y = \frac{1}{1 + \frac{Ah_0}{4h_0 + D} \cdot \frac{h_0(h_0 + \Delta h)}{\Delta h h_1} [1 + 12,5 A \left( \frac{\Delta h}{R_{обр}} \right)^3]} \quad (3.11)$$

где  $h_1$  — высота овального калибра;  $\Delta h = h_0 - h_1$ ;  $D$  — диаметр валка в вершине калибра;  $R_{обр}$  — радиус образующей калибра; прокатка круга

$$c_y = \frac{1}{1 + \frac{4Ad_0}{3(4d_0 + D)} \frac{d_0}{d_1} \sqrt{\frac{d_0}{\Delta d}} [1 + 15 A \left( \frac{\Delta d}{R_{обр}} \right)^3]} \quad (3.12)$$

где  $d_1$  — диаметр вписанной в овальный калибр окружности,  $\Delta d = d_0 - d_1$ .

Очевидно, что понятия высота калибра ( $h_1$ ) и диаметр вписанной окружности ( $d_1$ ) для овальных калибров выражают одну и ту же величину и выбор любого из них для характеристики размеров овального калибра зависит от формы сечения заготовки. В частности, при прокатке кругов, размер поперечного сечения которых характеризуется величиной диаметра ( $d_0$ ), высоту овального калибра удобнее обозначить через диаметр вписанной окружности ( $d_1$ ), а при прокатке квадратов — через  $h_1$ . Все сказанное полностью относится и к прокатке в гладких валках.

В случае, если относительное обжатие по высоте заготовки превышает 25 %, для расчета величины поперечной деформации при прокатке в овальных калибрах можно использовать упрощенные выражения, полученные из (3.5) и (3.7):

прокатка квадрата (при  $\Delta h/h_0 \geq 0,25$ )

$$c_y = \frac{1}{1 + \frac{6Ah_0}{4h_0 + D} [1 + 12,5 A \left( \frac{\Delta h}{R_{обр}} \right)^3]} \quad (3.13)$$

прокатка круга (при  $\Delta d/d_0 \geq 0,25$ )

$$c_y = \frac{1}{1 + \frac{3,5 Ad_0}{4d_0 + D} [1 + 15 A \left( \frac{\Delta d}{R_{обр}} \right)^3]} \quad (3.14)$$

Числовой анализ показывает, что применение в расчетах калибровок упрощенных выражений (3.13), (3.14) при условии, что обжатия по высоте заготовки находятся в пределах указанного диапазона ( $\Delta h/h_0 = 0,25 - 0,50$ ), практически не снижает точности вычислений.

Уширение при прокатке в круглых и квадратных калибрах

Как видно из данных, представленных на рис. 47 — 49, величина поперечной деформации при прокатке заготовок овального сечения в круглых и квадратных калибрах существенно зависит от размеров калибра и степени заполнения его металлом и мало зависит от величины обжатия ( $\Delta F/F_0$ ), во всяком случае, при обжатиях больших 0,2, которые характерны для реальных условий прокатки на сортозных и проволочных станах. С практической точки зрения, нас прежде всего интересует величина поперечной деформации при полном заполнении калибра металлом, поскольку именно из этого условия определяются размеры квадратных и круглых калибров.

На основании анализа результатов проведенных экспериментальных исследований (см. рис. 47 — 49) получены следующие уравнения для определения величины поперечной деформации при прокатке заготовок овального сечения в квадратных и круглых калибрах при полном или близком к полному заполнению их металлом:

для квадратных калибров

$$c_y = \frac{1}{1 + 15 A h_k / (4 h_k + D)} \quad (3.15)$$

где  $h_k$  — высота калибра ( $h_k = h \sqrt{2}$ ,  $h$  — сторона квадрата);  $D$  — диаметр валка в вершине калибра;

для круглых калибров

$$c_y = \frac{1}{1 + 15 A d_k / (4 d_k + D)} \quad (3.16)$$

где  $d_k$  — диаметр калибра.

Уширение при прокатке в трехвалковых калибрах

Величина поперечной деформации при прокатке в треугольных калибрах заготовок шестиугольного и круглого сечения (при  $\Delta d/d_0 = 0,15 - 0,30$ ) может быть представлена уравнением:

$$c_y = \frac{1}{1 + 25 A d_0 / (4 d_0 + D)} \quad (3.17)$$

Здесь в случае шестиугольной заготовки  $d_0$  — диаметр окружности, вписанной в исходный шестиугольник, для круглой заготовки — диаметр заготовки.

Как было сказано выше, величина поперечной деформации в стрелчатых треугольных калибрах меньше, чем в треугольных при тех же диаметрах валков и прокатываемых заготовок, причем эта разница тем значительней, чем больше обжатие и стрелчатость калибра. В соответствии с этим уравнение для определения величины поперечной деформации при прокатке заготовок круглого сечения в стрелчатых треугольных калибрах имеет следующий вид:

$$c_y = \frac{1}{1 + 25 A d_0 (1 + 5 A \Delta d^2 / R_{обп}^2) / (4 d_0 + D)}, \quad (3.18)$$

где  $\Delta d$  — обжатие в калибре;  $\Delta d = d_0 - d_1$ ;  $d_1$  — диаметр вписанной в калибр окружности.

Для круглых трехвалковых калибров (сечение заготовки — стрелчатый треугольник) при полном заполнении калибра металлом имеем

$$c_y = \frac{1}{1 + 90 A d_k / (4 d_k + D)}. \quad (3.19)$$

Как видим, уравнение (3.19) структурно аналогично уравнению для расчета поперечной деформации в двухвалковых круглых калибрах.

Полученные уравнения для определения величины поперечной деформации (3.2) — (3.19) действительны для режимов свободной или близкой к свободной прокатки, что соответствует условиям деформации в сортовых и проволочных станах. Эти уравнения составляют основу расчета размеров калибров и предельных значений вытяжек для различных вытяжных систем.

#### Г л а в а IV. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ КАЛИБРОВ

Расчет размеров калибров заключается в совместном решении полученных в предыдущей главе уравнений, характеризующих распределение деформации в продольном и поперечном направлениях и уравнений, связывающих геометрические размеры и форму калибров с параметрами происходящей в них деформации.

Независимо от формы калибра соотношение между его размерами и размерами прокатываемой в нем полосы можно представить в виде следующего уравнения (для  $i$ -того калибра):

$$F_{\kappa i} - \Delta F_{\kappa i} = F_i - \Delta F_{yi}, \quad (4.1)$$

где  $F_{\kappa i}$  — площадь калибра;  $\Delta F_{\kappa i}$  — часть площади калибра, которая была бы свободна от металла при отсутствии уширения;  $F_i$  —

площадь поперечного сечения прокатываемой полосы;  $\Delta F_{yi}$  — приращение площади сечения полосы за счет уширения.

В соответствии с (2.4) величина  $\Delta F_{yi}$  равна

$$\Delta F_{yi} = c_{yi} \Delta F_i,$$

где  $c_{yi}$  — коэффициент уширения в  $i$ -том калибре. Поскольку разность  $(F_{\kappa i} - \Delta F_{\kappa i})$  представляет собой площадь поперечного сечения полосы при отсутствии уширения, величина смещенной площади металла выразится, как

$$\Delta F_i = F_{i-1} - (F_{\kappa i} - \Delta F_{\kappa i}), \quad (4.2)$$

где  $F_{i-1}$  — площадь сечения полосы при выходе из предыдущего калибра.

Отсюда  $\Delta F_{yi} = c_{yi} [F_{i-1} - (F_{\kappa i} - \Delta F_{\kappa i})]$ . Подставляя значение  $\Delta F_{yi}$  в (4.1), будем иметь

$$F_{\kappa i} - \Delta F_{\kappa i} = \frac{1 - \lambda_i c_{yi}}{1 - c_{yi}} F_i, \quad (4.3)$$

где  $\lambda_i$  — вытяжка в  $i$ -том калибре.

Подставив значение разности  $F_{\kappa i} - \Delta F_{\kappa i}$  в (4.2) и выражая площадь сечения полосы, входящей в  $i$ -тый калибр, как  $F_{i-1} = \lambda_i F_i$ , получим

$$\Delta F_i = \frac{\lambda_i - 1}{1 - c_{yi}} F_i. \quad (4.4)$$

По аналогии с (4.4) величина смещенной площади в следующем  $(i + 1)$ -м калибре будет равна

$$\Delta F_{i+1} = \frac{\lambda_{i+1} - 1}{1 - c_{yi+1}} F_{i+1}. \quad (4.5)$$

В частном случае при полном заполнении калибра металлом, т.е. при  $F_{\kappa i} = F_i$  из (4.3) имеем

$$\Delta F_{\kappa i} = \frac{c_{yi} (\lambda_i - 1)}{1 - c_{yi}} F_i. \quad (4.6)$$

Это же выражение для последующего  $(i + 1)$ -го калибра запишется в виде:

$$\Delta F_{\kappa i+1} = \frac{c_{yi+1} (\lambda_{i+1} - 1)}{1 - c_{yi+1}} F_{i+1}. \quad (4.7)$$

Уравнения (4.1) — (4.7) носят общий характер и справедливы для любой системы калибров, а также для случая прокатки в гладких валках. Они являются исходными для составления уравнений, связывающих размеры калибра с параметрами происходящей в нем деформации. Эти уравнения лежат в основе не только расчета размеров калибров, но и анализа вытяжных возможностей как отдельного

калибра, так и системы калибров в целом, приведенного в гл. V. Учитывая, что вид этих уравнений зависит от формы калибров, способ расчета их размеров и предельных значений вытяжек (гл. V) дается отдельно для каждой из рассматриваемых здесь вытяжных систем.

Для разных систем калибров зависимость между размерами калибров и параметрами деформации выражаются либо нелинейными алгебраическими, либо трансцендентными уравнениями, решение которых возможно только приближенными методами и требует большого объема вычислений. В связи с этим для каждой из рассмотренных систем предлагаются более простые выражения, полученные путем численного анализа исходных уравнений в широком диапазоне значений входящих параметров. При использовании этих выражений расчеты размеров калибров и предельных вытяжек сводятся к выполнению простых арифметических действий.

### 1. РАСЧЕТ ЯЩИЧНЫХ КАЛИБРОВ

Системы ящичных калибров используются в качестве вытяжных обычно в черновых клетях сортовых станов при прокатке крупных квадратных и прямоугольных профилей.

Как видно из рис. 56, площадь  $i$ -того ящичного калибра можно представить следующим образом:

$$F_{ki} = h_{ki} b_{ki} + \frac{h_{ki}^2}{2} \left[ \left( 1 - \frac{s_i^2}{h_{ki}^2} \right) \operatorname{tg} \varphi_i - 4r_{1i} (\operatorname{tg} \gamma_i - \gamma_i) \right], \quad (4.8)$$

где  $h_{ki}$  — высота калибра;  $b_{ki}$  — ширина по дну калибра;  $s_i$  — зазор между валками;  $r_{1i}$  — радиус закругления в углах калибра;  $\varphi_i$  — угол наклона боковой стенки калибра к вертикальной оси (угол выпуска);  $\gamma_i = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_i}{2}$ .

Таким образом, для построения ящичного калибра необходимо задаться радиусами закруглений в углах калибра и у буртов ( $r_{1i}$ ,

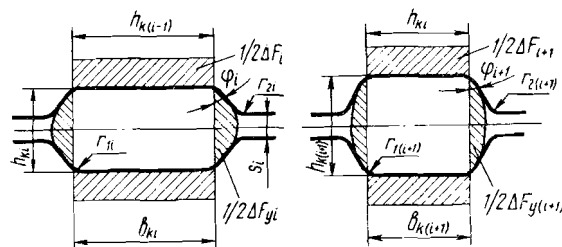


Рис. 56. Деформация в калибрах системы прямоугольник — квадрат

$r_{2i}$ ), величиной зазора между валками, а также иногда величиной вогнутости дна калибра ( $f_i$ ). Следует иметь в виду, что от выбора этих параметров в значительной степени зависит стабильность процесса прокатки и в конечном счете производительность прокатного стана.

Так, наличие закруглений в углах калибра уменьшает концентрацию напряжений, за счет чего повышается долговечность валков, а также снижается неравномерность остывания профиля в углах и на гранях. Указанные положительные эффекты будут тем значительнее, чем больше величина радиуса  $r_1$ . Однако одновременно с этим увеличение  $r_1$  ведет к уменьшению устойчивости полосы в калибре, в результате чего повышается вероятность сваливания ее при прокатке.

Величина зазора между валками и связанная с ним глубина вреза в валки выбираются обычно исходя из назначения калибра; чем больше глубина вреза, тем выше устойчивость полосы в калибре и тем больше может быть высота задаваемой в калибр полосы. С другой стороны, с уменьшением глубины вреза повышается прочность вала и улучшается захват полосы. Кроме того, когда в калибре осуществляется несколько пропусков, большая величина межвалкового зазора позволяет получать из одного калибра полосу различного поперечного сечения.

Существенное воздействие на процесс прокатки оказывает вогнутость дна калибра, наличие которого повышает устойчивость полосы в калибре; уменьшает возможность переполнения последующего ящичного калибра и одновременно позволяет уменьшить в нем угол выпуска, что также повышает устойчивость полосы; обеспечивает более плавный захват полосы валками и, следовательно, снижает динамическую составляющую нагрузки на валки при захвате.

Учитывая, что в ящичных калибрах прокатываются крупные сечения со значительными обжатиями, в результате чего оборудование работает в условиях высокого уровня нагруженности, последнее обстоятельство может иметь определяющее значение при построении ящичных калибров. Вместе с тем, несмотря на указанные преимущества вогнутых ящичных калибров по сравнению с плоскими, применение их может оказаться нецелесообразным вследствие повышенных потерь тепла в углах профиля, что становится особенно существенным при низких температурах прокатки.

Таким образом, радиусы закруглений, глубина вреза в валки и вогнутость дна калибра должны выбираться с учетом конкретных условий. Из данных практики, для построения ящичных калибров рекомендуются следующие значения указанных параметров:

радиусы закруглений  $r_1 = (0,1 \div 0,2) b_k$ ;  $r_2 = 0,5 r_1$ ;  
зазор между валками  $s = (0,1 \div 0,2) h_k$ ;  
величина вогнутости дна калибра  $f = (0,025 \div 0,050) h_k$ .

Поскольку величину зазора между валками, радиусы закруглений в углах калибра и величину вогнутости выбирают в зависимости от габаритов калибра, расчет ящичных калибров заключается в определении высоты калибра  $h_{\kappa}$ , ширины  $b_{\kappa}$  и угла выпуска  $\varphi$ .

Ниже излагается способ расчета размеров ящичных калибров применительно к системе прямоугольник — квадрат, однако этот способ можно применять и для других сочетаний ящичных калибров.

Определению размеров калибров должен предшествовать расчет поперечных сечений полосы по клетям, поэтому значения площадей металла в  $i$ -том прямоугольном и в  $(i-1)$ - и  $(i+1)$ -м квадратных ящичных калибрах считаем известными. Расчет начинаем с определения размеров квадратных калибров.

При распределении вытяжки между прямоугольными и квадратными калибрами в последних удобнее задаваться не площадью сечения полосы, а стороной квадрата, который должен быть получен в данном калибре.

Площадь сечения полосы в  $(i+1)$ -м квадратном ящичном калибре с учетом закруглений в углах профиля определяется из выражения

$$F_{i+1} = h_{i+1}^2 - 0,86 r_{i+1}^2. \quad (4.9)$$

Высота квадратного ящичного калибра принимается равной стороне прокатываемого в нем квадрата, т.е.  $h_{\kappa i+1} = h_{i+1}$ .

Для определения ширины калибра ( $b_{\kappa i+1}$ ) и угла выпуска ( $\varphi_{i+1}$ ) рассмотрим деформацию при прокатке в  $(i+1)$ -м калибре.

Смещенная площадь металла при прокатке в  $(i+1)$ -м квадратном ящичном калибре (см. рис. 56) равна  $\Delta F_{i+1} = F_i - h_{\kappa i+1} h_{\kappa i}$ , где  $F_i$  — площадь металла в предыдущем  $i$ -том прямоугольном калибре;  $h_{\kappa i}$  — ширина задаваемой в  $(i+1)$ -й калибр полосы, равная высоте  $i$ -того калибра.

Пренебрегая закруглением углом квадрата и принимая во внимание, что в этом случае  $F_i = \lambda_{i+1} h_{\kappa i+1}^2$ , имеем

$$\Delta F_{i+1} = F_i \left( 1 - \frac{1}{\lambda_{i+1}} \cdot \frac{h_{\kappa i}}{h_{\kappa i+1}} \right). \quad (4.10)$$

Для обеспечения надежного захвата и устойчивого положения полосы в калибре на основании практических данных рекомендуются следующие соотношения между шириной калибра и шириной задаваемой в этот калибр полосы:

для прямоугольных калибров  $b_{\kappa i} = (0,98 \div 1,0) h_{\kappa i-1}$ ;

для квадратных ящичных калибров  $b_{\kappa i+1} = (0,95 \div 1,0) h_{\kappa i}$ .

Принимая для простоты  $b_{\kappa i} = h_{\kappa i-1}$ ,  $b_{\kappa i+1} = h_{\kappa i}$  и подставляя в (4.5) значение площади  $\Delta F_{i+1}$ , получим уравнение, связывающее размеры  $(i+1)$ -го квадратного ящичного калибра с параметрами деформации

$$b_{\kappa i+1} = \frac{1 - \lambda_{i+1} c_{yi+1}}{1 - c_{yi+1}} h_{\kappa i+1}. \quad (4.11)$$

Выражение для определения коэффициента уширения при прокатке в  $(i+1)$ -м квадратном ящичном калибре в соответствии с (3.8) будет иметь следующий вид:

$$c_{yi+1} = 1 / \left[ 1 + \frac{6A h_i \sqrt{h_i/b_i}}{4b_i + D_{i+1}} \left( 1 + \sqrt{\frac{\Delta h_{i+1}}{h_{i+1} \operatorname{tg} \varphi_{i+1}}} \right) \right], \quad (4.12)$$

где  $b_i$ ,  $h_i$  — высота и ширина полосы, входящей в  $(i+1)$ -й калибр ( $h_i = h_{\kappa i}$ );  $D_{i+1}$  — диаметр валка по дну  $(i+1)$ -го калибра;  $\Delta h_{i+1} = b_i - h_{\kappa i+1}$ .

При прокатке по схеме прямоугольник — квадрат высота и ширина прямоугольной полосы после  $i$ -того калибра близки по величине соответственно сторонам предыдущего  $(i-1)$ -го и последующего  $(i+1)$ -го квадратов; разница между ними обусловлена только наличием уширения. Это позволяет без ущерба для точности вычислений коэффициента уширения принять в (4.12)

$$h_i = h_{\kappa i} = h_{i+1}, \quad b_i = b_{\kappa i} = h_{i-1}.$$

В этом случае

$$\frac{h_i}{b_i} = \frac{1}{\sqrt{\lambda_{\Sigma}}}, \quad \frac{\Delta h_{i+1}}{h_{i+1}} = \sqrt{\lambda_{\Sigma}} - 1$$

и выражение для коэффициента уширения в  $(i+1)$ -м калибре запишется в окончательном виде как

$$c_{yi+1} = 1 / \left[ 1 + \frac{6A \{ 1 + \sqrt{(\sqrt{\lambda_{\Sigma}} - 1) \operatorname{tg} \varphi_{i+1}} \}}{(4 \sqrt{\lambda_{\Sigma}} + D_{i+1}/h_{i+1}) \sqrt{\lambda_{\Sigma}}} \right]. \quad (4.13)$$

Подставив значение коэффициента  $c_{yi+1}$  в уравнение (4.11), получим

$$b_{\kappa i+1} = h_{\kappa i+1} \left[ 1 - \frac{(\lambda_{i+1} - 1) (4 \sqrt{\lambda_{\Sigma}} + D_{i+1}/h_{i+1}) \sqrt{\lambda_{\Sigma}}}{6A \{ 1 + \sqrt{(\sqrt{\lambda_{\Sigma}} - 1) \operatorname{tg} \varphi_{i+1}} \}} \right]. \quad (4.14)$$

Угол выпуска калибра  $\varphi_{i+1}$  зависит от величины поперечной деформации и может быть найден из соотношения

$$\Delta F_{\kappa i+1} \geq \Delta F_{yi+1}. \quad (4.15)$$

Площадь калибра, образованная выпусками, равна  $\Delta F_{\kappa i+1} = \frac{1}{2} h_{\kappa i+1}^2 \operatorname{tg} \varphi_{i+1}$ .

Приращение площади поперечного сечения полосы за счет уширения в соответствии с (4.4) можно представить следующим образом:

$$\Delta F_{yi+1} = c_{yi+1} \Delta F_{i+1} = c_{yi+1} \frac{\lambda_{i+1} - 1}{1 - c_{yi+1}} h_{\kappa i+1}^2.$$

Подставляя значения  $\Delta F_{\kappa i+1}$  и  $\Delta F_{yi+1}$  в (4.15), получим следующее соотношение для угла выпуска:

$$\operatorname{tg} \varphi_{i+1} \geq 2(\lambda_{i+1} - 1) \frac{c_{yi+1}}{1 - c_{yi+1}}. \quad (4.16)$$

При прокатке в ящичных калибрах обычно не стремятся иметь полного заполнения калибра металлом, так как это повышает опасность переполнения калибра и образования "лампасов", а также приводит к заметному, особенно при больших выпусках, отклонению профиля от квадратного (прямоугольного). Кроме того, после кантовки при прокатке в следующем калибре такая полоса будет иметь повышенную склонность к сваливанию в момент захвата.

Можно значительно упростить расчеты и при этом гарантировать неполное заполнение калибра металлом, если тангенс угла выпуска определять из выражения:

$$\operatorname{tg} \varphi_{i+1} = 2(\lambda_{i+1} - 1) \frac{c'_{yi+1}}{1 - c'_{yi+1}}. \quad (4.17)$$

где  $c'_{yi+1}$  — коэффициент уширения при прокатке той же полосы в гладких валках того же диаметра.

Выражение для коэффициента уширения при прокатке полосы прямоугольного сечения в гладких валках определим из (4.13); при  $\varphi_{i+1} = 90^\circ$  (гладкие валки) имеем:

$$c'_{yi+1} = \frac{1}{1 + 6A / (4\sqrt{\lambda_\Sigma} + D_{i+1} / h_{i+1}) \sqrt{\lambda_\Sigma}}. \quad (4.18)$$

Подставив значение коэффициента  $c'_{yi+1}$  в (4.17), получим выражение для расчета тангенса угла выпуска квадратного ящичного калибра:

$$\operatorname{tg} \varphi_{i+1} = \frac{\sqrt{\lambda_\Sigma}}{3A} (\lambda_{i+1} - 1) \left( 4\sqrt{\lambda_\Sigma} + \frac{D_{i+1}}{h_{i+1}} \right). \quad (4.19)$$

С учетом (4.19) выражение (4.14) примет следующий вид:

$$b_{\kappa i+1} = h_{\kappa i+1} \left[ 1 - \operatorname{tg} \varphi_{i+1} / 2 \left( 1 + \sqrt{\frac{\sqrt{\lambda_\Sigma} - 1}{\operatorname{tg} \varphi_{i+1}}} \right) \right]. \quad (4.20)$$

Определив величину  $\operatorname{tg} \varphi_{i+1}$  и подставив ее в (4.20), найдем ширину квадратного ящичного калибра.

Высота ( $h_{\kappa i}$ ) и ширина ( $b_{\kappa i}$ ) предыдущего  $i$ -того прямоугольного калибра определяются размерами  $(i+1)$ -го и  $(i-1)$ -го квадратных калибров:  $h_{\kappa i} = b_{\kappa i+1}$ ,  $b_{\kappa i} = h_{\kappa i-1}$ .

Угол выпуска  $\varphi_i$  найдем из соотношения

$$\Delta F_{\kappa i} \geq \Delta F_{yi}. \quad (4.21)$$

Приращение площади  $i$ -того калибра за счет выпусков равно  $\Delta F_{\kappa i} = \frac{1}{2} h_{\kappa i}^2 \operatorname{tg} \varphi_i$ , приращение площади поперечного сечения полосы за счет уширения  $\Delta F_{yi} = c_{yi} \Delta F_i$ .

Смещенная площадь металла в соответствии с (4.4) равна

$$\Delta F_{yi} = c_{yi} \frac{\lambda_i - 1}{1 - c_{yi}} F_i.$$

Подставляем значения  $\Delta F_{\kappa i}$  и  $\Delta F_{yi}$  в (4.21) с учетом

$$\frac{F_i}{h_{\kappa i}^2} = \frac{F_{i-1}}{\lambda_i b_{i+1}^2} \approx \lambda_{i+1}$$

и получим

$$\operatorname{tg} \varphi_i \geq 2\lambda_{i+1}(\lambda_i - 1) \frac{c_{yi}}{1 - c_{yi}}.$$

Величину коэффициента уширения при прокатке полосы квадратного сечения в ящичном калибре найдем из выражения (3.9). В случае равенства идеальных диаметров валков в  $i$ -той и  $(i+1)$ -й клетках, можно считать  $D_i = D_{i+1}$ , тогда

$$c_{yi} = \frac{1}{1 + 6A [1 + \sqrt{(\sqrt{\lambda_\Sigma} - 1) / \operatorname{tg} \varphi_i}] / (4 + D_{i+1} / h_{i+1} \sqrt{\lambda_\Sigma})}. \quad (4.22)$$

Для того чтобы обеспечить неполное заполнение  $i$ -того прямоугольного калибра металлом, тангенс угла выпуска по аналогии с квадратным ящичным калибром определяем как

$$\operatorname{tg} \varphi_i = 2\lambda_{i+1} (\lambda_i + 1) \frac{c'_{yi}}{1 - c'_{yi}}. \quad (4.23)$$

Коэффициент уширения при прокатке той же полосы в гладких валках диаметром  $D_{i+1}$  найдем из (4.22); при  $\varphi_i = 90^\circ$

$$c'_{yi} = \frac{1}{1 + 6A / (4 + D_{i+1} / h_{i+1} \sqrt{\lambda_\Sigma})}.$$

Подставив это значение коэффициента  $c'_{yi}$  в уравнение (4.23), получим после соответствующих преобразований выражение для определения тангенса угла выпуска  $i$ -того прямоугольного калибра

$$\operatorname{tg} \varphi_i = \frac{1}{3A} \lambda_{i+1} (\lambda_i - 1) \left( 4 + \frac{D_{i+1}}{h_{i+1} \sqrt{\lambda_\Sigma}} \right). \quad (4.24)$$

Выражения (4.19), (4.20), (4.24) позволяют при известных значениях вытяжки определить все необходимые размеры ящичных калибров. В системе прямоугольник — квадрат размеры прямоуголь-

ных калибров, а следовательно, и площади сечения металла в них, практически predeterminedены размерами предыдущего и последующего квадратов, что необходимо учитывать при распределении частной суммарной вытяжки между калибрами.

Значение вытяжки в прямоугольном калибре, обусловленное принятыми соотношениями размеров прямоугольных и квадратных ящичных калибров ( $h_{\kappa i} \approx b_{\kappa i+1}$ ,  $b_{\kappa i} \approx h_{\kappa i-1}$ ), найдем следующим образом.

Площадь поперечного сечения полосы после  $i$ -того прямоугольного калибра соответствует

$$F_i = b_{\kappa i+1} h_{\kappa i-1} + c_{yi} (F_{i-1} - b_{\kappa i+1} h_{\kappa i-1}) = F_{i-1} [c_{yi} + \frac{b_{\kappa i+1}}{h_{\kappa i-1}} (1 - c_{yi})].$$

С учетом (4.11) и того, что  $\lambda_{i+1} = \lambda_{\Sigma} / \lambda_i$ , получим следующее уравнение для определения вытяжки в прямоугольном калибре

$$\lambda_i = \frac{F_{i-1}}{F_i} = \frac{\sqrt{\lambda_{\Sigma}} (1 + c_{yi+1} \sqrt{\lambda_{\Sigma}} (1 - c_{yi})) / c_{yi} \sqrt{\lambda_{\Sigma}} + (1 - c_{yi}) / (1 - c_{yi+1})}{\dots} \quad (4.25)$$

Таким образом, вытяжка в прямоугольном калибре будет тем больше отличаться от средней ( $\sqrt{\lambda_{\Sigma}}$ ), чем больше разница в коэффициентах уширения данного и последующего калибров; при  $c_{yi} = c_{yi+1}$  имеем  $\lambda_i = \sqrt{\lambda_{\Sigma}}$ .

Анализ уравнений (4.13) и (4.22) показывает, что разница между коэффициентами  $c_{yi}$  и  $c_{yi+1}$  зависит от величины частной суммарной вытяжки и разницы в диаметрах валков  $D_i$  и  $D_{i+1}$ .

В связи с тем, что решение уравнения (4.25) — задача довольно трудоемкая, отношение  $\lambda_i / \sqrt{\lambda_{\Sigma}}$  можно определять из графика на

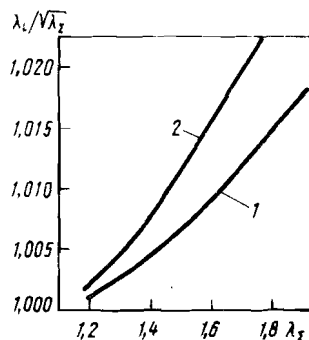


Рис. 57. К расчету вытяжки в прямоугольном калибре системы прямоугольник — квадрат:  
1 — при  $D_{i+1}/h_{\kappa i+1} = 3$ ; 2 — при  $D_{i+1}/h_{\kappa i+1} = 10$ .

рис. 57, полученного решением уравнения (4.25) при различных значениях  $\lambda_{\Sigma}$  и отношения  $D_{i+1}/D_i = 1$  или с помощью следующего приближенного уравнения, полученного путем числового анализа уравнений (4.13), (4.22), (4.25),

$$\frac{\lambda_i}{\sqrt{\lambda_{\Sigma}}} = 1 + \frac{D_{i+1}}{15 D_i} (\sqrt{\lambda_{\Sigma}} - 1)^2 \sqrt{\frac{D_{i+1}}{h_{i+1}}}. \quad (4.26)$$

Таким образом, вытяжка в последующем квадратном калибре будет равна

$$\lambda_{i+1} = \sqrt{\lambda_{\Sigma}} / [1 + \frac{D_{i+1}}{15 D_i} (\sqrt{\lambda_{\Sigma}} - 1)^2 \sqrt{\frac{D_{i+1}}{h_{i+1}}}] \quad (4.27)$$

## 2. РАСЧЕТ КАЛИБРОВ СИСТЕМЫ РОМБ — КВАДРАТ

Система калибров ромб — квадрат применяется в том случае, если требуется получить чистовой квадратный профиль. Кроме того, система ромб — квадрат используется также в качестве вытяжной системы, причем обычно при прокатке крупных сечений (обычно до квадрата 150).

Размеры квадратных калибров выбираются исходя из полного заполнения их металлом. Если площади металла в калибрах определены, то при известной стороне квадрата ( $h$ ) высота квадратного калибра с учетом закруглений в углах будет равна

$$h'_{\kappa} = h \sqrt{2} - 0,83 r_1, \quad (4.28)$$

где  $r_1$  — радиус закруглений в углах квадратного калибра.

Закругления в углах ромбических и квадратных калибров выполняют ту же роль, что и в ящичных калибрах.

Площадь квадратного калибра с учетом закругления углов равна

$$F_{\kappa} = h^2 - 0,43 r_1^2 - 0,5 s^2, \quad (4.29)$$

где  $s$  — зазор между валками по ребордам.

Обычно принимают  $r_1 \leq 0,2 h$ ,  $s \approx 0,1 h$ .

Радиусы закруглений у буртов делаются несколько большими, чтобы избежать появления "подрезов" в случае переполнения калибра.

Высота чистового квадратного калибра выбирается с учетом температурного расширения металла и величины допуска, определяемого ГОСТом или ТУ.

$$h'_{\kappa} = (1,010 \div 1,015) \{ [h_{\text{ном}} - (0,5 \div 0,8) \Delta] \sqrt{2} - 0,83 r_1 \},$$

где  $h_{\text{ном}}$  — номинальный размер стороны прокатываемого квадрата;  $\Delta$  — минусовый допуск.

Поскольку уменьшение размеров прокатываемого профиля, вследствие учета минусового допуска, в какой-то мере компенсируется

их увеличением за счет температурного расширения, размеры чистового калибра часто принимаются равными номинальным размерам профиля

$$h'_k = h_{\text{ном}} \sqrt{2} - 0,83 r_1.$$

Таким образом, при известных значениях площадей металла по клеткам определение размеров квадратных калибров не представляет затруднений, и расчет системы ромб — квадрат состоит в определении размеров ромбических калибров. При этом следует помнить, что размеры ромбического калибра должны обеспечивать получение требуемой площади металла не только в данном ромбическом, но и в последующем квадратном калибре.

Площадь  $i$ -того ромбического калибра с учетом закруглений в углах калибра ( $r_{1i}$ ) и зазора между валками ( $s_i$ ) равна

$$F_{ki} = \frac{1}{2} (h_{ki}^2 - s_i^2) \operatorname{ctg} \beta_i - 2r_{1i}^2 (\operatorname{tg} \beta_i - \beta_i), \quad (4.30)$$

где  $h_{ki}$  — высота калибра;  $\beta_i$  — угол наклона образующей калибра к оси валка.

Поскольку величины  $s_i$  и  $r_{1i}$  принимаются в соответствии с размерами прокатываемого профиля, расчет ромбических калибров будет заключаться в определении двух параметров: высоты калибра  $h_{ki}$  и угла наклона образующей калибра к оси валка  $\beta_i$ .

Для определения величин  $h_{ki}$  и  $\beta_i$  рассмотрим деформацию полосы в ромбическом и последующем  $(i+1)$ -м квадратном калибрах. Если пренебречь закруглениями углов калибров, то величина смещенной площади металла (рис. 58) при прокатке полосы квадрат-

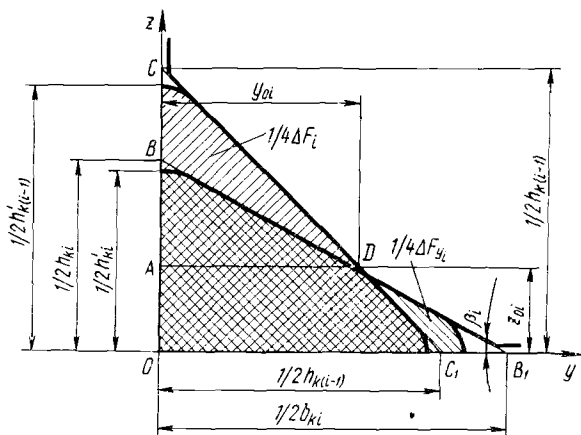


Рис. 58. Деформация в ромбическом калибре, система ромб — квадрат

ного сечения в  $i$ -том ромбическом калибре может быть выражена следующим образом:

$$\Delta F_i = 4F_{BCD} = 2BC \cdot AD = \frac{(h_{ki-1} - h_{ki})^2}{2(1 - \operatorname{tg} \beta_i)},$$

где  $h_{ki-1}$  — высота предыдущего  $(i-1)$ -го квадратного калибра ( $h_{ki-1} = h_{i-1} \sqrt{2}$ ).

Подставляя значение  $\Delta F_i$  в уравнение (4.4) и выражая площадь сечения полосы  $F_i = h_{ki-1}^2 / 2\lambda_i$ , получим уравнение, связывающее геометрические размеры ромбического калибра с параметрами происходящей в нем деформации

$$\frac{(1 - h_{ki}/h_{ki-1})^2}{1 - \operatorname{tg} \beta_i} = \frac{\lambda_i - 1}{\lambda_i (1 - c_{yi})}, \quad (4.31)$$

где  $\lambda_i$ ,  $c_{yi}$  — вытяжка и коэффициент уширения в  $i$ -том ромбическом калибре.

Еще одно уравнение найдем из условия необходимости получения квадратного профиля в последующем  $(i+1)$ -м квадратном калибре.

Это условие в соответствии с (4.7) выразится как

$$\Delta F_{ki+1} = \Delta F_{yi+1} = \frac{c_{yi+1}}{2(1 - c_{yi+1})} (\lambda_{i+1} - 1) h_{ki+1}^2, \quad (4.32)$$

где  $\lambda_{i+1}$ ,  $c_{yi+1}$  — вытяжка и коэффициент уширения в  $(i+1)$ -м квадратном калибре.

Из рис. 59 видно, что площадь  $\Delta F_{ki+1}$  можно представить следующим образом:

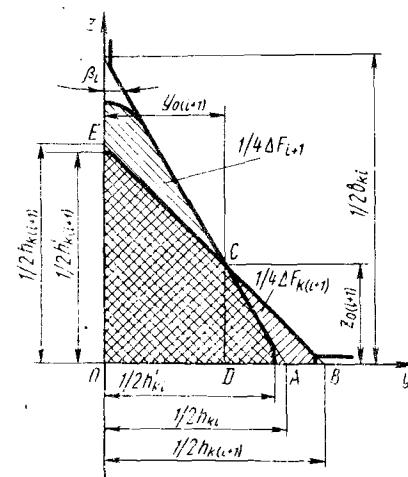


Рис. 59. Деформация в квадратном калибре, система ромб — квадрат



$$\Delta F_{\kappa i+1} = 4F_{ACB} = 4 \frac{1}{2} AB \cdot CD = \frac{h_{\kappa i+1}^2 (1 - \frac{h_{\kappa i}}{h_{\kappa i+1}})^2}{2 (1 - \operatorname{tg} \beta_i)}.$$

Подставив это значение  $\Delta F_{\kappa i+1}$  в (4.32), получим уравнение, связывающее геометрические размеры ромбического калибра с параметрами деформации в последующем  $(i+1)$ -м квадратном калибре

$$\frac{(1 - \frac{h_{\kappa i}}{h_{\kappa i+1}})^2}{1 - \operatorname{tg} \beta_i} = \frac{c_{yi+1} (\lambda_{i+1} - 1)}{1 - c_{yi+1}}. \quad (4.33)$$

Для того, чтобы упростить решение и анализ полученных уравнений (4.31), (4.33), введем безразмерный коэффициент  $\psi_i$ , равный  $\psi_i = h_{\kappa i} / h_{\kappa i+1}$ .

Коэффициент  $\psi_i$  характеризует разницу между шириной  $(i+1)$ -го квадратного калибра и шириной входящей в него полосы, равной высоте предшествующего ромбического калибра. Коэффициент  $\psi_i$  всегда должен быть меньше единицы ( $\psi_i < 1,0$ ); этим обеспечивается захват полосы валками и возможность уширения в квадратном калибре без образования "лампасов".

Высота ромбического калибра без учета закруглений в углах равна

$$h_{\kappa i} = \psi_i h_{i+1} \sqrt{2}, \quad (4.35)$$

где  $h_{i+1}$  — сторона последующего квадрата.

Ширина ромбического калибра  $b_{\kappa i} = h_{\kappa i} / \operatorname{tg} \beta_i$ .

С учетом закруглений высота ромбического калибра определяется по следующей формуле

$$h'_{\kappa i} = h_{\kappa i} - 2r_{1i} \left( \frac{1}{\cos \beta_i} - 1 \right). \quad (4.36)$$

Радиус закруглений в углах ромбического калибра ( $r_{1i}$ ) обычно принимается равным радиусу в углах последующего квадрата.

Из практических данных известно, что уширение в квадратном калибре полосы ромбического и овального сечения примерно одинаково. Это дает основание использовать для расчета коэффициента уширения  $c_{yi+1}$  в системе ромб — квадрат уравнение (3.15).

С учетом (3.15) и (4.34) уравнения (4.31), (4.33) после несложных преобразований примут следующий вид:

$$\operatorname{tg} \beta_i = 1 - \frac{\lambda_i (1 - c_{yi})}{\lambda_i - 1} \left( 1 - \frac{\psi_i}{\sqrt{\lambda_\Sigma}} \right)^2, \quad (4.37)$$

$$\psi_i = 1 - \sqrt{\frac{1}{15A} \left( 4 + \frac{D_{i+1}}{h_{\kappa i+1}} \right) (\lambda_{i+1} - 1) (1 - \operatorname{tg} \beta_i)}, \quad (4.38)$$

где  $\lambda_\Sigma$  — частная суммарная вытяжка,  $\lambda_\Sigma = F_{i-1} / F_{i+1} = h_{\kappa i-1}^2 / h_{\kappa i+1}^2$ .

Величина коэффициента уширения в ромбическом калибре определяется уравнением (3.10). Приведем его к виду, более удобному для расчетов калибровок.

При равенстве идеальных диаметров валков диаметры  $D_i$  и  $D_{i+1}$

близки между собой, что позволяет в (3.10) принять  $D_i = D_{i+1}$ . Величины  $\Delta h_{\kappa} / h_{\kappa 1}$  и  $h_{\kappa 0}$  можно представить как

$$\frac{\Delta h_{\kappa}}{h_{\kappa 1}} = \frac{h_{\kappa i-1}}{h_{\kappa i}} - 1 = \frac{\sqrt{\lambda_\Sigma}}{\psi_i} - 1,$$

$$h_{\kappa 0} = h_{\kappa i-1} = h_{\kappa i+1} \sqrt{\lambda_\Sigma}.$$

Таким образом, уравнение для коэффициента уширения при прокатке в ромбическом калибре будет иметь следующий вид:

$$c_{yi} = \frac{1}{1 + \frac{3A}{4 + D_{i+1}/h_{\kappa i+1} \sqrt{\lambda_\Sigma}} [1 + 35A \left( \frac{\sqrt{\lambda_\Sigma}}{\psi_i} - 1 \right)^3 \operatorname{tg}^3 \beta_i]}. \quad (4.39)$$

С учетом (4.39) уравнения (4.37), (4.38) содержат два неизвестных: коэффициент  $\psi_i$ , характеризующий высоту ромбического калибра, и  $\operatorname{tg} \beta_i$ . Размеры ромбического калибра определяются путем совместного решения этих уравнений.

Поскольку (4.37), (4.39) представляют собой систему нелинейных уравнений, решение ее можно найти одним из приближенных способов, например с помощью метода последовательных приближений.

При известных значениях вытяжек ( $\lambda_\Sigma$ ,  $\lambda_i$ ), отношения  $D_{i+1} / h_{\kappa i+1}$  и коэффициента  $A$  решение выполняем в следующей последовательности.

Принимаем в качестве начального некоторое значение  $\operatorname{tg} \beta_i$  и при  $\operatorname{tg} \beta_i = (\operatorname{tg} \beta_i)^{(0)}$  определяем из (4.38) начальное значение коэффициента  $\psi_i$ . Вычисляем при  $\operatorname{tg} \beta_i = (\operatorname{tg} \beta_i)^{(0)}$  и  $\psi_i = \psi_i^{(0)}$  сначала коэффициент уширения  $c_{yi}$  из выражения (4.39), а затем, подставляя  $(\operatorname{tg} \beta_i)^{(0)}$ ,  $\psi_i^{(0)}$  и найденное значение  $c_{yi}$  в правую часть уравнения (4.37), найдем новое значение  $\operatorname{tg} \beta_i$   $(\operatorname{tg} \beta_i)^{(1)}$ . После этого сравниваем между собой принятое и вычисленное значения  $\operatorname{tg} \beta_i$  и, если разность  $(\operatorname{tg} \beta_i)^{(1)} - (\operatorname{tg} \beta_i)^{(0)}$  будет больше заданной погрешности, вычисления повторяем при  $\operatorname{tg} \beta_i = (\operatorname{tg} \beta_i)^{(1)}$  в той же последовательности, что и на предыдущей операции вычислений. Расчет продолжаем до тех пор, пока разница значений  $\operatorname{tg} \beta_i$ , полученных при данном и предыдущем приближениях, будет меньше или равна заданной погрешности вычислений.

При решении уравнений методом последовательных приближений объем вычислений зависит от величины принятой погрешности для искомых величин, в данном случае для  $\text{tg } \beta_i$ , и это обстоятельство необходимо учитывать при выборе точности расчета. Очевидно, что точность расчета не должна быть ни слишком малой, ни слишком высокой, так как в этом случае для решения уравнений потребовалось бы необоснованно большое число итераций.

Исходя из точности нарезки калибров, принятой для сортовых и проволочных станков, которая обычно соответствует 6 — 7 классу по ОСТ 24.001.27–78, погрешность вычислений угла наклона образующей ромбического калибра к оси валков может быть принята равной

$$|\text{tg } \beta_i^{(n)} - \text{tg } \beta_i^{(n-1)}| \leq 0,002.$$

Числовая проверка показывает, что погрешность вычислений коэффициента  $\psi_i$  при этом составит

$$|\psi_i^{(n)} - \psi_i^{(n-1)}| \leq 0,001.$$

Другим важным фактором, определяющим объем вычислений при решении уравнений методом итераций, является выбор начальных значений искомых корней. Чем ближе к истинному значению корня выбрано начальное приближение, тем меньше потребуются вычислительной работы.

В частности, для определения начального значения  $\text{tg } \beta_i$  при решении уравнений (4.37), (4.38) можно рекомендовать следующее выражение, полученное с помощью числового анализа этих уравнений:

$$\text{tg } \beta_i = 1/[1 + \frac{0,46}{(A+4)^2} \cdot \frac{(\lambda_\Sigma - 1)^3}{\lambda_\Sigma + 1} \times \times (\frac{D_{i+1}}{h_{ki+1}} + \frac{36\sqrt{A}}{\lambda_\Sigma^2})^2 \frac{\lambda_{i+1}(\lambda_{i+1} - 1)}{\lambda_i(\lambda_i - 1)}]. \quad (4.40)$$

При равенстве вытяжек в ромбическом и последующем квадратном калибре ( $\lambda_i = \lambda_{i+1} = \sqrt{\lambda_\Sigma}$ ):

$$\text{tg } \beta_i = 1/[1 + \frac{0,46}{(A+4)^2} \cdot \frac{(\lambda_\Sigma - 1)^3}{\lambda_\Sigma + 1} \times \times (\frac{D_{i+1}}{h_{ki+1}} + \frac{36\sqrt{A}}{\lambda_\Sigma^2})^2]. \quad (4.41)$$

Как показала проверка, разница величин  $\text{tg } \beta_i$ , найденных из уравнений (4.37), (4.38) и с помощью выражения (4.40), в широком диапазоне входящих параметров ( $\lambda_\Sigma = 1,4 \div 2,0$ ;  $D_{i+1}/h_{ki+1} = 5 \div 20$ ;  $A = 3,5 \div 5,5$ ), не превышает 1 — 2 %. Таким образом, выражение (4.40) можно использовать не только для нахождения начального значения угла  $\beta_i$ , но и в качестве самостоятельной формулы, что

значительно упрощает расчет ромбических калибров. Действительно, определив из (4.40) величину  $\text{tg } \beta_i$  и подставив ее в уравнение (4.38), сразу находим коэффициент  $\psi_i$ , а следовательно, и высоту ромбического калибра.

При  $A = 4,5$ , что соответствует случаю прокатки углеродистой стали при 1100 — 1200°C размеры ромбических калибров можно определить из следующих выражений:

$$\text{tg } \beta_i = 1/[1 + \frac{(\lambda_\Sigma - 1)^3}{157(\lambda_\Sigma + 1)} (\frac{D_{i+1}}{h_{ki+1}} + \frac{76}{\lambda_\Sigma^2})^2 \frac{\lambda_{i+1}(\lambda_{i+1} - 1)}{\lambda_i(\lambda_i - 1)}]; \quad (4.42)$$

$$\psi_i = 1 - 0,24 \sqrt{(1 + \frac{D_{i+1}}{4h_{ki+1}})(\lambda_{i+1} - 1)(1 - \text{tg } \beta_i)}. \quad (4.43)$$

Результаты расчета значений угла  $\beta_i$  и коэффициента  $\psi_i$  с помощью уравнений (4.37), (4.38) при различных величинах отношения  $D_{i+1}/h_{ki+1}$  и частной суммарной вытяжки представлены на рис. 60, 61. Как видно из графиков, угол  $\beta_i$  и высота ромбического калибра уменьшаются с увеличением  $\lambda_\Sigma$  и отношения  $D_{i+1}/h_{ki+1}$ .

Заключительным этапом вычислений является проверка полученных результатов. Проверка основывается на том, что площадь ромбического калибра при найденных значениях коэффициента  $\psi_i$  и угла  $\beta_i$  должна быть больше или, в крайнем случае, равна площади металла в калибре, т.е.  $F_{ki} \geq F_i$ .

Подставляя сюда значение  $F_{ki}$  из (4.30) и выражая площадь металла  $F_i$  как  $F_i = \lambda_{i+1} F_{i+1} = \frac{\lambda_\Sigma}{\lambda_i} \cdot \frac{1}{2} h_k^2(i+1)$ , получим условие

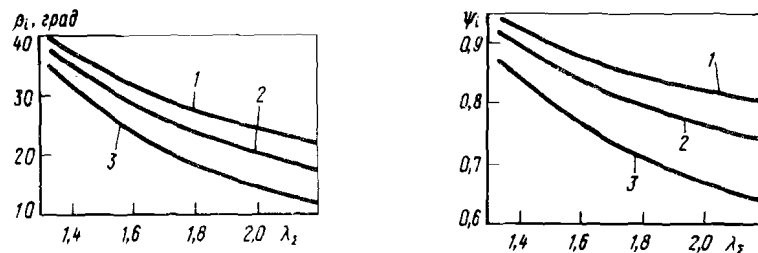


Рис. 60. Значения угла  $\beta_i$  в зависимости от величины  $\lambda_\Sigma$  и отношения  $D_{i+1}/h_{ki+1}$  ( $A = 4,5$ ):  
1 — при  $D_{i+1}/h_{ki+1} = 5$ ; 2 — при  $D_{i+1}/h_{ki+1} = 10$ ; 3 — при  $D_{i+1}/h_{ki+1} = 20$

Рис. 61. Значения коэффициента  $\psi_i$  в зависимости от величины  $\lambda_\Sigma$  и отношения  $D_{i+1}/h_{ki+1}$  ( $A = 4,5$ ):  
1 — при  $D_{i+1}/h_{ki+1} = 5$ ; 2 — при  $D_{i+1}/h_{ki+1} = 10$ ; 3 — при  $D_{i+1}/h_{ki+1} = 20$

правильности выполненных расчетов (величинами  $r_{1i}$ ,  $s_i$  пренебрегаем)

$$\frac{1}{\psi_i^2} \operatorname{tg} \beta_i \geq \frac{\lambda_i}{\lambda_\Sigma} \quad (4.44)$$

В частном случае, при  $\lambda_i = \lambda_{i+1} = \sqrt{\lambda_\Sigma}$

$$\frac{\operatorname{tg} \beta_i}{\psi_i^2} \geq \frac{1}{\sqrt{\lambda_\Sigma}}$$

### 3. РАСЧЕТ КАЛИБРОВ СИСТЕМЫ ОВАЛ – КВАДРАТ

Система калибров овал – квадрат используется обычно только как вытяжная, так как применение овалов затрудняет получение углов квадрата в местах разъема валков. Поэтому при прокатке квадратных профилей в качестве предчистовых вместо овальных применяются ромбические калибры. Тем не менее при определении размеров квадратных калибров, в том числе черновых, как и в случае системы ромб – квадрат, будем исходить из условия получения в каждом из них правильного квадратного профиля.

Поскольку при известных значениях площадей металла по клеткам размеры квадратных калибров легко найти с помощью выражений (4.28), (4.29), расчет системы овал – квадрат сводится к определению размеров овальных калибров.

Овальный калибр представляет собой геометрическую фигуру, образованную двумя круговыми сегментами одинакового радиуса, сложенными своими основаниями.

Иногда вместо овальных употребляются калибры, близкие к ним по форме, такие, как: плоские овальные; двухрадиусные овальные (эллиптические) и т.д. Очень часто, хотя и не всегда, применение этих более сложных по конфигурации калибров вызывается не преимуществами их формы, а является, по сути дела, попыткой компенсировать неточность расчета калибровки соответствующей корректировкой формы калибров.

Площадь  $i$ -того овального калибра с учетом зазоров между валками ( $s_i$ ) определяется следующим выражением:

$$F_{\kappa i} = 2R_{\text{обр}i}^2 \arcsin \frac{b_{pi}}{2R_{\text{обр}i}} - b_{pi}(R_{\text{обр}i} - h_{pi}) + b_{pi}s_i, \quad (4.45)$$

где  $h_{pi}$ ,  $b_{pi}$  – соответственно глубина и ширина ручья калибра (вреза калибра в валки);  $R_{\text{обр}i}$  – радиус образующей калибра.

Здесь

$$2h_{pi} = h_{\kappa i} - s_i,$$

$$b_{pi} = (h_{\kappa i} - s_i) \sqrt{4 \frac{R_{\text{обр}i}}{h_{\kappa i} - s_i} - 1}. \quad (4.46)$$

Если величина зазора между валками невелика, то площадь  $i$ -того овального калибра (см. рис. 62) можно представить в виде удвоенной площади кругового сегмента (радиуса  $R_{\text{обр}i}$  и высоты  $0,5 h_{\kappa i}$ )

$$F_{\kappa i} = 0,5 h_{\kappa i}^2 \left[ \frac{4R_{\text{обр}i}^2}{h_{\kappa i}^2} \arcsin \frac{b_{\kappa i}}{2R_{\text{обр}i}} - \frac{b_{\kappa i}}{h_{\kappa i}} \left( \frac{2R_{\text{обр}i}}{h_{\kappa i}} - 1 \right) \right],$$

где  $h_{\kappa i}$ ,  $b_{\kappa i}$  – соответственно высота и ширина овального калибра. Для упрощения последующих вычислений введем безразмерный коэффициент, равный

$$a_i = \frac{R_{\text{обр}i}}{0,5 h_{\kappa i}} \quad (4.47)$$

Коэффициент  $a_i$  можно рассматривать в качестве показателя овальности калибра. Действительно, при  $a_i = 1$  овальный калибр становится круглым, а при  $a_i = \infty$  превращается в гладкую "бочку".

С учетом (4.47) ширина и площадь овального калибра выразятся как

$$b_{\kappa i} = h_{\kappa i} \sqrt{2a_i^2 - 1},$$

$$F_{\kappa i} = 0,5 h_{\kappa i}^2 \left[ a_i^2 \arcsin \frac{\sqrt{2a_i^2 - 1}}{a_i} - (a_i - 1) \sqrt{2a_i^2 - 1} \right]. \quad (4.48)$$

В расчетах, не требующих высокой точности, площадь овальных

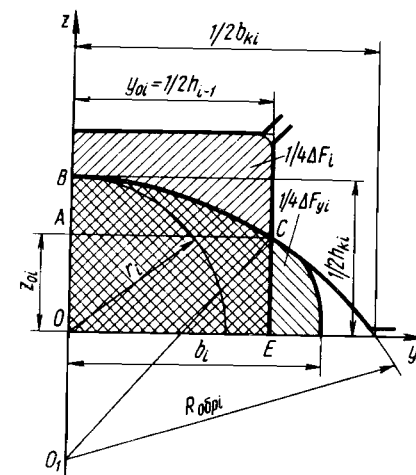


Рис. 62. Деформация в овальном калибре, система овал – квадрат

калибров можно определять также из следующего приближенного выражения:

$$F_{\kappa i} = \frac{h_{\kappa i}^2}{4} [(1 + \pi) \sqrt{a_i - 1}]. \quad (4.49)$$

Разница значений  $F_{\kappa i}$ , полученных из выражений (4.48) и (4.49), в интервале  $1,5 \leq a_i \leq 5$  находится в пределах  $\pm 1\%$ .

Таким образом, размеры и конфигурация овального калибра полностью характеризуются двумя параметрами, а именно высотой калибра  $h_{\kappa i}$  и величиной коэффициента  $a_i$ . Рассмотрим деформацию полосы в овальном и последующем квадратном калибре.

Из рис. 62 видно, что величину смещенной площади металла при прокатке полосы квадратного сечения в  $i$ -том овальном калибре можно представить следующим образом:

$$\Delta F_i = F_{i-1} - 4F_{OBCE} = F_{i-1} - 4(F_{ABCS} + F_{OACE}),$$

где

$$F_{ABCS} = \frac{1}{2} R_{обр i}^2 \arcsin \frac{h_{i-1}}{2R_{обр i}} - \frac{1}{4} h_{i-1} [R_{обр i} - (0,5 h_{\kappa i} - OA)];$$

$$F_{OACE} = \frac{h_{i-1}}{2} OA, \quad OA = \frac{h_{\kappa i}}{2} - AB = \frac{h_{\kappa i}}{2} - R_{обр i} (1 - \sqrt{1 - \frac{h_{i-1}^2}{4R_{обр i}^2}}).$$

Таким образом, после соответствующих преобразований будем иметь:

$$\Delta F_i = h_{i-1}^2 [1 - \frac{a_i^2 \psi_i^2}{\lambda_\Sigma} \arcsin \frac{\sqrt{\lambda_\Sigma}}{a_i \psi_i \sqrt{2}} - a_i \frac{\psi_i}{\sqrt{2\lambda_\Sigma}} \sqrt{1 - \frac{\lambda_\Sigma}{2a_i^2 \psi_i^2}} + \frac{\psi_i \sqrt{2}}{\sqrt{\lambda_\Sigma}} (a_i - 1)], \quad (4.50)$$

где  $\psi_i$  — коэффициент, характеризующий разницу между шириной  $(i+1)$ -го квадратного калибра и шириной входящей полосы, равной высоте  $i$ -того овального калибра,

$$\psi_i = h_{\kappa i} / h_{\kappa i+1}. \quad (4.51)$$

Подставляя в (4.50) значение  $\Delta F_i$  из выражения (4.4), получим уравнение, связывающее геометрические размеры овального калибра с параметрами происходящей в нем деформации

$$a_i^2 \arcsin \frac{\sqrt{\lambda_\Sigma}}{a_i \psi_i \sqrt{2}} + a_i \frac{\sqrt{\lambda_\Sigma}}{\psi_i \sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{\lambda_\Sigma}{2a_i^2 \psi_i^2}} -$$

$$- \frac{\sqrt{2\lambda_\Sigma}}{\psi_i} (a_i - 1) = \frac{\lambda_\Sigma}{\psi_i^2} \cdot \frac{1 - \lambda_i c_{yi}}{\lambda_i (1 - c_{yi})}, \quad (4.52)$$

где  $\lambda_i, c_{yi}$  — вытяжка и коэффициент уширения в овальном калибре.

Еще одно уравнение получим из условия полного заполнения металлом последующего  $(i+1)$ -го квадратного калибра.

При полном заполнении металлом  $(i+1)$ -го квадратного калибра согласно (4.7) имеем

$$\Delta F_{\kappa i+1} = \Delta F_{yi+1} = \frac{h_{\kappa i+1}^2}{2} \cdot \frac{c_{yi+1} (\lambda_{i+1} - 1)}{1 - c_{yi+1}}. \quad (4.53)$$

Из рис. 63 видно, что площадь  $\Delta F_{\kappa i+1}$  можно представить как  $\Delta F_{\kappa i+1} = 4F_{OBCS} = 4(F_{ABCS} - F_{ABDS})$ .

Здесь

$$F_{ABCS} = \frac{z_{oi+1}}{2} (\frac{1}{2} h_{\kappa i+1} - y_{oi+1}),$$

$$F_{ABDS} = 0,5 R_{обр i}^2 \arcsin \frac{z_{oi+1}}{R_{обр i}} - 0,5 z_{oi+1} [R_{обр i} - (\frac{h_{\kappa i}}{2} - y_{oi+1})].$$

С учетом значений площадей  $F_{ABCS}$  и  $F_{ABDS}$  и используя (4.47) и (4.51), после преобразований будем иметь

$$\Delta F_{\kappa i+1} = 0,5 h_{\kappa i}^2 [\frac{2z_{oi+1}}{h_{\kappa i}} (a_i + \frac{1}{\psi_i} - 1) - a_i^2 \arcsin \frac{2z_{oi+1}}{a_i h_{\kappa i}}]. \quad (4.54)$$

Подставив значение  $\Delta F_{\kappa i+1}$  в (4.53), получим уравнение, свя-

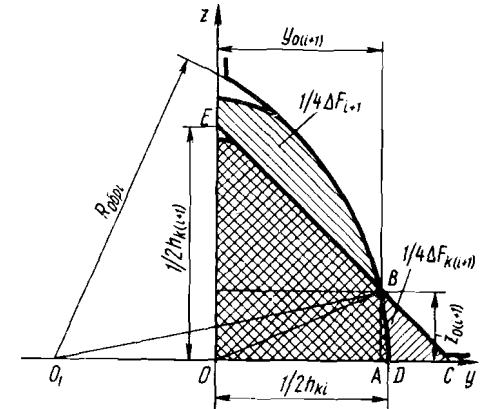


Рис. 63. Деформация в квадратном калибре, система овал — квадрат

зываются размеры овального калибра с параметрами деформации в последующем квадратном калибре:

$$\frac{2z_{oi+1}}{h_{\kappa i}} \left( a_i + \frac{1}{\psi_i} - 1 \right) - a_i^2 \arcsin \frac{2z_{oi+1}}{a_i h_{\kappa i}} = \frac{1}{\psi_i^2} \cdot \frac{c_{yi+1} (\lambda_{i+1} - 1)}{1 - c_{yi+1}}, \quad (4.55)$$

где  $\lambda_{i+1}$ ,  $c_{yi+1}$  — вытяжка и коэффициент уширения в квадратном калибре;  $y_{oi+1}$ ,  $z_{oi+1}$  — координаты точки пересечения образующих квадратного и предыдущего овального калибров при наложении их друг на друга в плоскости выхода полосы из валков.

Из выражения (2.46) с учетом (4.47), (4.51) имеем:

$$\frac{2z_{oi+1}}{h_{\kappa i}} = \frac{1}{2} \left[ a_i + \frac{1}{\psi_i} - 1 - \sqrt{2a_i^2 - \left( a_i + \frac{1}{\psi_i} - 1 \right)^2} \right].$$

Как показал анализ выражений (4.50), (4.54), площади  $\Delta F_i$  и  $\Delta F_{\kappa i+1}$  с большой точностью могут быть представлены в виде следующих приближенных зависимостей

$$\Delta F_i = F_{i-1} - 0,5 h_{\kappa i}^2 \frac{\sqrt{2\lambda_{\Sigma}}}{\psi_i} \left( 1 - \frac{\lambda_{\Sigma}}{12(a_i - 0,2)\psi_i^2} \right); \quad (4.56)$$

$$\Delta F_{\kappa i+1} = 0,5 h_{\kappa i}^2 \frac{(1 - \psi_i)^2}{\psi_i^2} \left[ 1 + \frac{2}{a_i} (1 - \psi_i)^2 \right]. \quad (4.57)$$

Погрешность вычислений  $\Delta F_i$  и  $\Delta F_{\kappa i+1}$  с помощью (4.56), (4.57), даже при самых неблагоприятных соотношениях коэффициентов  $a_i$ ,  $\psi_i$ , не превышает 1%.

Подставив значения  $\Delta F_i$  и  $\Delta F_{\kappa i+1}$  соответственно в (4.4) и (4.7), получим более простые алгебраические уравнения, использование которых вместо трансцендентных уравнений (4.52), (4.55) позволяет существенно облегчить расчет коэффициентов  $a_i$  и  $\psi_i$

$$\frac{\lambda_{\Sigma}}{12(a_i - 0,2)\psi_i^2} + \frac{\sqrt{\lambda_{\Sigma}}}{\psi_i \sqrt{2}} \cdot \frac{1 - c_{yi} \lambda_i}{\lambda_i (1 - c_{yi})} - 1 = 0; \quad (4.58)$$

$$(1 - \psi_i)^4 + \frac{a_i}{2} (1 - \psi_i)^2 - \frac{a_i}{2} \cdot \frac{c_{yi+1} (\lambda_{i+1} - 1)}{1 - c_{yi+1}} = 0. \quad (4.59)$$

Величина коэффициента уширения в овальном калибре определяется уравнением (3.11). В безразмерных параметрах  $a_i$  и  $\psi_i$  выражение для  $c_{yi}$  будет иметь следующий вид

$$c_{yi} = 1 / \left\{ 1 + \right.$$

$$\left. + \frac{A(2 - \psi_i \sqrt{2/\lambda_{\Sigma}}) [1 + 100A(\sqrt{\lambda_{\Sigma}}/\psi_i \sqrt{2} - 1)^3/a_i^3]}{(4 + D_i \sqrt{2}/h_{\kappa i+1} \sqrt{\lambda_{\Sigma}}) (1 - \psi_i \sqrt{2/\lambda_{\Sigma}}) \psi_i \sqrt{2/\lambda_{\Sigma}}} \right\}, \quad (4.60)$$

где  $D_i$  — диаметр валка в вершине  $i$ -того овального калибра.

Если величина обжатия в овальном калибре находится в интервале  $0,25 < \Delta h_i/h_{i-1} < 0,50$ , то коэффициент уширения можно определить с помощью упрощенной формулы

$$c_{yi} = 1 / \left\{ 1 + \frac{6A}{4 + \frac{D_i}{h_{\kappa i+1}} \sqrt{\frac{2}{\lambda_{\Sigma}}}} [1 + 100 \frac{A}{a_i^3} \left( \frac{\sqrt{\lambda_{\Sigma}}}{\psi_i \sqrt{2}} - 1 \right)^3] \right\}. \quad (4.61)$$

Значение коэффициента уширения в  $(i+1)$ -м квадратном калибре определяется уравнением (3.15). Учитывая небольшую разницу в высоте овального и последующего квадратного калибра по сравнению с диаметром валков, можно, в случае равенства идеальных диаметров валков, принять  $D_i = D_{i+1}$ . Таким образом с учетом (3.15), (4.60) уравнения (4.58), (4.59) содержат только два неизвестных, а именно, искомые коэффициенты  $a_i$  и  $\psi_i$ . Решение уравнений может быть выполнено с помощью метода последовательных приближений.

Приведем уравнения (4.58), (4.59) к виду, удобному для решения методом итераций, для чего заменим их на эквивалентные уравнения типа  $a_i = f_1(a_i, \psi_i)$  и  $\psi_i = f_2(\psi_i, a_i)$ .

С учетом (3.15) получим:

$$a_i = 0,2 + \frac{\lambda_{\Sigma}}{12\psi_i^2 \left[ 1 - \frac{\sqrt{\lambda_{\Sigma}}}{\psi_i \sqrt{2}} \cdot \frac{1 - \lambda_i c_{yi}}{\lambda_i (1 - c_{yi})} \right]}; \quad (4.62)$$

$$\psi_i = 1 - \frac{1}{2} \sqrt{a_i} \left[ \sqrt{1 + \frac{1}{a_i} \cdot \frac{8}{15A} \left( 4 + \frac{D_{i+1}}{h_{\kappa i+1}} \right) (\lambda_{i+1} - 1)} - 1 \right]. \quad (4.63)$$

Решение уравнений (4.62), (4.63) выполняем в следующей последовательности.

Выбираем начальное значение коэффициента  $a_i$  ( $a_i^{(0)}$ ) и при  $a_i = a_i^{(0)}$  из уравнения (4.63) находим начальное значение коэффициента  $\psi_i$ , причем в качестве начального приближения для  $a_i$  может быть принято любое положительное число большее единицы.

Далее при  $a_i = a_i^{(0)}$  и  $\psi_i = \psi_i^{(0)}$  вычислим сначала из (4.60) ко-

коэффициент уширения  $c_{yi}$ , а затем, подставляя найденное значение  $c_{yi}$  и  $\psi_i^{(0)}$  в уравнение (4.62), получим новое значение коэффициента  $a_i$  ( $a_i^{(1)}$ ). Сравнивая между собой принятое ( $a_i^{(0)}$ ) и найденное значения  $a_i$  и, если разность  $a_i^{(0)} - a_i^{(1)}$  окажется больше заданной погрешности, повторяем вычисления при  $a_i = 0,5 (a_i^{(0)} + a_i^{(1)})$ . Вычисления продолжаем до тех пор, пока разность между двумя соседними приближениями коэффициента  $a_i$  ( $a_i^{(n)} - a_i^{(n-1)}$ ) будет меньше или равна заданной погрешности.

В соответствии с точностью, принятой при нарезке калибров сортовых и проволочных станов, погрешность расчета коэффициента  $a_i$  может быть принята равной  $a_i^{(n)} - a_i^{(n-1)} \leq 0,01$ .

Легко проверить с помощью уравнения (4.63), что точность вычисления коэффициента  $\psi_i$  будет в этом случае не менее 0,001, т.е.  $\psi_i^{(n)} - \psi_i^{(n-1)} \leq 0,001$ .

Объем вычислений можно значительно сократить, если начальное значение коэффициента  $a_i$  определять из следующего выражения, полученного с помощью числового анализа уравнений (4.62), (4.63):

$$a_i = 1 + 28,5 \frac{2 + \frac{D_{i+1}}{h_{\kappa i+1}}}{1 + A} \cdot \frac{(\sqrt{\lambda_\Sigma} - 1)^3}{\lambda_\Sigma} \times \frac{(\lambda_{i+1} - 1)^2}{(\lambda_i - 1)^2} \quad (4.64)$$

Проверка показала, что в широком диапазоне значений параметров деформации ( $\lambda_\Sigma = 1,2 \div 2,5$ ;  $\lambda_i/\lambda_{i+1} = 0,95 \div 1,05$ ;  $D_{i+1}/h_{\kappa i+1} = 5 \div 20$ ;  $A = 3,5 \div 5,5$ ) погрешность вычислений коэффициента  $a_i$  с помощью выражения (4.64) соизмерима с точностью, принятой для  $a_i$  при решении уравнений (4.62), (4.63). Это позволяет использовать (4.64) для определения размеров овальных калибров вместо уравнения (4.62), что существенно упрощает весь расчет калибровки валков.

Завершающим этапом является проверка полученных результатов. Проверка основывается на том, что площадь овального калибра при найденных значениях коэффициентов ( $a_i$ ,  $\psi_i$ ) должна быть больше или равна расчетной площади металла в данном калибре

$$F_{\kappa i} \geq F_i.$$

Это условие можно интерпретировать следующим образом: найденное значение коэффициента  $a_i$  должно быть больше некоторой минимальной величины, определяемой из условия полного заполнения овального калибра металлом, т.е. при  $F_i = F_{\kappa i}$ .

Площадь металла в овальном калибре представим как

$$F_i = \lambda_{i+1} F_{i+1} = \lambda_{i+1} (h_{\kappa i+1}^2/2).$$

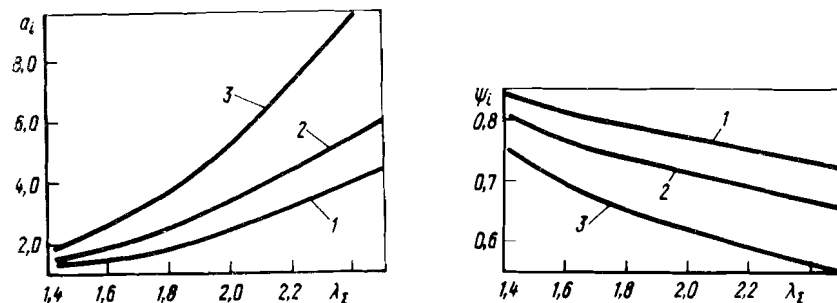


Рис. 64. Значения коэффициента  $a_i$  в зависимости от величины  $\lambda_\Sigma$  и отношения  $D_{i+1}/h_{\kappa i+1}$  ( $A = 4,5$ ):  
1 — при  $D_{i+1}/h_{\kappa i+1} = 5$ ; 2 — при  $D_{i+1}/h_{\kappa i+1} = 10$ ; 3 — при  $D_{i+1}/h_{\kappa i+1} = 20$

Рис. 65. Значения коэффициента  $\psi_i$  в зависимости от величины  $\lambda_\Sigma$  и отношения  $D_{i+1}/h_{\kappa i+1}$  ( $A = 4,5$ ):  
1 — при  $D_{i+1}/h_{\kappa i+1} = 5$ ; 2 — при  $D_{i+1}/h_{\kappa i+1} = 10$ ; 3 — при  $D_{i+1}/h_{\kappa i+1} = 20$

Выражая площадь овального калибра в соответствии с (4.49), получим при  $F_i = F_{\kappa i}$  следующее выражение для определения минимального значения коэффициента овальности

$$a_{i \min} = 0,0583 (1 + 2 \frac{\lambda_{i+1}}{\psi_i^2})^2.$$

Таким образом, условием проверки будет следующее неравенство:

$$a_i \geq 0,0583 (1 + 2 \frac{\lambda_{i+1}}{\psi_i^2})^2. \quad (4.65)$$

Значения коэффициентов  $a_i$  и  $\psi_i$ , подсчитанные из уравнений (4.62), (4.63), при различных значениях частной суммарной вытяжки и отношения  $D_{i+1}/h_{\kappa i+1}$  показаны на рис. 64, 65. Из графиков видно, что при одинаковом значении частной суммарной вытяжки с увеличением отношения  $D_{i+1}/h_{\kappa i+1}$  возрастает коэффициент  $a_i$  и уменьшается величина коэффициента  $\psi_i$ . Это означает, что при той же величине  $\lambda_\Sigma$  овальные калибры в чистовых клетях будут иметь большую овальность, т.е. величину отношения ширины к высоте овала ( $b_{\kappa i}/h_{\kappa i}$ ), чем в черновых.

#### 4. РАСЧЕТ КАЛИБРОВ СИСТЕМЫ ОВАЛ — КРУГ

Система калибров овал — круг применяется в первую очередь для прокатки кругов. При этом в целях экономии времени на перевалки и уменьшения расхода валков калибровку обычно стремятся выполнить таким образом, чтобы иметь возможность получать готовый профиль из любого промежуточного круглого калибра. Отсюда при



$$\arcsin \frac{y_{0i}}{r_{i-1}} - \frac{\psi_i^2}{\lambda_\Sigma} a_i^2 \arcsin \frac{y_{0i}}{r_{i-1}} \cdot \frac{\sqrt{\lambda_\Sigma}}{a_i \psi_i} +$$

$$+ \frac{\psi_i}{\sqrt{\lambda_\Sigma}} \cdot \frac{y_{0i}}{r_{i-1}} (a_i - 1) = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\lambda_i - 1}{\lambda_i (1 - c_{yi})}, \quad (4.69)$$

где  $y_{0i}$  — абсцисса точки пересечения образующих овального и предыдущего круглого калибров (см. рис. 67).

Из (2.47) с учетом (4.68) получим:

$$\frac{y_{0i}}{r_{i-1}} = \sqrt{1 - \frac{\psi_i^2}{\lambda_\Sigma} \cdot \frac{(2a_i - \frac{\lambda_\Sigma}{\psi_i^2} - 1)^2}{4(a_i - 1)^2}}, \quad (4.70)$$

где  $\lambda_i, c_{yi}$  — вытяжка и коэффициент уширения в  $i$ -том овальном калибре.

Еще одно уравнение, связывающее размеры овального калибра с параметрами деформации, найдем из условия необходимости получения круга в последующем  $(i+1)$ -м круглом калибре. Если принять для простоты, что круглые калибры имеют форму правильного круга, это условие будет равнозначно условию полного заполнения их металлом при прокатке.

При полном заполнении калибра металлом согласно (4.7) имеем

$$\Delta F_{\kappa i+1} = \Delta F_{yi+1} = \pi r_{i+1}^2 (\lambda_{i+1} - 1) \frac{c_{yi+1}}{1 - c_{yi+1}}. \quad (4.71)$$

Как видно из рис. 68, часть площади  $(i+1)$ -го круглого калибра, которая при отсутствии поперечной деформации была бы свободна от металла, можно представить как

$$\Delta F_{\kappa i+1} = 4F_{BEA} = 4(F_{CEA} - F_{CEB}),$$

где

$$F_{CEA} = F_{OEA} - F_{OEC} = 0,5 (r_{i+1}^2 \arcsin \frac{z_{0i+1}}{r_{i+1}} - y_{0i+1} z_{0i+1});$$

$$F_{CEB} = F_{O_1EB} - F_{O_1EC} = 0,5 [R_{обр i}^2 \arcsin \frac{z_{0i+1}}{R_{обр i}} -$$

$$- z_{0i+1} (R_{обр i} + y_{0i+1} - r_i)].$$

Таким образом, имеем

$$\Delta F_{\kappa i+1} = 2r_{i+1}^2 [\arcsin \frac{z_{0i+1}}{r_{i+1}} - \frac{R_{обр i}^2}{r_{i+1}^2} \arcsin \frac{z_{0i+1}}{R_{обр i}} +$$

$$+ \frac{z_{0i+1} r_i}{r_{i+1}^2} (\frac{R_{обр i}}{r_i} - 1)].$$

Подставив найденное значение площади  $\Delta F_{\kappa i+1}$  в выражение (4.71), после соответствующих преобразований получим уравнение, связывающее геометрические размеры  $i$ -того овального калибра с параметрами деформации в последующем круглом калибре:

$$\arcsin \frac{z_{0i+1}}{r_{i+1}} - a_i^2 \psi_i^2 \arcsin \frac{z_{0i+1}}{r_{i+1}} \cdot \frac{1}{a_i \psi_i} +$$

$$+ \psi_i \frac{z_{0i+1}}{r_{i+1}} (a_i - 1) = \frac{\pi}{2} \frac{c_{yi+1}}{1 - c_{yi+1}} (\lambda_{i+1} - 1), \quad (4.72)$$

где  $\lambda_{i+1}, c_{yi+1}$  — вытяжка и коэффициент уширения в круглом калибре;  $z_{0i+1}$  — ордината точек пересечения образующих овального и последующего калибра (см. рис. 68).

С учетом (4.68) выражение (2.48) преобразуется к виду:

$$\frac{z_{0i+1}}{r_{i+1}} = \sqrt{1 - \psi_i^2 \frac{(2a_i - \frac{1}{\psi_i^2} - 1)^2}{4(a_i - 1)^2}}. \quad (4.73)$$

Коэффициенты уширения для овального ( $c_{yi}$ ) и последующего круглого калибра ( $c_{yi+1}$ ) определяются выражениями (3.12) или (3.14) и (3.16). Приведем выражения (3.12), (3.14) к виду, более удобному для использования при расчетах калибровок валков.

Величину  $(d_0/d_1)\sqrt{d_0/\Delta d}$  и  $\Delta d/R_{обр}$  для  $i$ -того калибра можно представить как

$$\frac{d_0}{d_1} \sqrt{\frac{d_0}{\Delta d}} = \frac{\sqrt{\lambda_\Sigma}}{\psi_i \sqrt{1 - \psi_i/\sqrt{\lambda_\Sigma}}};$$

$$\frac{\Delta d}{R_{обр}} = \frac{d_{i-1} - d_i}{R_{обр i}} = \frac{\sqrt{\lambda_\Sigma}/\psi_i - 1}{0,5a_i}.$$

Вычисления можно несколько упростить, если принять во внимание, что диаметры валков по вершинам данного овального и последующего круглого калибров при равенстве идеальных диаметров валков близки между собой по величине. Считая, что  $D_i = D_{i+1}$ , выражения (3.12) и (3.14) будут иметь следующий вид:

$$c_{yi} = 1 / \left\{ 1 + \frac{4}{3} \cdot \frac{A}{4 + D_{i+1}/d_{i+1} \sqrt{\lambda_\Sigma}} \times \right.$$

$$\times \frac{\sqrt{\lambda_\Sigma}}{\psi_i \sqrt{1 - \psi_i/\sqrt{\lambda_\Sigma}}} [1 + 120 \frac{A}{a_i^3} (\frac{\sqrt{\lambda_\Sigma}}{\psi_i} - 1)^3] \Big\}; \quad (4.74)$$

при  $\frac{\Delta d_i}{d_{i-1}} = 0,25 \div 0,50$



$$c_{yi} = 1 / \left\{ 1 + \frac{3,5A}{4 + D_{i+1}/d_{i+1} \sqrt{\lambda_{\Sigma}}} [1 + \right. \\ \left. + 120 \frac{A}{a_i^3} \left( \frac{\sqrt{\lambda_{\Sigma}}}{\psi_i} - 1 \right)^3 \right\}.$$

С учетом (3.16), (4.74) уравнения (4.69) и (4.72) содержат два неизвестных искомого параметра — коэффициенты  $a_i$ ,  $\psi_i$ , величина которых определится путем совместного решения уравнений.

Решение находим с помощью метода последовательных приближений, для чего заменяем уравнения (4.69), (4.72) на эквивалентные уравнения вида  $a_i = f_1(a_i, \psi_i)$ ,  $\psi_i = f_2(a_i, \psi_i)$ . Хорошая сходимость вычислений получается, если исходные уравнения представить в виде:

$$a_i = \frac{\sqrt{\lambda_{\Sigma}}}{\psi_i} \sqrt{\left[ \arcsin \frac{y_{oi}}{r_{i-1}} + \frac{\psi_i}{\sqrt{\lambda_{\Sigma}}} \cdot \frac{y_{oi}}{r_{i-1}} (a_i - 1) - \right.} \\ \left. - \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\lambda_{i-1}}{\lambda_i (1 - c_{yi})} \right] / \arcsin \frac{y_{oi}}{r_{i-1}} \cdot \frac{\sqrt{\lambda_{\Sigma}}}{a_i \psi_i}}, \quad (4.75)$$

$$\psi_i = \frac{1}{a_i} \sqrt{\left[ \arcsin \frac{z_{oi+1}}{r_{i+1}} + \psi_i \frac{z_{oi+1}}{r_{i+1}} (a_i - 1) - \right.} \\ \left. - \frac{\pi}{30A} (\lambda_{i+1} - 1) \left( 4 + \frac{D_{i+1}}{d_{i+1}} \right) \right] / \arcsin \frac{z_{oi+1}}{a_i \psi_i r_{i+1}}}. \quad (4.76)$$

Решение уравнений (4.75), (4.76) выполняем в следующей последовательности. Выбираем начальное значение искомого коэффициента  $a_i$  ( $a_i^{(0)}$ ) и при  $a_i = a_i^{(0)}$  из уравнения (4.76), используя выражение (4.73), также с помощью метода последовательных приближений находим начальное значение коэффициента  $\psi_i$  ( $\psi_i^{(0)}$ ). После этого при  $a_i = a_i^{(0)}$  и  $\psi_i = \psi_i^{(0)}$  вычисляем из (4.70) и (4.74) значения  $y_{oi}/r_{i-1}$  и  $c_{yi}$  и, подставляя затем найденные величины в правую часть уравнения (4.75), получим новое значение коэффициента  $a_i$  ( $a_i^{(1)}$ ). Сравниваем между собой принятое и вычисленное значения и, если разность ( $a_i^{(1)} - a_i^{(0)}$ ) окажется больше принятой погрешности, вычисления повторяем при  $a_i = 0,5(a_i^{(0)} + a_i^{(1)})$  до получения нового значения коэффициента  $a_i$ .

Расчет продолжаем до тех пор, пока разность между двумя соседними приближениями будет меньше или равна принятой погрешности вычислений. Величину погрешности можно принять такой же, как и при расчете овальных калибров в системе овал — квадрат. Схема алгоритма расчета размеров овальных калибров в системе овал — круг приведена на рис. 69.

Рис. 69. Схема алгоритма расчета размеров овальных и стрельчатых треугольных калибров (системы: овал — круг, стрельчатый треугольник — круг)

Расчет размеров овальных калибров в системе овал — круг с помощью трансцендентных уравнений (4.75), (4.76) является весьма трудоемкой задачей и практически осуществим лишь с помощью ЭВМ. Однако объем вычислений можно существенно сократить, если расчет начальных значений коэффициентов  $a_i$ ,  $\psi_i$  выполнять с помощью следующих выражений, полученных путем числового анализа исходных уравнений (4.75), (4.76):

$$a_i = 1 + \frac{200}{25 + 3A} \left( 10 + \frac{D_{i+1}}{d_{i+1}} \right) \times \\ \times \left( \frac{\sqrt{\lambda_{\Sigma}} - 1}{\sqrt{\lambda_{\Sigma}} + 1} \right)^2 \frac{\lambda_{i+1} (\lambda_{i+1} - 1)}{\lambda_i (\lambda_i - 1)}; \quad (4.77)$$

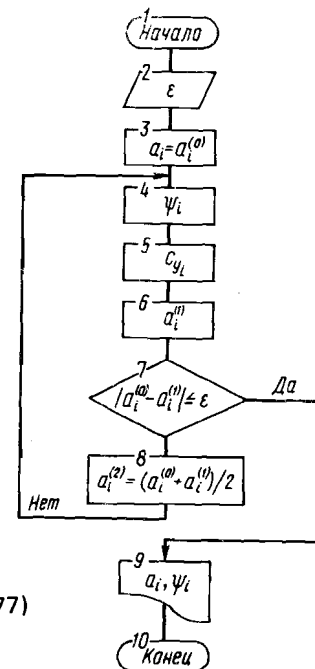
$$\psi_i = 1 - 0,383 \sqrt[3]{\frac{a_i - 1}{a_i}} \cdot \frac{1}{A^2} (\lambda_{i+1} - 1)^2 \left( 1 + \frac{D_{i+1}}{4d_{i+1}} \right)^2. \quad (4.78)$$

В частном случае, при  $\lambda_i = \lambda_{i+1} = \sqrt{\lambda_{\Sigma}}$

$$a_i = 1 + \frac{200}{25 + 3A} \left( 10 + \frac{D_{i+1}}{d_{i+1}} \right) \left( \frac{\sqrt{\lambda_{\Sigma}} - 1}{\sqrt{\lambda_{\Sigma}} + 1} \right)^2. \quad (4.79)$$

Как показала проверка, в широком диапазоне значений параметров деформации ( $\lambda_{\Sigma} = 1,2 \div 2,5$ ;  $\lambda_i/\lambda_{i+1} = 0,95 \div 1,05$ ;  $D_{i+1}/d_{i+1} = 5 \div 30$ ;  $A = 3,5 \div 5,5$ ) величины коэффициентов  $a_i$ ,  $\psi_i$ , вычисленные из уравнений (4.75), (4.76) и (4.77), (4.78), практически совпадают. Это позволяет использовать выражения (4.77); (4.78) в качестве самостоятельных формул. В этом случае сначала из (4.77) или (4.79) определяем величину коэффициента  $a_i$ , а затем, подставляя найденное значение  $a_i$  в (4.78), находим величину коэффициента  $\psi_i$ . После этого определяем высоту (диаметр) и радиус образующей овального калибра  $d_i = \psi_i d_{i+1}$ ,  $R_{\text{обр}i} = 0,5a_i d_i$ .

Расчет размеров калибров завершается проверкой полученных результатов. Как и для системы овал — квадрат, она основывается на том, что площадь овального калибра при найденных значениях



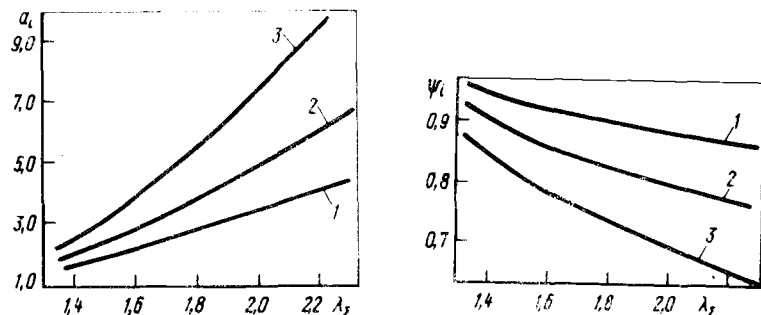


Рис. 70. Значения коэффициента  $a_i$  в зависимости от величины  $\lambda_z$  и отношения  $D_{i+1}/d_{i+1}$  ( $A = 4,5$ ):

1 — при  $D_{i+1}/d_{i+1} = 5$ ; 2 — при  $D_{i+1}/d_{i+1} = 15$ ; 3 — при  $D_{i+1}/d_{i+1} = 30$

Рис. 71. Значения коэффициента  $\psi_i$  в зависимости от величины  $\lambda_z$  и отношения  $D_{i+1}/d_{i+1}$  ( $A = 4,5$ ):

1 — при  $D_{i+1}/d_{i+1} = 5$ ; 2 — при  $D_{i+1}/d_{i+1} = 15$ ; 3 — при  $D_{i+1}/d_{i+1} = 30$

коэффициентов  $a_i$  и  $\psi_i$  должна быть больше или равна площади металла в данном калибре, т.е.

$$F_{\kappa i} \geq F_i.$$

Если подставить сюда значение площади овального калибра из (4.49), а площадь металла  $F_i$  выразить как

$$F_i = \lambda_{i+1} F_{i+1} = \lambda_{i+1} (\pi/4) d_{i+1}^2.$$

то получим неравенство, соблюдение которого является обязательным условием правильности выполненных расчетов

$$a_i \geq 0,0583 \left( 1 + \frac{\pi \lambda_{i+1}}{\psi_i^2} \right)^2. \quad (4.80)$$

На рис. 70, 71 представлены значения коэффициентов  $a_i$ ,  $\psi_i$ , подсчитанные из уравнений (4.75), (4.76) при различных значениях частной суммарной вытяжки и отношения  $D_{i+1}/d_{i+1}$ . Как видим, при одинаковой величине  $\lambda_z$  коэффициент овальности растет с увеличением отношения  $D_{i+1}/d_{i+1}$ , а величина коэффициента  $\psi_i$  уменьшается. Таким образом, при одинаковом распределении между калибрами частной суммарной вытяжки овальные калибры в чистовых клетях, как и в системе овал — квадрат будут иметь большее отношение осей ( $b_{\kappa i}/d_i$ ), чем в черновых клетях стана.

## Расчет размеров заготовки для литейно-прокатного агрегата (ЛПА) с двухвалковым блоком

Большинство из работающих в настоящее время литейно-прокатных агрегатов для производства катанки, в том числе все отечественные ЛПА, оснащены роторными (вращающимися) кристаллизаторами, что обуславливает специфическую конфигурацию сечения заготовки, заключающуюся в наличии уклона боковых граней для обеспечения выхода ее из кристаллизатора. В связи с этим поперечное сечение заготовки для ЛПА с двухвалковым станом (блоком) имеет вид трапеции с плоским либо закругленным нижним основанием (рис. 72). Калибровка валков как отечественных, так и зарубежных двухвалковых станов в составе ЛПА выполняется по схеме овал — круг. Причем первый калибр делается овальным.

При применении роторного кристаллизатора целесообразно в первой клетке стана иметь горизонтальное расположение рабочих валков. Это вызвано необходимостью первоначального обжатия нижней части литой заготовки, ослабленной действием растягивающих напряжений, возникающих при разгибании заготовки в момент схода ее с колеса кристаллизатора. При этом, как показывает опыт, чем больше обжатие и чем равномернее оно по ширине заготовки, тем меньше вероятность образования трещин на поверхности полосы при прокатке в последующих клетях. С этой же целью при настройке стана следует избегать появления в первых клетях межклетевых натяжений, особенно между первой и второй клетью.

Расчет трапециевидной заготовки осуществляется после определения размеров калибров и площадей металла во всех клетях, в том числе и в первой клетке, для чего в качестве заготовки, как первое приближение, принимаем круг, с той же, что и заготовка, площадью сечения.

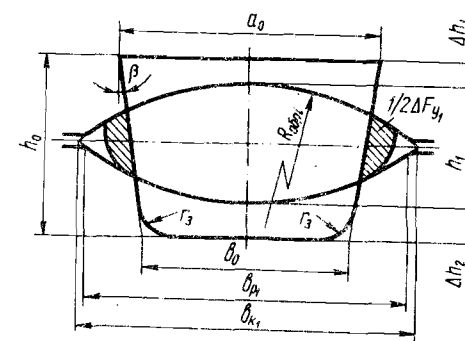


Рис. 72. К расчету заготовки для ЛПА с двухвалковым станом

Диаметр такой условной заготовки будет равен

$$d_0 = \sqrt{\frac{4}{\pi} F_0},$$

где  $F_0$  — площадь сечения заготовки, определяемая заданной производительностью агрегата.

Как показывает опыт, величина поперечной деформации в первом овальном калибре при прокатке трапециевидной заготовки примерно такая же, как и при прокатке круглой заготовки равной площади. Таким образом, для получения в первом калибре расчетной площади металла необходимо, чтобы средняя ширина трапециевидной заготовки была приблизительно равна диаметру ранее принятого в расчете равноуглового круга, т.е.

$$b_{\text{ср}} = \frac{a_0 + b_0}{2} = \sqrt{\frac{4}{\pi} F_0}. \quad (4.81)$$

где  $a_0$ ,  $b_0$  — соответственно ширина верхнего и нижнего основания заготовки.

Площадь сечения трапециевидной заготовки, если пренебречь закруглениями углов у основания, равна  $F_0 = \frac{a_0 + b_0}{2} h_0$ .

Подставляя значение  $F_0$  в (4.81), получим то соотношение между средней шириной и высотой заготовки, которое необходимо, чтобы площадь металла в первом калибре соответствовала расчетной

$$(a_0 + b_0)/2 = 1,27. \quad (4.82)$$

Опыт показывает, что это соотношение можно иметь в пределах  $1,25 \div 1,30$ .

Для обеспечения беспрепятственного выхода заготовки из кристаллизатора необходимо, чтобы угол наклона боковых стенок бандажа кристаллизатора был не менее  $10 - 12^\circ$ .

Принимая  $\beta = 11^\circ$  ( $\text{tg } \beta = 0,2$ ), имеем

$$(a_0 - b_0)/2 h_0 = 0,2. \quad (4.83)$$

Решая уравнения (4.82), (4.83), совместно находим размеры трапециевидной заготовки для литейно-прокатного агрегата с двухвалковым станом  $a_0 = 1,31 \sqrt{F_0}$ ;  $b_0 = 0,95 \sqrt{F_0}$ ;  $h_0 = 0,89 \sqrt{F_0}$ .

Площадь сечения заготовки с учетом закруглений углов при  $\text{tg } \beta = 0,2$  будет равна  $F_0 = \frac{a_0 + b_0}{2} h_0 - 0,27 r_3^2$ .

Радиус закруглений углов обычно принимается равным

$$r_3 = (0,15 \div 0,25) h_0.$$

Площадь сечения заготовки всегда меньше площади выточки бандажа кристаллизатора вследствие усадки металла при кристаллизации, составляющей для меди и алюминия около  $2 - 3\%$ . В соответствии с этим глубину выточки бандажа кристаллизатора следует де-

лать несколько больше расчетной высоты заготовки  $h_0 = (1,02 \div 1,03) h_0$ .

## 5. РАСЧЕТ КАЛИБРОВ СИСТЕМЫ СТРЕЛЬЧАТЫЙ ТРЕУГОЛЬНИК — КРУГ

Система стрельчатый треугольник — круг наиболее широко применяется при прокатке кругов на станах с трехвалковыми калибрами и является, по существу, аналогом системы овал — круг. Поэтому уравнения для расчета размеров калибров этих двух систем во многом схожи между собой.

Как и для двухвалковых калибров, при известной площади круга ( $F$ ) диаметр круглого трехвалкового калибра будет равен  $d = 1,13 \sqrt{F}$ .

Для уменьшения возможности переполнения круглых калибров металлом и образования на полосе подрезов и заусенцев ширину круглого калибра, т.е. размер по разьему валков, следует делать несколько больше диаметра калибра, т.е. калибры выполнять не в виде правильного круга, а круга с боковыми выпусками, которые обычно делаются по прямой, касательной к образующей калибра. Угол выпуска обычно принимается равным  $20 - 25^\circ$ .

Ширина круглого трехвалкового калибра с прямым выпуском (рис. 73) равна

$$b_k = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{d}{\cos \varphi}; \quad (4.84)$$

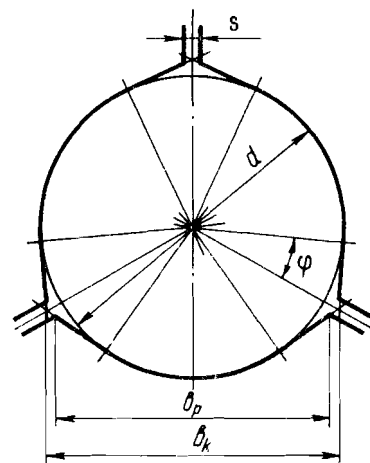


Рис. 73. Трехвалковый круглый калибр

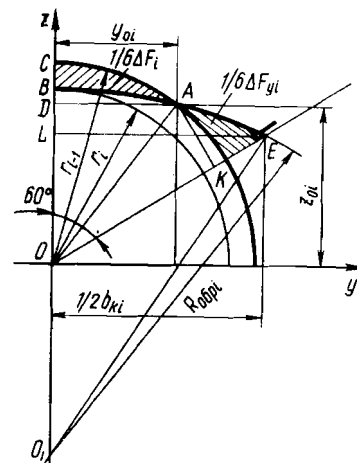


Рис. 74. Деформация в стрельчатом треугольном калибре, система стрельчатый треугольник — круг

ширина вреза калибра в валки

$$b_p = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{d}{\cos \varphi} - s \cos (60^\circ - \varphi); \quad (4.85)$$

глубина вреза калибра в валки

$$h_p = \frac{1}{2} d \left( 1 - \frac{1}{2 \cos \varphi} \right) - \frac{s}{2} \sin (60^\circ - \varphi), \quad (4.86)$$

где  $\varphi$  — угол выпуска;  $s$  — зазор между валками.

Таким образом, определение размеров круглых калибров при известных значениях вытяжек в клетях не представляет трудности, и расчет системы стрельчатый треугольник — круг практически заключается в нахождении размеров стрельчатых треугольных калибров. Очевидно, что размеры каждого стрельчатого треугольного калибра должны обеспечить получение требуемой площади металла в нем самом, а также получение круглого профиля в последующем круглом калибре.

Рассмотрим деформацию металла в стрельчатом треугольном и последующем круглом калибрах.

Как видно из рис. 74, площадь  $i$ -того стрельчатого треугольного калибра без учета зазоров между валками равна

$$F_{\kappa i} = 6F_{OBE} = 6(F_{OLE} + F_{LBE}), \quad (4.87)$$

$$\text{где } F_{OLE} = \frac{1}{2} OL \cdot LE = \frac{(LE)^2}{2\sqrt{3}};$$

$$F_{LBE} = \frac{1}{2} R_{обри}^2 \arcsin \frac{LE}{R_{обри}} - \frac{LE}{2} (R_{обри} - r_i + \frac{LE}{\sqrt{3}}),$$

где  $R_{обри}$  — радиус образующей калибра.

По аналогии с овальным калибром обозначим  $R_{обри}/r_i = a_i$ .

Подставляя значения  $F_{OLE}$  и  $F_{LBE}$  в (4.87), получим

$$F_{\kappa i} = 3r_i^2 [a_i^2 \arcsin \frac{LE}{a_i r_i} - \frac{LE}{r_i} (a_i - 1)].$$

Величину  $LE$  определим из уравнения

$$(LE)^2 = (r_i - \frac{LE}{\sqrt{3}}) (2R_{обри} - r_i + \frac{LE}{\sqrt{3}}).$$

Отсюда

$$LE = \frac{b_{\kappa i}}{2} = \frac{\sqrt{3}}{4} r_i (a_i - 1) [\sqrt{1 + 4 \frac{2a_i - 1}{(a_i - 1)^2}} - 1].$$

Таким образом, искомыми величинами для расчета размеров стрельчатого треугольного калибра, как и для овального, являются диаметр калибра  $d_i$  и радиус образующей калибра  $R_{обри}$ .

Площадь сечения стрельчатого треугольного калибра можно оп-

ределить также с помощью следующей приближенной формулы:

$$F_{\kappa i} = r_i^2 (\pi + 2 \frac{a_i - 1}{a_i + 1}). \quad (4.88)$$

Как показала числовая проверка, во всем диапазоне возможных значений коэффициента  $a_i$  (от 1 до  $\infty$ ) погрешность вычислений  $F_{\kappa i}$  с помощью выражения (4.88) находится в пределах  $\pm 1,1\%$ , что позволяет использовать его в расчетах калибровок, практически не внося при этом ошибки в конечные результаты.

Смещенная площадь металла при прокатке круга в  $i$ -том стрельчатом треугольном калибре (см. рис. 74) будет равна

$$\Delta F_i = 6F_{BCA} = 6(F_{DCA} - F_{DBA}),$$

где

$$F_{DCA} = \frac{1}{2} r_{i-1}^2 \arcsin \frac{y_{oi}}{r_{i-1}} - \frac{1}{2} y_{oi} z_{oi};$$

$$F_{DBA} = \frac{1}{2} R_{обри}^2 \arcsin \frac{y_{oi}}{R_{обри}} - \frac{1}{2} y_{oi} (R_{обри} - r_i + z_{oi}).$$

Таким образом, смещенная площадь металла

$$\Delta F_i = 3r_{i-1}^2 [\arcsin \frac{y_{oi}}{r_{i-1}} - a_i^2 \frac{r_i^2}{r_{i-1}^2} \arcsin \frac{y_{oi}}{a_i r_i} + \frac{y_{oi} r_i}{r_{i-1}^2} (a_i - 1)].$$

Отношение диаметров стрельчатого треугольного калибра к диаметру последующего круглого калибра обозначим через  $\psi_i$ ,  $d_i/d_{i+1} = \psi_i$ .

Отсюда отношение

$$r_i/r_{i-1} = \psi_i / \sqrt{\lambda_\Sigma}, \quad (4.89)$$

где  $r_{i-1}$  — диаметр предыдущего круглого калибра.

Подставляя значение  $\Delta F_i$  в (4.4), получим с учетом (4.89) уравнение, связывающее размеры  $i$ -того стрельчатого треугольного калибра с параметрами деформации

$$\arcsin \frac{y_{oi}}{r_{i-1}} - a_i^2 \frac{\psi_i^2}{\lambda_\Sigma} \arcsin \frac{y_{oi}}{a_i r_{i-1}} \cdot \frac{\sqrt{\lambda_\Sigma}}{\psi_i} + \frac{y_{oi}}{r_{i-1}} \cdot \frac{\psi_i}{\sqrt{\lambda_\Sigma}} (a_i - 1) = \frac{\pi}{3} \frac{\lambda_i - 1}{\lambda_i (1 - c_{yi})}, \quad (4.90)$$

где  $y_{oi}$  — абсцисса точки пересечения образующих стрельчатого треугольного и предыдущего круглого калибра (см. рис. 74);  $\lambda_i$ ,  $c_{yi}$  — вытяжка и коэффициент уширения в  $i$ -том стрельчатом треугольном калибре.

Как и для овального калибра системы овал — круг, отношение

$$\frac{r_{oi}}{r_{i-1}} = \sqrt{1 - \frac{\psi_i^2}{\lambda_\Sigma} \frac{(2a_i - \frac{\lambda_\Sigma}{\psi_i^2} - 1)^2}{4(a_i - 1)^2}}.$$

Еще одно уравнение для определения коэффициентов  $a_i$  и  $\psi_i$  найдем из условия полного заполнения металлом круглых калибров.

Для последующего  $(i + 1)$ -го круглого трехвалкового калибра это условие выразится так же, как и для двухвалкового, в виде:

$$\Delta F_{\kappa i+1} = \Delta F_{\gamma i+1} = \pi r_{i+1}^2 (\lambda_{i+1} - 1) \frac{c_{\gamma i+1}}{1 - c_{\gamma i+1}}.$$

Из рис. 75 видно, что площадь круглого калибра, которая оказалась бы не заполненной металлом при прокатке без уширения, можно представить следующим образом:

$$\Delta F_{\kappa i+1} = 6F_{ECM} = 6(F_{OCM} - F_{OCD} - F_{DCE}),$$

где

$$F_{OCM} - F_{OCD} = \frac{1}{2} (r_{i+1}^2 \arcsin \frac{CD}{r_{i+1}} - OD \cdot CD);$$

$$F_{DCE} = \frac{1}{2} [R_{обpi}^2 \arcsin \frac{CD}{R_{обpi}} - CD (R_{обpi} - r_i + OD)].$$

Отсюда

$$\Delta F_{\kappa i+1} = 3r_{i+1}^2 [\arcsin \frac{CD}{r_{i+1}} - a_i^2 \psi_i^2 \arcsin \frac{CD}{r_{i+1}} \times$$

$$\times \frac{1}{a_i \psi_i} + \psi_i \frac{CD}{r_{i+1}} (a_i - 1)].$$

Величину отношения  $\frac{CD}{r_{i+1}}$  найдем из выражения (2.52)

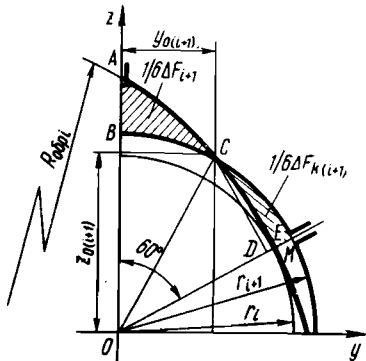


Рис. 75. Деформация в круглом калибре, система стрелчатый треугольник — круг

$$\frac{CD}{r_{i+1}} = \frac{r'_{oi+1}}{r_{i+1}} = \sqrt{1 - \psi_i^2 \frac{[2a_i - (1/\psi_i^2) - 1]^2}{4(a_i - 1)^2}}.$$

После подстановки значения  $\Delta F_{\kappa i+1}$  в (4.7) получим уравнение, связывающее размеры стрелчатого треугольного калибра с параметрами деформации в последующем  $(i + 1)$ -м круглом калибре:

$$\arcsin \frac{r'_{oi+1}}{r_{i+1}} - a_i^2 \psi_i^2 \arcsin \frac{r'_{oi+1}}{r_{i+1}} \cdot \frac{1}{a_i \psi_i} + \frac{r'_{oi+1}}{r_{i+1}} \psi_i (a_i - 1) = \frac{\pi}{3} \cdot \frac{(\lambda_{i+1} - 1) c_{\gamma i+1}}{1 - c_{\gamma i+1}}, \quad (4.91)$$

где  $\lambda_{i+1}$ ,  $c_{\gamma i+1}$  — вытяжка и коэффициент уширения в круглом  $(i + 1)$ -м калибре.

Таким образом, размеры стрелчатого треугольного калибра, выражаемые коэффициентами  $a_i$ ,  $\psi_i$ , определяется путем совместного решения уравнений (4.90), (4.91).

Как видим, уравнения (4.90), (4.91) по форме аналогичны соответствующим уравнениям (4.69), (4.72) для расчета размеров овальных калибров в системе овал — круг, отличаясь от них только величиной постоянного коэффициента в правой части и значений коэффициентов уширения  $c_{\gamma i}$  и  $c_{\gamma i+1}$ , которые определяются уравнениями (3.18) и (3.19).

Если принять, что  $D_i = D_{i+1}$  уравнение для определения коэффициента уширения в стрелчатом треугольном калибре с учетом (4.68) будет иметь вид:

$$c_{\gamma i} = 1 / \left\{ 1 + \frac{25A}{4 + D_{i+1}/d_{i+1} \sqrt{\lambda_\Sigma}} [1 + 20 \frac{A}{a_i^2} (\frac{\sqrt{\lambda_\Sigma}}{\psi_i} - 1)^2] \right\}. \quad (4.92)$$

Для решения уравнений (4.90), (4.91) с помощью метода последовательных приближений заменяем их на эквивалентные уравнения вида  $a_i = f_1(a_i, \psi_i)$ ,  $\psi_i = f_2(a_i, \psi_i)$ . С учетом (3.19) будем иметь:

$$a_i = \frac{\sqrt{\lambda_\Sigma}}{\psi_i} \sqrt{[\arcsin \frac{r_{oi}}{r_{i-1}} + \frac{\psi_i}{\sqrt{\lambda_\Sigma}} \frac{r_{oi}}{r_{i-1}} (a_i - 1) - \frac{\pi}{3} \frac{\lambda_i - 1}{\lambda_i (1 - c_{\gamma i})}] / \arcsin \frac{r_{oi}}{r_{i-1}} \frac{\sqrt{\lambda_\Sigma}}{a_i \psi_i}}; \quad (4.93)$$

$$\psi_i = \frac{1}{a_i} \sqrt{[\arcsin \frac{r'_{oi+1}}{r_{i+1}} + \psi_i \frac{r'_{oi+1}}{r_{i+1}} (a_i - 1) -$$

$$-\frac{\pi}{270A} (\lambda_{i+1} - 1) \left( 4 + \frac{D_{i+1}}{d_{i+1}} \right) \} / \arcsin \frac{V_{oi+1}}{a_i \psi_i r_{i+1}}. \quad (4.94)$$

Уравнения (4.93), (4.94) решаются в той же последовательности, как и уравнения (4.96), (4.72) при расчете размеров овальных калибров. Погрешность вычислений коэффициентов  $a_i$ ,  $\psi_i$  в соответствии с принятой точностью изготовления валков клетей с трехвалковыми калибрами можно принять такой же, как для системы овал — круг.

Решение трансцендентных уравнений (4.93), (4.94) требует большого объема вычислений и существенно усложняет весь расчет калибровки валков. Чтобы упростить вычисления, начальные значения коэффициентов  $a_i$  и  $\psi_i$  можно определять с помощью следующих выражений, полученных путем числового анализа уравнений (4.93), (4.94):

$$a_i = 1 + 0,13 \left( 20 + \sqrt{\frac{D_{i+1}}{d_{i+1}}} \right) (\lambda_\Sigma - 0,55)^4 \times \frac{\lambda_{i+1} (\lambda_{i+1} - 1)^2}{\lambda_i (\lambda_i - 1)^2}; \quad (4.95)$$

$$\psi_i = 1 - 0,035 \sqrt[3]{\frac{a_{i-1}}{a_i}} (\lambda_{i+1} - 1)^2 \frac{1}{A^2} \left( 4 + \frac{D_{i+1}}{d_{i+1}} \right)^2. \quad (4.96)$$

В частном случае, при  $\lambda_i = \lambda_{i+1} = \sqrt{\lambda_\Sigma}$

$$a_i = 1 + 0,13 \left( 20 + \sqrt{\frac{D_{i+1}}{d_{i+1}}} \right) (\lambda_\Sigma - 0,55)^4.$$

При определении начальных значений коэффициентов  $a_i$  и  $\psi_i$  с помощью выражений (4.95), (4.96) число необходимых для решения уравнений (4.93), (4.94) итераций сокращается до двух-трех, что в значительной степени уменьшает трудоемкость вычислений.

Числовая проверка, проведенная в широком диапазоне значений параметров деформации ( $\lambda_\Sigma = 1,2 \div 2,0$ ,  $\lambda_i/\lambda_{i+1} = 0,95 \div 1,05$ ,  $A = 3,5 \div 5,5$ ,  $D_{i+1}/d_{i+1} = 5 \div 30$ ), показала, что погрешность вычислений коэффициентов  $a_i$ ,  $\psi_i$  с помощью выражений (4.95), (4.96) не превышает нескольких процентов. Это позволяет использовать их не только для нахождения значений  $a_i^{(0)}$ ,  $\psi_i^{(0)}$ , но и в качестве самостоятельных приближенных формул для расчета размеров стрельчатых треугольных калибров вместо исходных уравнений (4.93), (4.94). Опыт проектирования и освоения литейно-прокатных агрегатов с трехвалковыми непрерывными станами показывает, что точность расчета калибровки валков в этом случае вполне достаточна для практических целей.

Результаты расчета коэффициентов  $a_i$  и  $\psi_i$  с помощью уравнений (4.93), (4.94) представлены на рис. 76 и 77.

Разновидностью калибровки стрельчатый треугольник — круг является система стрельчатый треугольник — шестиугольник, применяемая обычно в черновых клетях. Преимущество шестиугольных калибров по сравнению с круглыми заключается в большей устойчивости в них треугольной полосы; кроме того, облегчается захват полосы валками, что особенно важно для первой клетки стана.

Расчет калибровки шестиугольник — стрельчатый треугольник — круг выполняется в два этапа. Первоначально рассчитывают исходя из предположения, что калибровка валков прокатного стана во всех клетях представляет собой систему стрельчатый треугольник — круг, метод расчета которой изложен выше. После этого для клетей, где вместо круглых предполагается применять шестиугольные калибры, делается дополнительный расчет, который основывается на том, что, благодаря близости формы и размеров шестиугольного и круглого калибра, величины уширения, катающего диаметра, а следовательно, и расчетной площади металла в них, можно считать одинаковыми.

Площадь  $(i+1)$ -го шестиугольного калибра с учетом закруглений в углах и зазоров между валками можно представить в виде:

$$F_{ki+1} = \frac{\sqrt{3}}{2} d_{\text{ш}i+1}^2 - 0,16 r_{3i+1}^2 - 0,43 s_{i+1}^2,$$

где  $d_{\text{ш}i+1}$  — диаметр вписанной в шестиугольный калибр окруж-

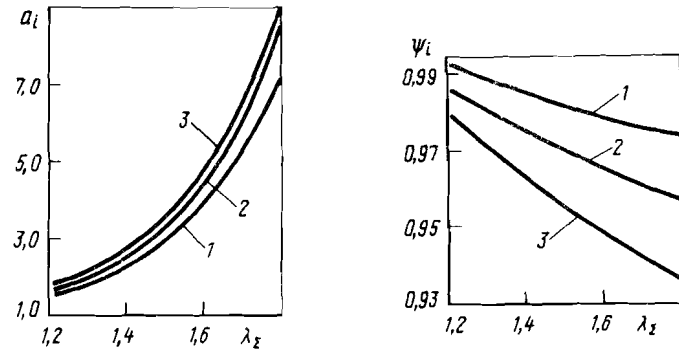


Рис. 76. Значения коэффициента  $a_i$  в зависимости от величины  $\lambda_\Sigma$  и отношения  $D_{i+1}/d_{i+1}$  ( $\lambda_i = \lambda_{i+1}$ ,  $A = 4,5$ ):  
1 — при  $D_{i+1}/d_{i+1} = 5$ ; 2 — при  $D_{i+1}/d_{i+1} = 15$ ; 3 — при  $D_{i+1}/d_{i+1} = 30$

Рис. 77. Значения коэффициента  $\psi_i$  в зависимости от величины  $\lambda_\Sigma$  и отношения  $D_{i+1}/d_{i+1}$  ( $\lambda_i = \lambda_{i+1}$ ,  $A = 4,5$ ):  
1 — при  $D_{i+1}/d_{i+1} = 5$ ; 2 — при  $D_{i+1}/d_{i+1} = 15$ ; 3 — при  $D_{i+1}/d_{i+1} = 30$

ности (диаметр шестиугольного калибра);  $r_{zi+1}$  — радиус закруглений в углах шестиугольного калибра;  $s$  — зазор между валками.

При построении шестиугольного калибра можно принять

$$r_{zi+1} = 0,2 d_{шi+1}; s_{i+1} = 0,1 d_{шi+1}.$$

С учетом этого площадь  $F_{ки+1}$  будет равна  $F_{ки+1} = 0,855 d_{шi+1}^2$ .

Из условия полного заполнения шестиугольного калибра металлом ( $F_{ки+1} = F_{i+1}$ ) получим следующее выражение для определения его диаметра при известной площади равновеликого круга

$$d_{шi+1} = 1,08 \sqrt{F_{i+1}} = 0,96 d_{i+1},$$

где  $d_{i+1}$  — расчетный диаметр  $(i+1)$ -го круглого калибра.

Ширину и глубину вреза в валки стрельчатых треугольных калибров можно найти с помощью следующих зависимостей:

$$b_{pi} = 2 \sqrt{h_{pi} (2R_{обpi} - h_{pi})}; \quad (4.97)$$

$$h_{pi} = \frac{d_i}{8} (a_i + 3 - 2s_i \sqrt{3}/d_i) [1 - \sqrt{1 - 12 \left( \frac{1 - 2s_i/d_i \sqrt{3}}{a_i + 3 - 2s_i \sqrt{3}/d_i} \right)^2}]. \quad (4.98)$$

После выполнения расчетов размеров всех калибров следует проверка. Необходимо, чтобы площадь каждого стрельчатого калибра  $F_{ки}$ , вычисленная на основе найденных из уравнений (4.93) и (4.94) значений коэффициентов  $a_i$  и  $\psi_i$ , была больше или, по крайней мере, равна площади металла в данном калибре ( $F_i$ ), подсчитанной в соответствии с принятым распределением обжатий по клетям стана, т.е. чтобы  $F_{ки} \geq F_i$ .

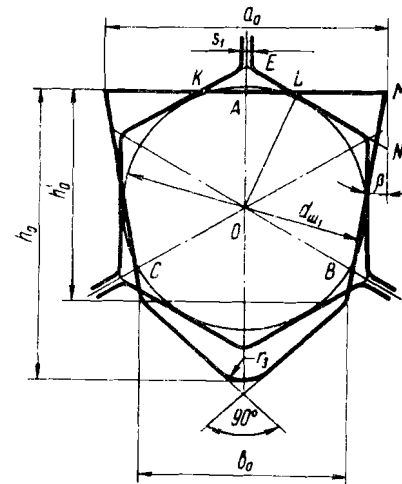
Подставляя в это неравенство значение  $F_{ки}$  из (4.88) и представляя  $F_i$  как  $F_i = \lambda_{i+1} \pi r_{i+1}^2 = \pi r_i^2 \frac{\lambda_{i+1}}{\psi_i^2}$ , получим в окончательном виде следующее выражение для проверки коэффициентов  $a_i$  и  $\psi_i$ :

$$\psi_i^2 \left( 1 - \frac{2}{\pi} \frac{a_i - 1}{a_{i+1}} \right) \geq \lambda_{i+1}. \quad (4.99)$$

#### Расчет размеров заготовки пятиугольного сечения для литейно-прокатных агрегатов с трехвалковым блоком

В случае, если первая клетя стана, входящего в состав литейно-прокатного агрегата для производства катанки имеет трехвалковый шестиугольный калибр, заготовка после кристаллизатора должна иметь не трапециевидную, а пятиугольную форму (рис. 78). При этом для того, чтобы обеспечить симметричное заполнение всех последующих трехвалковых калибров, необходимо иметь симметричное за-

Рис. 78. К расчету заготовки пятиугольного сечения для ЛПА с трехвалковым станом



полнение первого калибра. Из рис. 78 видно, что для выполнения этого условия нужно, чтобы при принятом соотношении размеров заготовки и ее расположении в калибре, которое определяется равновесием сил, действующих со стороны каждого вала, имело место следующее равенство:

$$OA = OB = OC = r_0.$$

Для определения  $r_0$  воспользуемся уравнением (4.6), которое для первого калибра в случае полного заполнения его металлом будет иметь вид

$$\Delta F_{к1} = \frac{c_{y1} (\lambda_1 - 1)}{1 - c_{y1}} F_1. \quad (4.100)$$

Из рис. 78 видно, что если пренебречь зазором между валками, то при  $OA = OB = OC$  площадь  $\Delta F_{к1}$  можно приближенно представить как

$$\Delta F_{к1} \approx 3F_{KEL} = 3\sqrt{3} \left( \frac{d_{ш1}}{\sqrt{3}} - r_0 \right)^2,$$

где  $d_{ш1}$  — диаметр первого калибра.

Подставляя это значение  $\Delta F_{к1}$  в (4.100) и проводя необходимые преобразования, получим следующее уравнение для определения параметра  $r_0$ :

$$r_0 = \frac{d_{ш1}}{\sqrt{3}} [1 - 0,70 \sqrt{(\lambda_1 - 1) \frac{c_{y1}}{1 - c_{y1}}}] . \quad (4.101)$$

Ширина верхнего основания заготовки будет равна (см. рис. 78)

$$a_0 = BC + 2 \cdot 1,5 r_0 \operatorname{tg} \beta = r_0 \sqrt{3} (1 + \sqrt{3} \operatorname{tg} \beta).$$

Для беспрепятственного выхода заготовки из роторного кристаллизатора, как уже отмечалось ранее, необходимо иметь уклон боковых стенок бандажа порядка  $\beta = 10 \div 12^\circ$ . Принимая значение  $\operatorname{tg} \beta = 0,2$ , получим ширину верхнего основания заготовки:

$$a_0 = 2,33 r_0. \quad (4.102)$$

Вследствие вертикальной симметрии заготовки площадь металла в первом калибре можно представить следующим образом (см. рис. 78):

$$F_1 = F_0 - (\Delta F_1 + 2\Delta F_2)(1 - c_{y1}), \quad (4.103)$$

где  $F_0$  — площадь сечения заготовки;  $\Delta F_1, \Delta F_2$  — смещенные площади металла соответственно от нижнего и бокового валка.

На основании анализа формы поперечного сечения полосы после первой клетки, проведенного на литейно-прокатных агрегатах с трехвалковыми станами, прокатывающих катанку из заготовки пятиугольного сечения, полоса при прокатке в первом шестиугольном калибре занимает такое положение, при котором имеется примерное равенство площадей металла, смещенных каждым из валков, образующих калибр, т.е.  $\Delta F_1 \approx \Delta F_2$ .

Как видно из рис. 78, величину смещенной площади металла от бокового валка можно приближенно выразить как

$$\Delta F_2 \approx F_{LMN} = \frac{1}{2} LM \cdot MN = \frac{1}{2\sqrt{3}} (LM)^2,$$

$$\text{где } LM = AM - AL = \frac{a_0}{2} - \left(\frac{d_{ш1}}{\sqrt{3}} - r_0\right)\sqrt{3}.$$

С учетом (4.102) получим  $LM = 2,9 r_0 - 0,96 d_1$ , где  $d_1$  — диаметр круга, равновеликого первому шестиугольному калибру. Отсюда  $\Delta F_2 = 0,27 (3r_0 - d_1)^2$ .

Подставляя значение  $\Delta F_2$  в (4.103), получим уравнение для определения вытяжки в первом шестиугольном калибре при пятиугольной форме сечения заготовки:

$$\lambda_1 = 1 + \left(3 \frac{r_0}{d_1} - 1\right)^2 (1 - c_{y1}). \quad (4.104)$$

Подставляя это значение  $\lambda_1$  в уравнение (4.101), получим

$$r_0 = \frac{1 + 0,7 \sqrt{c_{y1}}}{1,8 + 2,1 \sqrt{c_{y1}}} d_1. \quad (4.105)$$

Принимаем, что при прочих равных условиях величина коэффициентов уширения в трехвалковых шестиугольных и равновеликих круглых калибрах одинакова. Тогда в соответствии с (3.19)

$$c_{y1} = \frac{1}{1 + 90A / (4 + \frac{D_1}{d_1})},$$

где  $D_1$  — диаметр валка в вершине равновеликого круглого калибра.

Определив  $r_0$ , а затем из (4.104) — величину вытяжки в первом калибре ( $\lambda_1$ ), найдем площадь сечения заготовки ( $F_0 = \frac{\pi}{4} d_1^2 \lambda_1$ ) и из (4.102) ширину верхнего основания.

Площадь сечения пятиугольной заготовки при  $\gamma = 90^\circ$  равна

$$F_0 = \frac{a_0 + b_0}{2} h'_0 + \frac{b_0^2}{4} - 0,215 r_3^2,$$

где  $r_3$  — радиус закругления угла у нижнего основания заготовки.

Как показал опыт работы, для уменьшения вероятности появления трещин у нижнего основания заготовки при прокатке в первой клетки целесообразно радиус  $r_3$  выполнять примерно равным радиусу закругления углов первого калибра; при  $r_3 = 0,2 d_1$ :

$$F_0 = \frac{a_0 + b_0}{2} h'_0 + \frac{b_0^2}{4} - 0,086 d_1^2. \quad (4.106)$$

Соотношение между шириной верхнего и нижнего основания заготовки определяется углом наклона стенок бандажа кристаллизатора  $\beta$ , при  $\beta = 11^\circ$

$$\frac{a_0 - b_0}{2} = 0,2 h'_0. \quad (4.107)$$

Решая уравнения (4.106) и (4.107) совместно, найдем остальные размеры заготовки:

ширина нижнего основания

$$b_0 = \sqrt{2,91 r_0^2 - F_0} - 0,0083 d_1^2;$$

высота трапецевидной части заготовки

$$h'_0 = 2,5 (a_0 - b_0);$$

общая высота заготовки с учетом закругления

$$h_0 = h'_0 + \frac{1}{2} b_0 - 0,414 r_3 = 2,5 a_0 - 2b_0 - 0,083 d_1.$$

С учетом усадки металла при кристаллизации глубина выточки бандажа кристаллизатора должна быть на 2 — 3 % больше расчетной высоты заготовки.

## 6. РАСЧЕТ КАЛИБРОВ СИСТЕМЫ ТРЕУГОЛЬНИК — ТРЕУГОЛЬНИК

Система калибров треугольник — треугольник применяется в качестве вытяжной при прокатке катанки в клетях с трехвалковыми калибрами. Как уже упоминалось ранее, поперечное сечение полосы, прокатываемой в системе треугольных калибров, имеет форму неправильного шестиугольника.

Рассмотрим деформацию полосы шестиугольного сечения в системе треугольных калибров. Площадь  $i$ -того трехвалкового треугольного калибра (рис. 79) равна

$$F_{\kappa i} = \frac{3\sqrt{3}}{4} (d_i^2 - s_i^2), \quad (4.108)$$

где  $d_i$  — диаметр вписанной в калибр окружности (диаметр калибра);  $s_i$  — зазор между валками.

Величина зазоров между валками выбирается с учетом точности изготовления валков и возможности их радиальной регулировки в



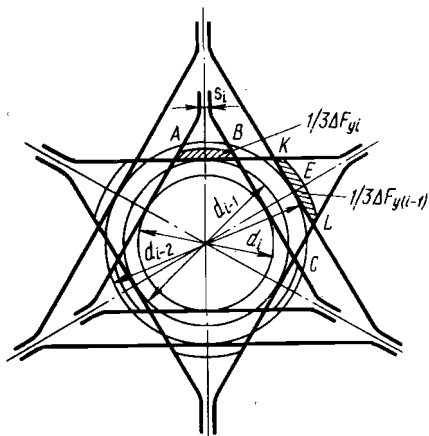


Рис. 79. Деформация в треугольном калибре, треугольник — треугольник

клетей. При этом зазоры целесообразно принимать по возможности минимальными, так как в этом случае облегчается контроль качества изготовления и установки валков в клетях.

Площадь треугольного калибра, которая оказалась бы свободной от металла при отсутствии поперечной деформации

$$\Delta F_{\kappa i} = \sqrt{3} \left( d_i - \frac{d_{i-1}}{2} \right)^2.$$

Если в выражении (4.108) пренебречь величиной зазора между валками ввиду его малости по сравнению с диаметром калибра, будем иметь  $F_{\kappa i} = \frac{3\sqrt{3}}{4} d_i^2$ .

Таким образом, размеры треугольного калибра определяются единственным параметром — диаметром вписанной окружности  $d_i$ .

Подставляя значения  $F_{\kappa i}$  и  $\Delta F_{\kappa i}$  в (4.3), получим уравнение, связывающее размеры двух соседних треугольных калибров с параметрами деформации:

$$\frac{F_i}{d_{i-1}^2} = \frac{\sqrt{3}}{4} \frac{1 - c_{yi}}{1 - c_{yi} \lambda_i} \left( 4 \frac{d_j}{d_{i-1}} - \frac{d_i^2}{d_{i-1}^2} - 1 \right). \quad (4.109)$$

Площадь сечения полосы в  $i$ -том калибре выражаем через площадь равновеликого круга

$$F_i = \frac{\pi}{4} d_{pi}^2, \quad (4.110)$$

где  $d_{pi}$  — диаметр круга площадью  $F_i$  (приведенный диаметр).

Для упрощения последующих вычислений введем безразмерный параметр  $\alpha$ , равный отношению диаметра данного треугольного калибра к приведенному диаметру полосы в последующем калибре

$$\alpha_{i-1} = \frac{d_{i-1}}{d_{pi}}, \quad \alpha_i = \frac{d_i}{d_{pi+1}}, \quad \dots, \quad \alpha_{n-1} = \frac{d_{n-1}}{d_{pn}},$$

отсюда

$$\begin{aligned} d_{i-1} &= \alpha_{i-1} d_{pi} = \alpha_{i-1} \sqrt{\frac{4}{\pi} F_i}; \\ d_i &= \alpha_i d_{pi+1} = \alpha_i \sqrt{\frac{4}{\pi} F_{i+1}}; \\ &\dots \dots \dots \\ d_{n-1} &= \alpha_{n-1} d_{pn} = \alpha_{n-1} \sqrt{\frac{4}{\pi} F_n}. \end{aligned} \quad (4.111)$$

Подставляя значения  $F_i$  и  $d_{i-1}$ ,  $d_i$  из (4.110) и (4.111) в уравнение (4.109), после соответствующих преобразований получим

$$\alpha_{i-1} = \alpha_i \sqrt{\lambda_{i+1}} \left[ 2 - \sqrt{3} - \frac{\pi}{\sqrt{3}} \frac{1 - c_{yi} \lambda_i}{(1 - c_{yi}) \alpha_i^2} \right]. \quad (4.112)$$

Обычно в прокатных блоках с трехвалковыми калибрами значения кинематических коэффициентов скорости соседних клетей принимаются либо равными, либо близкими по величине. В этом случае вытяжки в соседних калибрах, а следовательно, и коэффициенты  $\alpha$  также будут иметь близкие значения.

Если в (4.112) принять  $\alpha_{i-1} = \alpha_i$ , получим следующее уравнение для определения коэффициента  $\alpha$   $i$ -того треугольного калибра

$$\alpha_i = 1.35 \sqrt{\frac{\lambda_{i+1} (1 - c_{yi} \lambda_i)}{(4 \sqrt{\lambda_{i+1}} - \lambda_{i+1} - 1) (1 - c_{yi})}}. \quad (4.113)$$

В соответствии с (3.17) величина коэффициента уширения при прокатке полосы шестиугольного сечения в  $i$ -том треугольном калибре будет равна

$$c_{yi} = \frac{1}{1 + 25 \frac{Ad_{i-2}}{4d_{i-2} + D_i}}.$$

Преобразуем его к виду более удобному для практического использования при расчетах калибровки валков, принимая во внимание, что для системы однородных калибров, в том числе для рассматриваемой системы треугольник — треугольник, справедливо соотношение

$$d_i \approx d_{i-2} / \sqrt{\lambda_i \lambda_{i-1}}.$$

С учетом этого при  $\lambda_i \approx \lambda_{i-1}$  выражение (3.17) будет иметь вид:

$$c_{yi} = \frac{1}{1 + \frac{25A}{4 + D_i/d_i \lambda_i}} \quad (4.114)$$

где  $D_i$ ,  $d_i$  — соответственно диаметр валков и диаметр калибра  $i$ -той клетки.

Для непрерывного стана с общим приводом клеток величину вытяжки в  $i$ -том калибре в первом приближении можно представить в виде:

$$\lambda_i \approx \eta_i \frac{D_i}{D_{i-1}} = \eta_i \frac{D_0 - d_i}{D_0 - d_i \sqrt{\eta_i}}$$

где  $\eta_i$  — отношение скоростей вращения валков данной и предыдущей клетки ( $\eta_i = \frac{n_i}{n_{i-1}}$ );  $D_0$  — идеальный диаметр валков, равный удвоенному расстоянию от оси валка до оси прокатки.

Очевидно, что в том случае, если отношение диаметров  $D_i/d_i \gg 1$ , что характерно для чистовых проволочных блоков, величина вытяжки практически равна кинематическому коэффициенту скорости клетки.

При  $\lambda_i = \lambda_{i+1} = \eta_i$  будем иметь

$$\alpha_i = 1,35 \sqrt{\frac{\eta_i (1 - c_{yi} \eta_i)}{(4 \sqrt{\eta_i} - \eta_i - 1) (1 - c_{yi})}} \quad (4.115)$$

$$\text{где } c_{yi} = \frac{1}{1 + \frac{25A}{4 + D_i/d_i \eta_i}}$$

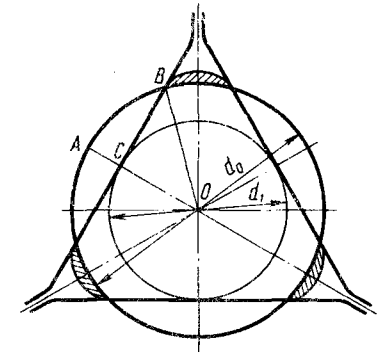
После расчета коэффициентов  $\alpha_i$ , используя выражения (4.111), определяем значения диаметров всех треугольных калибров. Выражение (4.115) можно использовать для предварительного определения диаметров треугольных калибров при расчете калибровки валков непрерывных станов с общим приводом. Подробнее об особенностях расчета калибровки валков станов с общим приводом изложено в конце главы.

После определения размеров калибров и выбора величины зазоров между валками следует провести проверку расчетов. Необходимо, чтобы для всех треугольных калибров выполнялось условие  $F_{\kappa i} > F_i$ , или, используя выражение (4.108), условие проверки запишется в виде

$$d_i > \sqrt{\frac{4}{3}} \sqrt{F_i + s_i^2} \quad (4.116)$$

Пример расчета калибровки треугольник — треугольник дан в гл. VII. Если заготовкой для первой клетки с треугольным калибром яв-

Рис. 80. Деформация круга в треугольном калибре



ляется круг, диаметр его и величину вытяжки в первом калибре находим следующим образом.

Величина смещенной площади металла при прокатке круга в треугольном калибре (рис. 80) равна

$$\Delta F_1 = 6 (F_{OAB} - F_{OCB}) = \frac{3}{4} d_0^2 (\arcsin \sqrt{1 - \frac{d_1^2}{d_0^2}} - \frac{d_1}{d_0} \sqrt{1 - \frac{d_1^2}{d_0^2}}),$$

где  $d_0$  — диаметр заготовки;  $d_1$  — диаметр первого треугольного калибра,  $d_1 = \alpha_1 \sqrt{\frac{4}{\pi} F_2}$ .

Подставляя значение  $\Delta F_1$  в (4.4), получим уравнение

$$\arcsin \sqrt{1 - \frac{d_1^2}{d_0^2}} - \frac{d_1}{d_0} \sqrt{1 - \frac{d_1^2}{d_0^2}} = \frac{\pi}{3} \frac{\lambda_1 - 1}{\lambda_1 (1 - c_{y1})} \quad (4.117)$$

где  $\lambda_1$ ,  $c_{y1}$  — вытяжка и коэффициент уширения в первом калибре;

$$\lambda_1 = \frac{F_0}{F_1} = \frac{\pi}{4} \frac{d_0^2}{F_1}$$

Для случая прокатки круга в треугольном калибре величина  $c_{y1}$  определяется выражением (3.17).

Таким образом, с учетом (3.17), считая, что диаметр первого треугольного калибра и площадь металла в нем определены ранее, уравнение (4.117) содержит одну неизвестную величину —  $d_0$ . Решение уравнения (4.117) можно найти с помощью метода последовательных приближений, для чего преобразуем его, выделив в левой части искомую величину.

В результате получим

$$d_0 = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{F_1}{1 - \frac{3}{\pi} (1 - c_{y1}) \left( \arcsin \sqrt{1 - \frac{d_1^2}{d_0^2}} - \frac{d_1}{d_0} \sqrt{1 - \frac{d_1^2}{d_0^2}} \right)}} \quad (4.118)$$

В качестве начального приближения можно принять  $d_0 = d_0^{(0)} = \sqrt{\frac{4}{\pi} F_1}$ . Вычисляем при  $d_0 = d_0^{(0)}$ , сначала коэффициент уширения  $c_{y1}$  и выражения (3.17), а затем, подставляя значения  $d_0^{(0)}$  и  $c_{y1}^{(0)}$  в правую часть уравнения (4.118), новое значение диаметра заготовки —  $d_0^{(1)}$ . Полностью повторяя вычисления при  $d_0 = d_0^{(1)}$ , получаем новое значение диаметра —  $d_0^{(2)}$ . Вычисления продолжаем до тех пор, пока разница между соседними приближениями  $d_0^{(n)} - d_0^{(n-1)}$  будет меньше или равна заданной погрешности. Погрешность вычислений можно принять, исходя из допустимой величины отклонения диаметра круглой заготовки в соответствии с действующим ГОСТом.

Переход от треугольного к чистовому круглому калибру представляет определенную сложность и может выполняться по-разному. В частности, на прокатном блоке одного из отечественных литейно-прокатных агрегатов алюминиевой катанки после ряда треугольных калибров перед предчистовым стрельчатым треугольником имеется промежуточный круглый калибр с несколько большими, чем у чистового круга, боковыми выпусками. При этом отношения скоростей вращения валков всех клеток блока ( $\eta$ ), в том числе чистовых, приняты одинаковыми. В то же время фирма Кокс эту задачу решает иначе, предусматривая между последним треугольным и чистовым круглым калибром промежуточный калибр в форме стрельчатого треугольника и принимая в двух последних клетях меньшие, чем в остальных клетях, значения коэффициента  $\eta$ .

#### Расчет размеров заготовки трапецевидного сечения для литейно-прокатного агрегата (ЛПА) с трехвалковыми блоками

Если ЛПА имеет кристаллизатор роторного типа, а калибровка валков блока представляет собой систему треугольных калибров, то наиболее рациональной является трапецевидная форма сечения заготовки, но с другим соотношением высоты и ширины, чем при двухвалковом блоке. Важным преимуществом трапецевидной заготовки по сравнению с пятиугольной является ее меньшая высота при той же площади поперечного сечения. Вследствие этого деформации растяжения, возникающие в нижней части сечения при разгибе заготовки в момент выхода из кристаллизатора, будут меньшей величины, что снижает вероятность образования поверхностных трещин. С этой же целью целесообразно иметь первую клеть блока с нижним горизонтальным валком.

Рассмотрим деформацию заготовки трапецевидного сечения в

треугольном калибре (рис. 81). Чтобы обеспечить симметричное заполнение металлом всех последующих калибров стана, в том числе и чистового круга, следует иметь симметричное заполнение первого калибра, для чего необходимо, чтобы при прокатке в первом калибре обеспечивалось (см. рис. 81) равенство:

$$OA = OK = ON = r_0 = \frac{d_0}{2}.$$

Величину  $r_0$  находим аналогично тому, как ранее определялись диаметры треугольных калибров; в соответствии с выражением (4.109), (4.110) будем иметь:

$$r_0 = 0,5 d_1 \left( 2 - \sqrt{3} - \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1 - \lambda_1 c_{y1}}{1 - c_{y1}} \cdot \frac{F_1}{d_1^2} \right), \quad (4.119)$$

где  $F_1$ ,  $\lambda_1$  — площадь металла и вытяжка в первом калибре;  $d_1$  — диаметр первого калибра.

Коэффициент уширения в первом калибре приближенно определим по формуле

$$c_{y1} = \frac{1}{1 + \frac{25A}{4 + \frac{D_1}{d_{пр}}}},$$

где  $d_{пр}$  — диаметр круга, площадь которого равна площади заготовки.

Найдем соотношения между величиной  $r_0$  и размерами заготовки.

Из рис. 81 видно, что ширину верхнего основания заготовки можно представить как

$$a_0 = 2(MN + AM \operatorname{tg} \beta) = 2 r_0 [\cos \beta + (1 + \sin \beta) \operatorname{tg} \beta].$$

Как и для двухвалковых блоков, угол наклона боковых стенок бандажа кристаллизатора для обеспечения выхода заготовки должен быть не менее  $10 - 12^\circ$ .

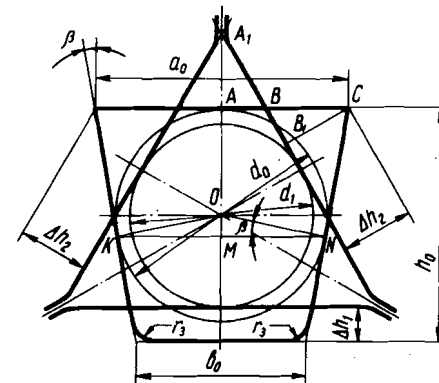


Рис. 81. К расчету заготовки трапецевидного сечения для ЛПА с трехвалковым станом

При  $\beta = 11^\circ$  ( $\operatorname{tg} \beta = 0,2$ ), имеем

$$a_0 = 2,42 r_0. \quad (4.120)$$

Ширина нижнего основания заготовки  $b_0 = a_0 - 2h_0 \operatorname{tg} \beta = 2,42 r_0 - 0,4 h_0$ .

Высоту заготовки найдем, исходя из того, что площадь заготовки известна, так как задана производительность агрегата.

Площадь сечения заготовки при  $\operatorname{tg} \beta = 0,2$  будет равна

$$F_0 = \frac{a_0 + b_0}{2} h_0 - 0,27 r_3^2, \quad (4.121)$$

где  $r_3$  — радиус закруглений углов у нижнего основания заготовки.

Обычно принимается  $r_3 \approx 0,2 h_0$ .

Подставляя значения  $a_0$ ,  $b_0$  и  $r_3$  в (4.121), после преобразований получим выражение для определения высоты трапецевидной заготовки

$$h_0 = 5,74 r_0 (1 - \sqrt{1 - 0,15 \frac{F_0}{r_0^2}}). \quad (4.122)$$

С учетом усадки металла при кристаллизации площадь выточки бандажа кристаллизатора должна быть на 2 — 3 % больше расчетной площади заготовки.

Прокатка трапецевидной заготовки в треугольном калибре связана с двумя существенными недостатками:

плохой захват вследствие того, что соприкосновение с боковыми валками происходит по острым углам заготовки, что существенно ограничивает величину обжатия в первой клетке и делает необходимым установку перед станом специального задающего устройства;

большая склонность заготовки к сваливанию в момент захвата, что требует обязательной установки перед первой клетью роликовой арматуры.

Для определения максимальной из условий захвата вытяжки в первом калибре найдем соотношение между величиной обжатия от боковых валков и размерами заготовки.

Как видно из рис. 81,

$$\Delta h_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} BC = \frac{\sqrt{3}}{2} \left( \frac{a_0}{2} - \frac{AA_1}{\sqrt{3}} \right) = \frac{\sqrt{3}}{4} a_0 - \frac{1}{2} \left( \frac{3}{2} d_1 - h_0 + \Delta h_1 \right). \quad (4.123)$$

Анализ формы поперечного сечения полосы после первого калибра, проведенный на ряде литейно-прокатных агрегатов с трехвалковыми станами, имеющих заготовку трапецевидного сечения, показал, что при прокатке в треугольном калибре с нижним горизонтальным валком заготовка занимает в нем такое положение, при котором имеется следующее соотношение обжатий от нижнего и боковых валков

$$\Delta h_1 \cong 0,5 \Delta h_2.$$

С учетом этого из (4.123) получим

$$\Delta h_2 = 0,2 (\sqrt{3} a_0 + 2h_0 - 3d_1). \quad (4.124)$$

Опыт показывает, что надежный захват трапецевидной заготовки в треугольном калибре без применения задающего устройства осуществляется при углах захвата на боковых валках не более  $20^\circ$ . Таким образом, максимальное обжатие от боковых валков будет равно

$$\Delta h_{2 \max} = 0,5 (1 - \cos \alpha_{\max}) D_1 = 0,03 D_1,$$

где  $D_1$  — диаметр валка в первой клетке.

Подставляя в (4.124) при  $\Delta h_2 = \Delta h_{2 \max}$  значения  $a_0$ ,  $h_0$  из (4.120), (4.122), получим уравнение для определения максимального из условий захвата значения вытяжки в первом треугольном калибре с нижним горизонтальным валком в случае, если заготовка имеет сечение трапецевидной формы:

$$\lambda_{1 \max} = 6,88 \frac{r_0^2}{F_1} [1 - (1,36 - \frac{D_1 + 20d_1}{76,6 r_0})^2].$$

Величину  $r_0$  определяем из уравнения (4.119). Расчет размеров заготовки и максимальной вытяжки в первом калибре можно упростить, не внося сколько-нибудь заметной погрешности, если в выражении (4.119) пренебречь величиной поперечной деформации ввиду ее малости. В этом случае в (4.119) величина  $1 - c_{y1} \lambda_1 / (1 - c_{y1}) = 1$  и выражение для определения величины  $r_0$  будет иметь следующий вид:

$$r_0 = d_1 (1 - \sqrt{0,75 - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{F_1}{d_1^2}}).$$

## 7. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА КАЛИБРОВКИ ВАЛКОВ НЕПРЕРЫВНЫХ СТАНОВ С ОБЩИМ ПРИВОДОМ КЛЕТЕЙ

Расчет калибровки валков непрерывных станов с общим приводом по сравнению со станами с индивидуальным приводом клеток имеет свои особенности. Это связано с тем, что в станах с общим приводом величины вытяжек в клетях не задаются, а определяются в соответствии с принятыми значениями кинематических коэффициентов скорости клеток. Поскольку в уравнениях для расчета размеров калибров фигурируют значения вытяжек в клетях, их решение возможно лишь совместно с уравнениями, определяющими величину вытяжки в калибре. Такими уравнениями являются уравнения постоянства секундных объемов металла по клетям и уравнения для катающих диаметров.

Расчет выполняется с помощью метода последовательных приближений. В качестве начального приближения вытяжка в каждой клетке



чета площадей металла во втором приближении будут иметь следующий вид:

$$F_{n-1}^{(2)} = F_{n-1}^{(0)} \frac{D_{kn}^{(1)}}{D_{kn-1}^{(1)}} ;$$

$$\dots\dots\dots$$

$$F_i^{(2)} = F_i^{(0)} \frac{D_{kn}^{(1)}}{D_{ki}^{(1)}} ; \quad (4.127)$$

$$\dots\dots\dots$$

$$F_1^{(2)} = F_1^{(0)} \frac{D_{kn}^{(1)}}{D_{k1}^{(1)}} .$$

Определение размеров овальных калибров с помощью уравнений (4.75) и (4.76) ввиду их относительной сложности целесообразно проводить на заключительном этапе расчета.

Указанная последовательность расчета калибровки валков непрерывного стана с общим приводом сохраняется для любой системы чередующихся калибров.

Найденные в соответствии с изложенным выше методом значения площадей металла по клетям и размеры калибров соответствуют режиму свободной прокатки. На практике оптимальным для непрерывных сортовых и проволочных станов считается режим с небольшим натяжением между клетями, наличие которого предупреждает появление межклетевого подпора, создавая тем самым запас устойчивости процессу прокатки. В станах с индивидуальным приводом необходимый режим натяжения в стане обычно осуществляется соответствующей корректировкой скоростей приводных двигателей. В случае же общего привода величина межклетевого натяжения может регулироваться только изменением настройки клетей. Так, уменьшение раствора валков в первых и увеличение его в последних клетях приводит к росту натяжений в стане и, наоборот, при увеличении раствора валков в первых клетях создаются условия для появления в полосе продольных сжимающих напряжений. Если калибровка валков стана представляет систему чередующихся калибров, например овал — круг или стрелчатый треугольник — круг, увеличение межклетевого натяжения можно достигнуть также путем увеличения раствора валков во всех клетях, имеющих круглые калибры, за исключением чистовой. Зазоры между валками в этих клетях составляют несколько больше расчетных, так чтобы высота круглого калибра была в 1,02 — 1,03 раза больше расчетного диаметра круга в данной клетке. Для создания натяжения в последней паре калибров следует также несколько увеличить по отношению к расчетному рас-

твор валков предчистовой клетки. Преимущество такого способа настройки стана, кроме простоты, заключается в создании дополнительной гарантии от переполнения круглых калибров металлом. Данный способ настройки успешно применяется на отечественных литейно-прокатных агрегатах с двухвалковыми и трехвалковыми станами.

## 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВ ЗАХВАТА В КАЛИБРАХ

После того как размеры калибров найдены, целесообразно в качестве заключительной стадии расчета калибровки валков провести расчет углов захвата в калибрах с целью проверки надежности захвата полосы валками. Из практики известно, что надежный захват полосы при прокатке в системах калибров овал — квадрат и овал — круг, а также в клетях с трехвалковыми калибрами можно ожидать, если углы захвата не превышают 20 — 22°. Для системы ящичных калибров и системы ромб — квадрат значения предельных углов захвата несколько больше (до 25°).

Расчет углов захвата при прокатке в калибрах можно выполнить с помощью выражений, приведенных ниже.

### Система прямоугольник — квадрат

Угол захвата в прямоугольном калибре

$$\alpha_i = \arccos \left( 1 - \frac{h_{i-1} - h_{ki}}{D_i} \right) \cong \arccos \left[ 1 - \frac{h_{i+1}}{D_{i+1}} \times \right. \\ \left. \times (\sqrt{\lambda_\Sigma} - 1) \right]; \quad (4.128)$$

угол захвата в квадратном калибре

$$\alpha_{i+1} = \arccos \left( 1 - \frac{b_i - h_{i+1}}{D_{i+1}} \right),$$

или, выражая высоту прямоугольной полосы как  $b_i = F_i/h_{ki} \cong F_i/h_{i+1}$ ,

$$\alpha_{i+1} = \arccos \left[ 1 - \frac{h_{i+1}}{D_{i+1}} (\lambda_{i+1} - 1) \right], \quad (4.129)$$

при  $\lambda_i = \lambda_{i+1}$  имеем  $\alpha_i = \alpha_{i+1}$ .

### Система ромб — квадрат

Угол захвата в ромбическом калибре с учетом полного заполнения металлом квадратных калибров равен

$$\alpha_i = \arccos \left( 1 - \frac{h_{ki-1} - h_{ki}}{D_i} \right) = \arccos \left[ 1 - \frac{h_{ki+1}}{D_i} \times \right. \\ \left. \times (\sqrt{\lambda_\Sigma} - \psi_i) \right]. \quad (4.130)$$

Если представить высоту полосы ромбического сечения при входе

в последующий квадратный калибр в виде  $b_i = 2F_i/h_{\kappa i}$ , получим следующее выражение для определения углов захвата в квадратных калибрах

$$\alpha_{i+1} = \arccos \left( 1 - \frac{b_i - h_{\kappa i+1}}{D_{i+1}} \right) = \arccos \left[ 1 - \frac{h_{\kappa i+1}}{D_{i+1}} \left( \frac{\lambda_{i+1}}{\psi_i} - 1 \right) \right]. \quad (4.131)$$

#### Система овал — квадрат

Углы захвата в овальных калибрах, учитывая полное заполнение металлом квадратных калибров, находим из выражения

$$\alpha_i = \arccos \left( 1 - \frac{h_{i-1} - 2z_{0i}}{D_0 - 2z_{0i}} \right), \quad (4.132)$$

где  $2z_{0i}$  — высота овального калибра в точке С (см. рис. 62).

Величину  $z_{0i}$  найдем из выражения (2.45), или, принимая во внимание, что  $(h_{i-1}^2/4R_{\text{обр}i}^2) \ll 1$  и, следовательно, можно считать, что

$\sqrt{R_{\text{обр}i}^2 (1 - h_{i-1}^2/4R_{\text{обр}i}^2)} \cong R_{\text{обр}i} (1 - h_{i-1}^2/8R_{\text{обр}i}^2)$ , с помощью следующей приближенной формулы:

$$z_{0i} = 0,5 h_i - h_{i-1}^2/4 a_i h_i.$$

Углы захвата в квадратных калибрах

$$\alpha_{i+1} = \arccos \left( 1 - \frac{b_i - h_{\kappa i+1}}{D_{i+1}} \right).$$

Высоту овального профиля при входе в последующий квадратный калибр находим, используя известную приближенную формулу для площади овала ( $F_i = \frac{2}{3} h_i b_i$ )

$$b_i = 3F_i/2h_i,$$

отсюда

$$\alpha_{i+1} \cong \arccos \left[ 1 - \frac{h_{\kappa i+1}}{D_{i+1}} \left( \frac{3}{4} \cdot \frac{\lambda_{i+1}}{\psi_i} - 1 \right) \right]. \quad (4.133)$$

#### Система овал — круг

Углы захвата в овальных калибрах можно найти с помощью выражения

$$\alpha_i = \arccos \left( 1 - \frac{d_{i-1} - d_i}{D_i} \right). \quad (4.134)$$

Представляя высоту овального профиля при входе в  $(i+1)$ -й круглый калибр как  $b_i = 3F_i/2d_i$ , получим следующее выражение для

расчета углов захвата в круглых калибрах

$$\alpha_{i+1} = \arccos \left[ 1 - \frac{d_{i+1}}{D_{i+1}} \left( \frac{3\pi}{8} \frac{\lambda_{i+1}}{\psi_i} - 1 \right) \right]. \quad (4.135)$$

#### Система стрелчатый треугольник — круг

При прокатке в данной системе калибры практически полностью заполняются металлом (как круглые, так и стрелчатые треугольные калибры), поэтому величину углов захвата можно определять из следующих выражений:

для стрелчатых треугольных калибров

$$\alpha_i = \arccos \left( 1 - \frac{d_{i-1} - d_i}{D_i} \right), \quad (4.136)$$

для круглых калибров (см. рис. 75)

$$\begin{aligned} \alpha_{i+1} &= \arccos \left[ 1 - \frac{2(AO - r_{i+1})}{D_{i+1}} \right] = \\ &= \arccos \left( 1 - \frac{\frac{2}{\sqrt{3}} b_{\kappa i} - d_{i+1}}{D_{i+1}} \right). \end{aligned} \quad (4.137)$$

Ширину стрелчатого треугольного калибра находим из выражения

$$b_{\kappa i} = \frac{\sqrt{3}}{4} d_i (a_i - 1) \left[ \sqrt{1 + 4 \frac{2a_{i-1}}{(a_{i-1} - 1)^2}} - 1 \right].$$

#### Система треугольник — треугольник

Принимая во внимание, что уширение полосы при прокатке в трехвалковых калибрах незначительно, величину угла захвата в треугольном калибре можно найти с помощью выражения

$$\alpha_i = \arccos \left( 1 - \frac{d_{i-2} - d_i}{D_i} \right). \quad (4.138)$$

## Г л а в а V. ПРЕДЕЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ВЫТЯЖЕК В КАЛИБРАХ

Для повышения производительности прокатного стана, снижения энергозатрат и уменьшения количества механического и электрического оборудования необходимо, чтобы деформация в каждом калибре с учетом его назначения была по возможности максимальной. Поэтому выбор режима обжатий в стане должен основываться на знании предельных деформаций, допустимых в данном калибре при данных конкретных условиях.

Кроме условий захвата, прочности оборудования и мощности при-

водных электродвигателей, важным фактором, определяющим величину допустимой деформации, является устойчивость полосы в данном калибре. Фактор устойчивости редко всерьез рассматривается в руководствах по калибровке валков, но всегда учитывается на практике. Поскольку при прочих равных условиях склонность полосы к сворачиванию относительно продольной оси зависит от соотношения размеров ее поперечного сечения, предельное соотношение между шириной и высотой полосы определяет максимальную, с точки зрения устойчивости, величину деформации. В частности, для овальной полосы в качестве условия ее устойчивости при прокатке в квадратном или круглом калибре обычно принимается соотношение высоты к ширине полосы равным или меньшим двух.

Предельное соотношение  $h/b = 2$  определяет максимальную, с точки зрения устойчивости, величину частной суммарной вытяжки. Очевидно, что данное соотношение размеров овального сечения в качестве критерия устойчивости полосы при прокатке является величиной в значительной степени условной. Из практики известно, что при хорошо отрегулированной проводковой арматуре возможна прокатка полос овального сечения с отношением высоты к ширине значительно больше двух. Тем не менее для уменьшения вероятности "сворачивания" полосы и повышения стабильности процесса прокатки следует стремиться к выполнению этого условия.

Другой проблемой, которая возникает при расчете вытяжных систем с чередующимися калибрами, является распределение частной суммарной вытяжки между калибрами данной пары, например между овалом и последующим квадратом или кругом (системы овал — квадрат, овал — круг), ромбом и последующим квадратом (система ромб — квадрат), которое, как уже упоминалось в гл. I, должно обеспечивать получение в каждой паре калибров квадратного или круглого профиля. Поскольку выполнение этого условия возможно только в определенном, строго ограниченном диапазоне соотношений вытяжек в чистовом (квадратном, круглом) и предчистовом (прямоугольном, ромбическом, овальном, стрельчатом треугольном) калибрах, для правильного распределения вытяжки между калибрами необходимо знать границы этого диапазона.

Если обозначить величину максимальной и минимальной вытяжки в  $i$ -том предчистовом калибре соответственно через  $\lambda_{i \max}$  и  $\lambda_{i \min}$ , то для данной величины частной суммарной вытяжки ( $\lambda_{\Sigma}$ ) предельные значения вытяжки в последующем чистовом калибре выразятся как

$$\lambda_{(i+1) \min} = \frac{\lambda_{\Sigma}}{\lambda_{i \max}}; \quad \lambda_{(i+1) \max} = \frac{\lambda_{\Sigma}}{\lambda_{i \min}}.$$

Отсюда предельные соотношения вытяжек в каждой паре калибров будут равны

$$\delta_{\max} = \frac{\lambda_{i \max}}{\lambda_{(i+1) \min}} = \frac{\lambda_{i \max}^2}{\lambda_{\Sigma}};$$

$$\delta_{\min} = \frac{\lambda_{i \min}}{\lambda_{(i+1) \max}} = \frac{\lambda_{i \min}^2}{\lambda_{\Sigma}}.$$

Таким образом, для определения допустимого диапазона соотношений вытяжек в каждой паре калибров достаточно определить значения максимальной и минимальной вытяжки в предчистовом калибре. В расчетах калибровок валков определение значений  $\lambda_{i \max}$  и  $\lambda_{i \min}$  должно предшествовать распределению вытяжки по клетям.

Далее излагается расчет предельных значений вытяжек в калибрах, а также максимальных из условия захвата и устойчивости полосы частных суммарных вытяжек для наиболее известных систем вытяжных калибров.

#### 1. СИСТЕМА ПРЯМОУГОЛЬНИК — КВАДРАТ

Поскольку ящичные калибры применяются главным образом при прокатке крупных сечений, факторами, ограничивающими обжатия в этой системе калибров, наряду с устойчивостью полосы, являются обычно условия захвата и нагрузка на валки. Оставляя в стороне такие факторы, как прочность оборудования и мощность электропривода, поскольку их можно учесть только применительно к конкретному стану, рассмотрим зависимость между максимальным углом захвата и предельной величиной частной суммарной вытяжки в системе прямоугольник — квадрат.

При примерном равенстве обжатий в  $i$ -том прямоугольном и последующем  $(i+1)$ -м квадратном ящичном калибре, что является характерным для данной системы калибров, и диаметров валков в  $i$ -той и  $(i+1)$ -й клетях, углы захвата в них также будут примерно одинаковыми. Для определения максимальной величины частной суммарной вытяжки по условиям захвата достаточно проанализировать условия захвата только в одном из калибров данной пары, например в  $(i+1)$ -м квадратном ящичном калибре.

Величина обжатия в  $(i+1)$ -м квадратном ящичном калибре равна

$$\Delta h_{i+1} = b_i - h_{ki+1}, \quad (5.1)$$

где  $b_i$  — высота полосы при входе в  $(i+1)$ -й калибр, равная ширине полосы после прокатки в  $i$ -том прямоугольном калибре;  $h_{ki+1}$  — высота  $(i+1)$ -го калибра, равная стороне прокатываемого квадрата ( $h_{ki+1} = h_{i+1}$ ).



Если считать уширение полосы в  $i$ -том прямоугольном и  $(i + 1)$ -м квадратном калибре равномерным по высоте, величину  $b_i$  можно представить как

$$b_i = h_{\kappa i-1} + \frac{\Delta F_i}{h_{\kappa i}} c_{yi}.$$

где  $\Delta F_i$ ,  $c_{yi}$  — смещенная площадь металла и коэффициент уширения в  $i$ -том калибре;  $h_{\kappa i-1}$ ,  $h_{\kappa i}$  — высота  $(i - 1)$ -го квадратного и  $i$ -того прямоугольного калибра ( $h_{\kappa i-1} = h_{i-1}$ ).

Величина смещенной в  $i$ -том калибре площади металла равна

$$\Delta F_i = h_{i-1}^2 - h_{\kappa i} h_{i-1}.$$

отсюда

$$b_i = h_{\kappa i-1} \left[ 1 + \left( \frac{h_{\kappa i-1}}{h_{\kappa i}} - 1 \right) c_{yi} \right]. \quad (5.2)$$

Величину  $h_{\kappa i}$  найдем, приняв уширение в  $(i + 1)$ -м калибре равномерным по высоте полосы.

В этом случае

$$h_{\kappa i} = h_{\kappa i+1} - \frac{\Delta F_{i+1}}{h_{\kappa i+1}} c_{yi+1} = h_{\kappa i+1} - \frac{h_{\kappa i}}{h_{\kappa i+1}} (b_i - h_{\kappa i+1}) c_{yi+1}.$$

отсюда

$$h_{\kappa i} = \frac{1}{1 + \left( \frac{b_i}{h_{\kappa i+1}} - 1 \right) c_{yi+1}}. \quad (5.3)$$

Принимая во внимание, что

$$\frac{h_{\kappa i-1}}{h_{\kappa i+1}} = \frac{h_{i-1}}{h_{i-1}} = \sqrt{\lambda_{\Sigma}},$$

из выражения (5.2) с учетом (5.3) находим

$$b_i = \frac{1 + (\sqrt{\lambda_{\Sigma}} - 1) c_{yi} c_{yi+1} \sqrt{\lambda_{\Sigma}}}{1 - \lambda_{\Sigma} c_{yi} c_{yi+1}}.$$

Подставляя значение  $b_i$  (в (5.1) и выражая величину обжатия в  $(i + 1)$ -м калибре как

$$\Delta h_{i+1} = D_{i+1} (1 - \cos \alpha_{i+1}),$$

где  $D_{i+1}$  — диаметр валка по дну  $(i + 1)$ -го калибра;  $\alpha_{i+1}$  — угол захвата, получим уравнение, связывающее величину частной суммарной вытяжки с углом захвата в  $(i + 1)$ -м калибре.

Для стали предельными углами захвата при прокатке в ящичных

калибрах обычно считаются  $22 - 25^\circ$ , хотя из практики известно, что в случае смятия передней кромки полосы и малой скорости прокатки угол захвата может достигать  $30^\circ$  и более.

Принимая в качестве максимального угол  $\alpha_{(i+1)\max} = 23^\circ$ , получим следующее уравнение для максимальной из условий захвата частной суммарной вытяжки в системе прямоугольник — квадрат

$$\lambda_{\Sigma \max 1} = [1 + 0,08 \frac{D_{i+1}}{h_{i+1}} (1 - \lambda_{\Sigma \max 1} c_{yi} c_{yi+1}) / (1 + c_{yi} \sqrt{\lambda_{\Sigma \max 1}})]^2. \quad (5.4)$$

Величину коэффициентов уширения в прямоугольном и квадратном ящичном калибрах найдем из (4.22), (4.13) при  $\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\Sigma \max 1}$ . Таким образом, максимальная величина частной суммарной вытяжки определяется совместным решением уравнений (4.13), (4.22), (5.4). Решение можно получить с помощью метода последовательных приближений.

Если пренебречь уширением полосы при прокатке ( $c_{yi} = c_{yi+1} = 0$ ), выражение для определения  $\lambda_{\Sigma \max 1}$  будет иметь следующий вид:

$$\lambda_{\Sigma \max 1} = (1 + 0,08 \frac{D_{i+1}}{h_{i+1}})^2. \quad (5.5)$$

Выражение (5.5) можно использовать для определения начального значения  $\lambda_{\Sigma \max 1}$  при решении уравнения (5.4).

Другим фактором, ограничивающим обжатие в калибрах системы прямоугольник — квадрат, является устойчивость прямоугольной полосы в квадратном ящичном калибре, зависящая при прочих равных условиях от соотношения ее высоты и ширины. Из практики известно, что устойчивое положение прямоугольной полосы можно ожидать при отношении:

$$b_i / h_i \leq 1,4, \quad (5.6)$$

где  $h_i$  — ширина полосы при входе в  $(i + 1)$ -й калибр, равная высоте предыдущего прямоугольного калибра ( $h_i = h_{\kappa i}$ ).

Для крупных сечений соотношение размеров полосы может быть несколько большим. Так, при прокатке на блюминге считается, что соотношение между шириной и высотой полосы перед кантовкой не должно превышать 1,7 ( $b_i / h_i \leq 1,7$ ).

Величина  $b_i$  определяется выражением (5.2). В предельном случае при  $h_i = b_i / 1,4$  будем иметь

$$b_i = \frac{h_{\kappa i-1}}{2} (1 - c_{yi}) \left[ 1 + \sqrt{1 + 5,6 \frac{c_{yi}}{(1 - c_{yi})^2}} \right]. \quad (5.7)$$

Величину  $h_i$  найдем из выражения (5.3) при  $b_i = 1,4 h_i$

$$h_i = \frac{h_{\kappa i+1}}{2,8} \cdot \frac{1 - c_{yi+1}}{c_{yi+1}} \cdot \left[ \sqrt{1 + 5,6 \frac{c_{yi+1}}{(1 - c_{yi+1})^2}} - 1 \right]. \quad (5.8)$$

Подставляя значения  $b_i$  и  $h_i$  из (5.7) и (5.8) в условие (5.6), получим после преобразований следующее уравнение для максимальной частной суммарной вытяжки из условия устойчивости прямоугольной полосы в квадратном ящичном калибре

$$\lambda_{\Sigma \max 2} = \frac{(1 - c_{yi+1})^2 [\sqrt{1 + 5,6 c_{yi+1} / (1 - c_{yi+1})^2} - 1]^2}{c_{yi+1}^2 (1 - c_{yi})^2 [1 + \sqrt{1 + 5,6 c_{yi} / (1 - c_{yi})^2}]^2}. \quad (5.9)$$

При отсутствии уширения, поскольку в этом случае  $b_i = h_{i-1}$ ,  $h_i = h_{i+1}$  величина  $\lambda_{\Sigma \max 2}$  была бы равна квадрату отношения размеров заготовки, т.е.  $\lambda_{\Sigma \max 2} = 1,96$ . Коэффициенты уширения  $c_{yi}$ ,  $c_{yi+1}$  найдем из выражений (4.22), (4.13) при  $\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\Sigma \max 2}$ . После подстановки в (5.9) значений коэффициентов  $c_{yi}$  и  $c_{yi+1}$  величину  $\lambda_{\Sigma \max 2}$  можно определить совместным решением уравнений (5.9), (4.19), (4.24) с помощью метода последовательных приближений. В качестве начального приближения для  $\lambda_{\Sigma \max 2}$  можно принять  $\lambda_{\Sigma \max 2}^{(0)} = 1,96$ .

Величину предельных значений частной суммарной вытяжки в системе прямоугольник — квадрат с достаточной для практических целей точностью можно найти также из следующих выражений, полученных путем числового анализа исходных уравнений при различных значениях отношения  $D_{i+1}/h_{i+1}$  и коэффициента  $A$ .

Из условия захвата полосы валками

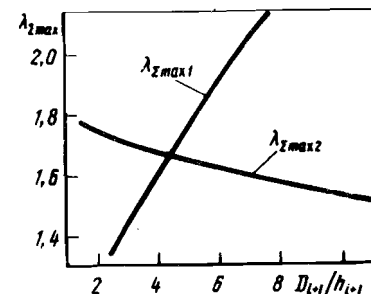
$$\lambda_{\Sigma \max 1} = \left[ 1 + 0,08 \frac{A}{2,5 + A} \left( \frac{D_{i+1}}{h_{i+1}} + \frac{5,5}{A} \right) \right]^2. \quad (5.10)$$

Из условия устойчивости полосы в калибре

$$\lambda_{\Sigma \max 2} = 1,96 - 0,14 \frac{9 + \frac{D_{i+1}}{h_{i+1}}}{1,5 + A}. \quad (5.11)$$

Таким образом, в зависимости от размеров поперечного сечения полосы и диаметра валков, допустимая величина частной суммарной вытяжки в системе калибров прямоугольник — квадрат определяется либо условиями захвата, либо устойчивостью прямоугольной полосы в квадратном ящичном калибре. Как видно из рис. 82, при  $\alpha_{i \max} = 23^\circ$  и  $(b_i/h_i) = 1,4$  точка пересечения кривых  $\lambda_{\Sigma \max 1}$  и  $\lambda_{\Sigma \max 2}$ , в которой эти факторы равнозначны, соответствует отношению  $\frac{D_{i+1}}{h_{i+1}}$ , примерно равному 4,5.

Рис. 82. Максимальные значения частной суммарной вытяжки в системе калибров прямоугольник — квадрат ( $A = 4,5$ )



Это означает, что если величина отношения диаметра валков к стороне прокатываемого квадрата меньше 4,5 ( $\frac{D_{i+1}}{h_{i+1}} < 4,5$ ), то определяющим фактором при выборе обжатий в калибрах можно считать условия захвата и принимаемые значения частной суммарной вытяжки должны быть меньше  $\lambda_{\Sigma \max 1}$ . В том случае, если отношение  $\frac{D_{i+1}}{h_{i+1}} > 4,5$ , принимаемые значения  $\lambda_{\Sigma}$  должны быть меньше  $\lambda_{\Sigma \max 2}$ .

## 2. СИСТЕМА РОМБ — КВАДРАТ

Для определения предельных значений вытяжки в ромбическом калибре воспользуемся уравнениями (4.37), (4.38), связывающими размеры калибра с параметрами деформации. Очевидно, что при данном значении частной суммарной вытяжки вытяжка в  $i$ -том ромбическом калибре достигнет максимального значения в случае полного заполнения калибра металлом, так как дальнейшее увеличение обжатия в ромбическом калибре приведет к его переполнению.

Таким образом, максимальная вытяжка в ромбическом калибре будет равна

$$\lambda_{i \max} = \frac{F_{i-1}}{F_i} = \frac{F_{i-1}}{F_{\kappa i}}.$$

Подставив значение площади ромбического калибра из (4.30) и выражая площадь предыдущего квадрата как

$$F_{i-1} = \frac{1}{2} h_{\kappa i+1}^2 \lambda_{\Sigma},$$

получим при  $s = 0$ ,  $r_3 = 0$  уравнение:

$$\lambda_{i \max} = \frac{\lambda_{\Sigma}}{\psi_i^2} \operatorname{tg} \beta_i. \quad (5.12)$$

Величину максимальной вытяжки в ромбическом калибре най-

дем совместным решением уравнения (5.12) и уравнений (4.37), (4.38), которые при  $\lambda_i = \lambda_{i \max}$  и  $\lambda_{i+1} = \frac{\lambda_\Sigma}{\lambda_{i \max}}$  будут иметь следующий вид:

$$\operatorname{tg} \beta_i = 1 - \frac{\lambda_{i \max} (1 - c_{yi})}{\lambda_{i \max} - 1} \left(1 - \frac{\psi_i}{\sqrt{\lambda_\Sigma}}\right)^2; \quad (5.13)$$

$$\psi_i = 1 - 0,26 \sqrt{\frac{1}{A} \left(4 + \frac{D_{i+1}}{h_{\kappa i+1}}\right) \left(\frac{\lambda_\Sigma}{\lambda_{i \max}} - 1\right) (1 - \operatorname{tg} \beta_i)}. \quad (5.14)$$

Коэффициент уширения в ромбическом калибре  $c_{yi}$  определим из выражения (4.39). Решение уравнений может быть получено с помощью метода последовательных приближений.

В качестве начального приближения для  $\lambda_{i \max}$  можно принять

$$\lambda_{i \max}^{(0)} = \sqrt{\lambda_\Sigma}.$$

Подставляем это значение  $\lambda_{i \max}$  в уравнения (5.13), (5.14) и решаем их с помощью метода последовательных приближений так же, как при расчете размеров ромбических калибров, описанном в предыдущей главе. После того как вычисления закончены, значения  $\operatorname{tg} \beta_i$  и  $\psi_i$  подставляем в (5.12) и получаем новое значение  $\lambda_{i \max}$ . Сравниваем между собой вычисленное ( $\lambda_{i \max}^{(1)}$ ) и принятое ( $\lambda_{i \max}^{(0)}$ ) значения максимальной вытяжки и, если их разность будет превышать принятую погрешность вычислений, решение продолжаем при следующем значении  $\lambda_{i \max} = \lambda_{i \max}^{(1)}$ . Причем, если окажется, что  $\lambda_{i \max}^{(1)} > \lambda_{i \max}^{(0)}$ , вычисления повторяем при  $\lambda_{i \max}^{(1)} < \lambda_{i \max}^{(0)}$  и наоборот, если  $\lambda_{i \max}^{(1)} < \lambda_{i \max}^{(0)}$ , принимаем  $\lambda_{i \max}^{(1)} > \lambda_{i \max}^{(0)}$ . Расчет продолжается до тех пор, пока разность между заданным и вычисленным значениями максимальной вытяжки не будет превышать принятой погрешности.

Величину максимальной (при данном значении  $\lambda_\Sigma$ ) вытяжки в ромбическом калибре можно также определить из следующего выражения, полученного с помощью численного анализа уравнений (5.12) – (5.14), в широком диапазоне значений входящих параметров

$$(\lambda_\Sigma = 1,4 \div 2,0, \frac{D_{i+1}}{h_{\kappa i+1}} = 5 \div 20, A = 3,5 \div 5,5):$$

$$\lambda_{i \max} = \left[1 + \frac{A}{100} \cdot \frac{D_{i+1}}{h_{\kappa i+1}} (\sqrt{\lambda_\Sigma} - 1)^3\right] \sqrt{\lambda_\Sigma}. \quad (5.15)$$

При расчете максимальной вытяжки с помощью уравнений (5.12) – (5.14) выражение (5.15) можно использовать для определения начального значения величины  $\lambda_{i \max}$ .

Очевидно, что максимальной вытяжке в ромбическом калибре

соответствует наибольшая при данном значении  $\lambda_\Sigma$  величина угла  $\beta_i$ . По мере уменьшения угла  $\beta_i$  вытяжка в ромбическом калибре при  $\lambda_\Sigma = \text{const}$  будет уменьшаться и достигнет минимально возможного значения при угле  $\beta_i$ , равном некоторому предельному значению  $\beta_{i \min}$ , величина которого определяется из условия устойчивости полосы при прокатке.

Уравнения (4.37), (4.38) при  $\lambda_i = \lambda_{i \min}$ ,  $\lambda_{i+1} = \frac{\lambda_\Sigma}{\lambda_{i \min}}$  и  $\beta_i = \beta_{i \min}$  примут следующий вид:

$$\lambda_{i \min} = \frac{1}{1 - \frac{1 - c_{yi}}{1 - \operatorname{tg} \beta_{i \min}} \left(1 - \frac{\psi_i}{\sqrt{\lambda_\Sigma}}\right)^2}; \quad (5.16)$$

$$\psi_i = 1 - 0,26 \sqrt{\frac{1}{A} \left(4 + \frac{D_{i+1}}{h_{\kappa i+1}}\right) \left(\frac{\lambda_\Sigma}{\lambda_{i \min}} - 1\right) (1 - \operatorname{tg} \beta_{i \min})}. \quad (5.17)$$

В системе ромб – квадрат устойчивость квадрата при прокатке в ромбическом калибре, как и ромба в последующем квадрате, зависит от разности углов ромбического и квадратного калибра. Чем меньше разность углов, тем больше устойчивость полосы в калибре. Обычно условием, обеспечивающим устойчивость полосы при прокатке в калибрах системы ромб – квадрат принято считать выполнение следующего неравенства:

$$90^\circ - 2\beta_i \leq 30^\circ.$$

Отсюда необходимо, чтобы  $\beta_i \geq 30^\circ$  или  $2\gamma_i \leq 120^\circ$ .

Конечно, эти величины углов ромба в качестве критерия устойчивости полосы являются приблизительными и служат лишь ориентиром при распределении вытяжек и расчетах ромбических калибров. Так, например, из практики известно, что наличие проводок позволяет применять ромбические калибры с углом при вершине равным  $130^\circ$  и более.

Выбор минимальной величины угла  $\beta_i$  зависит от размеров поперечного сечения прокатываемой полосы. Так, при прокатке крупных сечений, когда "сворачивание" полосы в калибре может привести к серьезной аварии на стане и значительным потерям производства за счет вынужденного простоя, угол  $\beta_i$  в ромбическом калибре целесообразно принимать не менее  $30^\circ$ . При прокатке более мелких сечений, где вопрос установки на стане соответствующей проводковой арматуры решается более просто, ромбические калибры могут иметь более острые углы ( $\beta_i < 30^\circ$ ). Это позволит увеличить вытяжные возможности системы ромб – квадрат, которые снижаются с уменьшением сечения проката.

Если в качестве предельного минимального угла  $\beta_i$  принять  $\beta_{i \min} =$

$= 30^\circ$ , получим следующие уравнения для определения минимальной при данном значении  $\lambda_\Sigma$  вытяжки в ромбическом калибре:

$$\lambda_{i \min} = \frac{1}{1 - 2,37 (1 - c_{yi}) (1 - \frac{\psi_i}{\sqrt{\lambda_\Sigma}})^2}, \quad (5.18)$$

$$\psi_i = 1 - 0,34 \sqrt{\frac{1}{A} (1 + \frac{D_{i+1}}{4 h_{ki+1}}) (\frac{\lambda_\Sigma}{\lambda_{i \min}} - 1)}. \quad (5.19)$$

Коэффициент уширения в ромбическом калибре при  $\beta_i = 30^\circ$  будет равен

$$c_{yi} = \frac{1}{1 + \frac{3A}{4 + \frac{D_{i+1}}{h_{ki+1}}} \sqrt{\frac{1}{\lambda_\Sigma}} [1 + 6,7 A (\frac{\sqrt{\lambda_\Sigma}}{\psi_i} - 1)^3]}. \quad (5.20)$$

Уравнения (5.18) – (5.20) решаются с помощью метода последовательных приближений. В качестве начального значения искомой величины  $\lambda_{i \min}$  можно принять

$$\lambda_{i \min}^{(0)} = \sqrt{\lambda_\Sigma}.$$

Затем из уравнения (5.19) при  $\lambda_{i \min} = \lambda_{i \min}^{(0)}$  находим коэффициент  $\psi_i = \psi_i^{(0)}$ , а из (5.20) при  $\psi_i = \psi_i^{(0)}$  коэффициент уширения  $c_{yi}$ . После этого из уравнения (5.18) определяем новое значение минимальной вытяжки  $\lambda_{i \min}$ . Если разность  $\lambda_{i \min}$  и  $\lambda_{i \min}^{(0)}$  окажется больше принятой погрешности, вычисления повторяем в той же последовательности, задавая в качестве следующего приближения

$$\lambda_{i \min}^{(1)} = \lambda_{i \min} = \sqrt{\lambda_{i \min} \lambda_{i \min}^{(0)}}.$$

Вычисления продолжаем до тех пор, пока разница между принятым и вычисленным значением  $\lambda_{i \min}$  будет меньше или равна заданной погрешности.

Расчет минимальной величины вытяжки в ромбическом калибре можно существенно упростить, если для определения начального значения  $\lambda_{i \min}$  пользоваться следующим выражением, полученным с помощью численного анализа уравнений (5.16), (5.17):

$$\lambda_{i \min} = 1 + 16,5 \frac{1 + 6 \tan \beta_{i \min}}{A + 20} \sqrt[3]{\frac{D_{i+1}}{h_{ki+1}}} \frac{(\sqrt{\lambda_\Sigma} - 1)^2}{\lambda_\Sigma}. \quad (5.21)$$

В частности, при  $\beta_{i \min} = 30^\circ$

$$\lambda_{i \min} = 1 + \frac{73,7}{A + 20} \sqrt[3]{\frac{D_{i+1}}{h_{ki+1}}} \frac{(\sqrt{\lambda_\Sigma} - 1)^2}{\lambda_\Sigma}. \quad (5.22)$$

Точность выражений (5.21), (5.22) позволяет использовать их не только для определения начальных значений  $\lambda_{i \min}$ , но и в качестве самостоятельных формул.

При распределении частной суммарной вытяжки между ромбическим и последующим квадратным калибрами необходимо, чтобы величина  $\lambda_i$  обязательно находилась в интервале от  $\lambda_{i \min}$  до  $\lambda_{i \max}$ . При этом чем ближе величина  $\lambda_i$  к максимальному значению, тем больше степень заполнения ромбического калибра металлом (при  $\lambda_i = \lambda_{i \max}$  имеем полное заполнение) и угол  $\beta_i$ , тем, следовательно, выше будет устойчивость полосы как в ромбическом, так и в квадратном калибре и, кроме того, в этом случае максимально используются вытяжные возможности системы ромб – квадрат. Учитывая, однако, что при  $\lambda_i = \lambda_{i \max}$  существует опасность переполнения ромбического калибра металлом, вытяжку в нем принимают несколько меньше максимальной. Обычно значения вытяжки в ромбическом и последующем квадратном калибре выбираются одинаковыми  $\lambda_i = \lambda_{i+1} = \sqrt{\lambda_\Sigma}$ . Степень заполнения ромбического калибра металлом (рис. 83) зависит от соотношения вытяжек в калибрах данной пары – чем больше отношение  $\lambda_i / \lambda_{i+1}$ , тем больше степень заполнения. Данное обстоятельство указывает, в частности, на то, что при выбранном соотношении вытяжек в калибрах нельзя произвольно задаваться степенью заполнения ромбического калибра. Это относится не только к системе ромб – квадрат, но и ко всем другим системам вытяжных калибров.

При данном соотношении вытяжек, например в случае их равенства (рис. 84), степень заполнения ромбического калибра будет тем

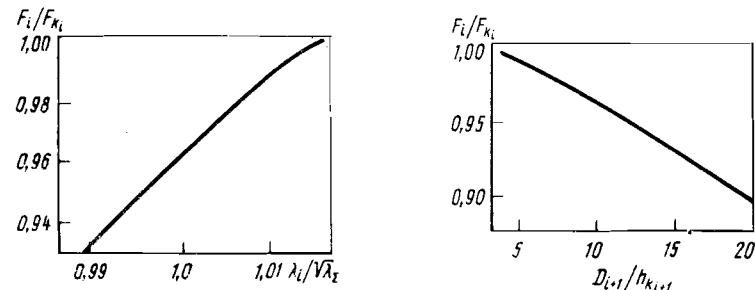


Рис. 83. Зависимость степени заполнения ромбического калибра металлом от соотношения вытяжек в ромбическом и последующем квадратном калибре ( $D_{i+1}/h_{ki+1} = 10$ ,  $A = 4,5$ )

Рис. 84. Зависимость степени заполнения ромбического калибра металлом при  $\lambda_i = \lambda_{i+1}$  от размеров квадратных калибров ( $A = 4,5$ ,  $\lambda_\Sigma = 1,69$ )

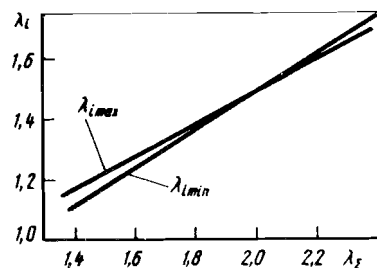


Рис. 85. Предельные значения вытяжки в ромбическом калибре при  $\beta_{i \min} = 25^\circ$  ( $D_{i+1}/h_{ki+1} = 10$ ,  $A = 4,5$ )

меньше, чем больше отношение  $\frac{D_{i+1}}{h_{ki+1}}$ .

На рис. 85 представлены вычисленные с помощью уравнений (5.12) – (5.14) и (5.16), (5.17) значения предельных вытяжек в ромбическом калибре при различных величинах  $\lambda_\Sigma$ . Из графиков видно, что разница значений максимальной и минимальной вытяжек с увеличением частной суммарной вытяжки уменьшается и при некотором значении  $\lambda_\Sigma$  эти кривые пересекаются. Очевидно, что точка пересечения кривых  $\lambda_{i \max}$  и  $\lambda_{i \min}$  будет отвечать случаю полного заполнения металлом ромбического калибра с углом  $\lambda_i$  равным  $\beta_{i \min}$ , а соответствующее ей значение  $\lambda_\Sigma$  будет максимально допустимой с точки зрения устойчивости полосы величиной частной суммарной вытяжки для данной пары калибров.

При распределении по клетям стана общей вытяжки необходимо, чтобы в каждой паре калибров значение частной суммарной вытяжки удовлетворяло неравенству  $\lambda_\Sigma \leq \lambda_{\Sigma \max}$ .

Очевидно, что если в какой-либо паре калибров принятая величина  $\lambda_\Sigma$  окажется больше, чем  $\lambda_{\Sigma \max}$ , вычисленная из уравнений (5.23) – (5.25), то в данном ромбическом калибре расчетное значение угла  $\beta_i$  будет меньше  $\beta_{i \min}$ .

Из уравнения (5.12) при  $\beta_i = \beta_{i \min}$  имеем

$$\lambda_\Sigma = \lambda_{\Sigma \max} = \frac{1}{\operatorname{tg} \beta_{i \min}} \lambda_{i \max} \psi_i^2.$$

Выражая отсюда значение  $\lambda_{i \max}$  и подставляя его в (5.13), (5.14), после преобразований получим следующие уравнения для определения максимальной величины частной суммарной вытяжки в системе калибров ромб – квадрат при прокатке с полным заполнением металлом ромбических калибров ( $\lambda_i = \lambda_{i \max}$ ).

$$\lambda_{\Sigma \max} = \frac{\psi_i^2 \operatorname{ctg} \beta_{i \min}}{1 - (1 - c_{yi})(1 - \psi_i)/\sqrt{\lambda_{\Sigma \max}}^2 / (1 - \operatorname{tg} \beta_{i \min})}. \quad (5.23)$$

$$\psi_i = 1 - 0,26 \sqrt{\frac{1}{A} \left(4 + \frac{D_{i+1}}{h_{ki+1}}\right)} (\psi_i^2 \operatorname{ctg} \beta_{i \min} - 1) (1 - \operatorname{tg} \beta_{i \min}). \quad (5.24)$$

Коэффициент уширения  $c_{yi}$  определяется выражением (4.39), в котором  $\lambda_\Sigma = \lambda_{\Sigma \max}$  и  $\beta_i = \beta_{i \min}$ .

Уравнения (5.23), (5.24) решаются с помощью метода последовательных приближений.

Сначала из уравнения (5.24) при заданных значениях угла  $\beta_{i \min}$ , коэффициента  $A$  и отношения  $D_{i+1}/h_{ki+1}$  также методом последовательных приближений находим величину коэффициента  $\psi_i$ . Затем, задаваясь начальным значением максимальной частной суммарной вытяжки  $\lambda_{\Sigma \max}^{(0)}$  и используя полученное значение коэффициента  $\psi_i$ , определяем из (4.39) величину коэффициента уширения  $c_{yi}$ . Подставляем найденные значения  $\psi_i$  и  $c_{yi}$ , а также  $\lambda_{\Sigma \max}^{(0)}$  в правую часть уравнения (5.23), находим новое значение  $\lambda_{\Sigma \max}^{(1)}$ . Далее при  $\lambda_{\Sigma \max} = \lambda_{\Sigma \max}^{(1)}$  из (4.39) находим новое значение коэффициента  $c_{yi}$ , а из уравнения (5.23) – следующее значение максимальной частной суммарной вытяжки и т.д. Вычисления продолжаем до тех пор, пока разность значений  $\lambda_{\Sigma \max}$  при двух последовательных приближениях будет меньше или равна заданной погрешности.

Поскольку значение максимальной вытяжки в ромбическом калибре близко к средней ( $\sqrt{\lambda_\Sigma}$ ) величину максимальной частной суммарной вытяжки при  $\lambda_i = \lambda_{i+1} = \sqrt{\lambda_\Sigma}$  также можно определять из уравнений (5.23), (5.24).

Чтобы упростить вычисления, расчет величины максимальной частной суммарной вытяжки при  $\lambda_i \cong \lambda_{i+1}$  можно проводить также с помощью следующего приближенного выражения, полученного путем численного анализа уравнений (5.23), (5.24):

$$\lambda_{\Sigma \max} = 1 + \frac{0,07(1,3 + A)^2}{\left(\frac{8}{3}A + \frac{D_{i+1}}{h_{ki+1}}\right) \operatorname{tg}^3 \beta_{i \min}}. \quad (5.25)$$

Проверка показала, что в исследованном диапазоне входящих параметров ( $\beta_{i \min} = 25 \div 30^\circ$ ,  $D_{i+1}/h_{ki+1} = 5 \div 20$ ,  $A = 3,5 \div 5,5$ ) разница в величинах  $\lambda_{\Sigma \max}$ , найденных с помощью исходных уравнений и выражения (5.25), не превышает нескольких процентов.

В частности, для случая прокатки углеродистой стали при  $1100 - 1200^\circ\text{C}$  ( $A = 4,5$ ) величину максимальной частной суммарной вытяжки можно определить из следующих выражений:

$$\text{при } \beta_{i \min} = 30^\circ$$

$$\lambda_{\Sigma \max} = 1 + \frac{12,2}{12 + D_{i+1}/h_{\kappa i+1}};$$

при  $\beta_{i \min} = 25^\circ$

$$\lambda_{\Sigma \max} = 1 + \frac{23,2}{12 + D_{i+1}/h_{\kappa i+1}}.$$

Значения максимальной частной суммарной вытяжки, найденные из уравнений (5.23), (5.24), представлены на рис. 86. Из графика видно, что величина  $\lambda_{\Sigma \max}$  уменьшается с увеличением угла  $\beta_{i \min}$  и отношения  $D_{i+1}/h_{\kappa i+1}$ . Таким образом, чем больше допустимый угол  $\beta_{i \min}$  и меньше сторона прокатываемого квадрата, тем меньшая величина частной суммарной вытяжки может быть принята для данной пары калибров.

Величину максимальной частной суммарной вытяжки из условий захвата полосы валками в ромбическом и квадратном калибрах можно определить следующим образом:

максимальное обжатие в  $i$ -том ромбическом калибре равно

$$\Delta h_i = h_{\kappa i-1} - h_{\kappa i} = h_{\kappa i+1} (\sqrt{\lambda_{\Sigma}} - \psi_i).$$

Принимая идеальные диаметры валков в ромбическом и последующем квадратном калибре одинаковыми

$$D_i = D_{i+1} + h_{\kappa i+1} (1 - \psi_i),$$

а

$$\Delta h_i = D_i (1 - \cos \alpha_i),$$

получим

$$\lambda_{\Sigma} = \left[ 1 + \frac{D_{i+1}}{h_{\kappa i+1}} (1 - \cos \alpha_i) - (1 - \psi_i) \cos \alpha_i \right]^2.$$

Принимая в качестве максимального угла захвата угол  $\alpha_{i \max} = 25^\circ$ , получим выражение для максимальной частной суммарной вытяжки из условий захвата в ромбическом калибре

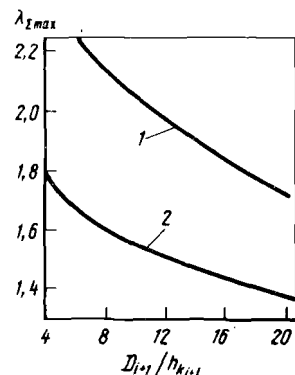


Рис. 86. Максимальные значения частной суммарной вытяжки в системе калибров ромб — квадрат ( $A = 4,5$ ):

1 —  $\beta_{i \min} = 25^\circ$ ; 2 —  $\beta_{i \min} = 30^\circ$

$$\lambda_{\Sigma \max} = \left[ 1 + 0,09 \frac{D_{i+1}}{h_{\kappa i+1}} - 0,91 (1 - \psi_i) \right]^2. \quad (5.26)$$

Для определения  $\lambda_{\Sigma \max}$  уравнение (5.26) необходимо решать совместно с уравнениями (4.37) — (4.39) при  $\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\Sigma \max}$  и принятом соотношении вытяжек в ромбическом и последующем квадратном калибрах. Решение можно найти с помощью метода последовательных приближений.

Если пренебречь уширением (в этом случае  $\psi_i = 1,0$ ), то величина максимальной частной суммарной вытяжки как для ромбических, так и для квадратных калибров при  $\alpha_{i \max} = \alpha_{(i+1) \max} = 25^\circ$  будет определяться выражением:

$$\lambda_{\Sigma \max} = \left( 1 + 0,09 \frac{D_{i+1}}{h_{\kappa (i+1)}} \right)^2.$$

Это выражение можно использовать для нахождения начального значения  $\lambda_{\Sigma \max}$  при решении указанных уравнений.

Определение углов захвата в квадратных калибрах с учетом уширения встречает трудности, связанные с тем, что в ромбических калибрах в случае их неполного заполнения металлом, найти ширину полосы и, следовательно, величину обжатия в последующем квадратном калибре можно только приблизительно, как, например, это было сделано при выводе уравнения (4.131). Для анализа предельных значений вытяжек это уравнение может оказаться слишком неточным.

Поэтому, принимая во внимание, что при равных вытяжках углы захвата в ромбическом и последующем квадратном калибрах примерно одинаковы, в также то, что в системах ромб — квадрат обычно  $\lambda_i \geq \lambda_{i+1}$ , максимальные значения частных суммарных вытяжек допустимо определять из условий захвата полосы только в ромбических калибрах, т.е. путем совместного решения уравнений (5.26), (4.37) — (4.39).

Ввиду того что решение системы из четырех уравнений представляет довольно трудоемкую задачу, величину максимальной из условий захвата частной суммарной вытяжки в системе калибров ромб — квадрат можно также найти, используя следующее выражение, полученное числовым анализом исходных уравнений при  $\lambda_i \cong \lambda_{i+1}$ .

$$\lambda_{\Sigma \max} = 1 + \frac{16 + A}{2800} \left( 5 + \frac{D_{i+1}}{h_{\kappa i+1}} \right)^2. \quad (5.27)$$

### 3. СИСТЕМА ОВАЛ — КВАДРАТ

Вытяжка в овальных калибрах в пределах принятой величины частной суммарной вытяжки достигнет максимальной величины при

полном заполнении калибра металлом, т.е. при  $F_i = F_{\kappa i}$ . В этом случае  $\lambda_i = \lambda_{i \max} = F_{i-1} / F_{\kappa i}$ .

Подставляя сюда из (4.48) значение площади овального калибра  $F_{\kappa i}$  и выражая площадь входящего в овальный калибр квадрата как

$$F_{i-1} = \lambda_{\Sigma} \cdot 0,5 h_{\kappa i+1}^2,$$

получим уравнение для максимальной вытяжки в овальном калибре

$$\lambda_{i \max} = \lambda_{\Sigma} / \psi_i^2 [a_i^2 \arcsin \frac{\sqrt{2a_i - 1}}{a_i} - (a_i - 1)\sqrt{2a_i - 1}]. \quad (5.28)$$

Для определения максимальной вытяжки уравнение (5.28) необходимо решать совместно с уравнениями (4.62), (4.63), которые при  $\lambda_i = \lambda_{i \max}$  и  $\lambda_{i+1} = \lambda_{\Sigma} / \lambda_{i \max}$  будут иметь следующий вид

$$a_i = 0,2 + \lambda_{\Sigma} / 12 \psi_i^2 \left[ 1 - \frac{\sqrt{\lambda_{\Sigma}}}{\psi_i \sqrt{2}} \cdot \frac{1 - c_{yi} \lambda_{i \max}}{\lambda_{i \max} (1 - c_{yi})} \right]; \quad (5.29)$$

$$\psi_i = 1 - \frac{1}{2} \sqrt{a_i} \left[ \sqrt{1 + \frac{1}{a_i} \cdot \frac{8}{15A} \left( 4 + \frac{D_{i+1}}{h_{\kappa i+1}} \right)} \times \right. \\ \left. \times \left( \frac{\lambda_{\Sigma}}{\lambda_{i \max}} - 1 \right) - 1 \right]. \quad (5.30)$$

Коэффициент уширения в овальном калибре  $c_{yi}$  определяется уравнением (4.60). Решение уравнений (5.28) — (5.30) находим с помощью метода последовательных приближений. В качестве начального приближения для  $\lambda_{i \max}$  можно принять  $\lambda_{i \max}^{(0)} = \sqrt{\lambda_{\Sigma}}$ .

Дальнейшие вычисления коэффициентов  $a_i$  и  $\psi_i$  при данном значении  $\lambda_{\Sigma}$  и  $\lambda_{i \max} = \lambda_{i \max}^{(0)}$  производим с помощью уравнений (5.29), (5.30), решая их в той же последовательности, как и при расчете размеров овальных калибров системы овал — квадрат, описанном в предыдущей главе.

После того, как величины коэффициентов  $a_i$ ,  $\psi_i$  найдены, подставляем их в уравнение (5.28) и определяем соответствующую им величину максимальной вытяжки. Сравниваем между собой принятое  $(\lambda_{i \max}^{(0)})$  и вычисленное  $(\lambda_{i \max p}^{(0)})$  значения максимальной вытяжки и, если разность  $\lambda_{i \max p}^{(0)} - \lambda_{i \max}^{(0)}$  будет больше заданной погрешности, вычисления повторяем при новом значении  $\lambda_{i \max}$ . При этом для обеспечения сходимости вычислений значения максимальной вытяжки при следующем приближении  $(\lambda_{i \max}^{(1)})$  следует выбирать в соответствии со следующим правилом: если вычисленное значение максимальной вытяжки  $(\lambda_{i \max p}^{(0)})$  окажется меньше, чем принятое при начальном приближении  $(\lambda_{i \max}^{(0)})$ , необходимо принимать  $\lambda_{i \max}^{(1)} > \lambda_{i \max}^{(0)}$  и, наоборот, при  $\lambda_{i \max p}^{(0)} > \lambda_{i \max}^{(0)}$  необходимо, что-

бы  $\lambda_{i \max}^{(1)} < \lambda_{i \max}^{(0)}$ . Вычисления продолжаем до тех пор, пока разность между принятым и полученным в данном приближении значением максимальной вытяжки будет меньше заданной погрешности.

Очевидно, что при полном заполнении овального калибра металлом коэффициент овальности имеет минимально возможную при данных условиях величину ( $a_i = a_{i \min}$ ), так как дальнейшее его уменьшение приведет к переполнению калибра. По мере увеличения коэффициента  $a_i$  вытяжка в овальном калибре (при той же частной суммарной вытяжке) будет уменьшаться и при  $a_i = \infty$  (прокатка квадрата в гладких валках) достигнет минимального значения.

При  $a_i = \infty$  смещенная площадь металла равна  $\Delta F_i = F_{i-1} - h_i h_{i-1}$ .

Подставив значение  $\Delta F_i$  в (4.4), получим уравнение для минимальной вытяжки в овальном калибре

$$\lambda_{i \min} = \frac{1}{c_{yi} + \frac{\psi \sqrt{2}}{\sqrt{\lambda_{\Sigma}}} (1 - c_{yi})}. \quad (5.31)$$

Выражение (3.2), определяющее величину коэффициента уширения  $c_{yi}$  при прокатке квадрата в гладких валках в форме более удобной для вычислений  $\lambda_{i \min}$  будет иметь вид:

$$c_{yi} = \frac{1}{1 + A (2 - \psi_i \sqrt{\frac{2}{\lambda_{\Sigma}}}) / (4 + \frac{D_{i+1}}{h_{\kappa i+1}} \sqrt{\frac{2}{\lambda_{\Sigma}}}) \psi_i \sqrt{\frac{2}{\lambda_{\Sigma}}} (1 - \psi_i \sqrt{\frac{2}{\lambda_{\Sigma}}})}. \quad (5.32)$$

При  $a_i = \infty$  выражение (4.57) примет вид:

$$\Delta F_{\kappa i+1} = 0,5 h_{\kappa i}^2 \frac{(1 - \psi_i)^2}{\psi_i^2}.$$

Подставляя это значение  $\Delta F_{\kappa i+1}$  в (4.7), получим с учетом (3.15) уравнение для коэффициента  $\psi_i$

$$\psi_i = 1 - 0,26 \sqrt{\frac{1}{A} \left( 4 + \frac{D_{i+1}}{h_{\kappa i+1}} \right) \left( \frac{\lambda_{\Sigma}}{\lambda_{i \min}} - 1 \right)}. \quad (5.33)$$

Величина минимальной вытяжки определяется совместным решением уравнений (5.31) — (5.33). Решение можно найти с помощью метода последовательных приближений. Как и при расчете максимальной вытяжки, в качестве начального приближения для  $\lambda_{i \min}$  можно принять  $\lambda_{i \min}^{(0)} = \sqrt{\lambda_{\Sigma}}$ .

Подставив значение  $\lambda_{i \min}^{(0)}$  в правую часть уравнения (5.33), определим величину коэффициента  $\psi_i$ , а затем из (5.31) получим новое

значение минимальной вытяжки ( $\lambda_{i \min p}$ ). После этого сравниваем между собой принятое и вычисленное значения минимальной вытяжки и, если разность  $\lambda_{i \min p} - \lambda_{i \min}^{(0)}$  будет больше принятой погрешности, расчет повторяем при новом значении минимальной вытяжки  $\lambda_{i \min}$ , равном  $\sqrt{\lambda_{i \min}^{(0)} \lambda_{i \min p}}$ . Вычисления продолжаем до тех пор, пока разность значений минимальной вытяжки в соседних приближениях будет меньше принятой погрешности.

Таким образом, определив из (4.60), (5.28) — (5.30) величину максимальной, а из (5.31) — (5.33) — минимальной вытяжки, найдем тот диапазон вытяжек в овальном калибре, в пределах которого при данном значении частной суммарной вытяжки обеспечивается получение квадратного профиля в последующем квадратном калибре.

Числовой анализ уравнений (5.28) — (5.30) и (5.31) — (5.33) показал, что в широком диапазоне входящих в уравнение параметров ( $\lambda_{\Sigma} = 1,5 \div 2,7$ ,  $A = 3,5 \div 5,5$ ,  $D_{i+1}/h_{ki+1} = 5 \div 20$ ) предельные значения вытяжки в овальном калибре определяются в основном величиной частной суммарной вытяжки и отношения  $D_{i+1}/h_{ki+1}$  и мало зависят от величины коэффициента  $A$ .

В результате анализа исходных уравнений получены следующие выражения для определения максимальной и минимальной вытяжки в овальном калибре

$$\lambda_{i \max} = \left[ 1 + \frac{(\sqrt{\lambda_{\Sigma}} - 1)^3}{18} \left( 7 + \frac{D_{i+1}}{h_{ki+1}} \right) \right] \sqrt{\lambda_{\Sigma}}; \quad (5.34)$$

$$\lambda_{i \min} = \left( 1 - \frac{8,5}{60 + \frac{D_{i+1}}{h_{ki+1}}} \right) \sqrt{\lambda_{\Sigma}}. \quad (5.35)$$

Отсюда предельные соотношения вытяжек в овальном и последующем квадратном калибрах будут равны:

$$\left( \frac{\lambda_i}{\lambda_{i+1}} \right)_{\max} = \left[ 1 + \frac{1}{18} (\sqrt{\lambda_{\Sigma}} - 1)^3 \left( 7 + \frac{D_{i+1}}{h_{ki+1}} \right) \right]^2,$$

$$\left( \frac{\lambda_i}{\lambda_{i+1}} \right)_{\min} = \left( 1 - \frac{8,5}{60 + \frac{D_{i+1}}{h_{ki+1}}} \right)^2.$$

На практике при распределении вытяжки между овальным и квадратным калибрами обычно принимается  $\lambda_i > \lambda_{i+1}$ .

На рис. 87 даны результаты расчета максимальных и минимальных значений вытяжек в овальном калибре. Как видим, диапазон допустимых значений вытяжек в овальном калибре увеличивается с ростом частной суммарной вытяжки.

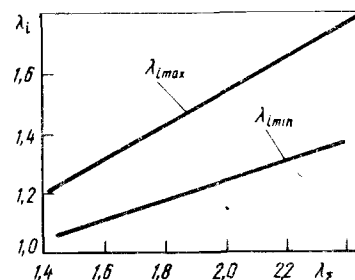


Рис. 87. Предельные значения вытяжки в овальном калибре системы овал — квадрат ( $D_{i+1}/h_{ki+1} = 10$ ,  $A = 4,5$ )

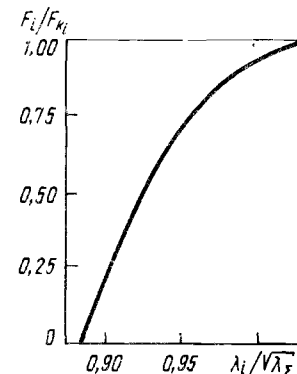


Рис. 88. Степень заполнения овального калибра металлом в зависимости от соотношения вытяжек в овальном и последующем квадратном калибре ( $D_{i+1}/h_{ki+1} = 10$ ,  $A = 4,5$ )

Из рис. 88 видно, что степень заполнения овального калибра металлом определяется соотношением вытяжек в овальном и последующем квадратном калибре; при этом чем больше отношение  $\lambda_i/\lambda_{i+1}$ , тем больше степень заполнения овального калибра.

При выборе величины частных суммарных вытяжек необходимо принимать во внимание устойчивость овальной полосы при прокатке в последующем квадратном калибре, которая при прочих равных условиях зависит от соотношения высоты и ширины овального сечения. В качестве условия устойчивости обычно принимается следующее соотношение между высотой и шириной овального профиля:

$$b_i/h_i \leq 2,0. \quad (5.36)$$

Предельное соотношение размеров ( $b_i/h_i = 2,0$ ) определяет максимальную, с точки зрения устойчивости овального профиля, величину частной суммарной вытяжки.

Можно предположить, что в зависимости от соотношения вытяжек в овальном и последующем квадратном калибре для достижения овальной полосой предельного соотношения размеров потребуется различная величина частной суммарной вытяжки. Для того чтобы определить, при каких условиях допустимая частная суммарная вытяжка будет иметь максимальную величину, рассмотрим два крайних варианта распределения частной суммарной вытяжки между овальным и квадратным калибром:

при  $\lambda_i = \lambda_{i \max}$ , т.е. при полном заполнении металлом овально-



го калибра; в этом случае при данном значении  $\lambda_{\Sigma}$  вытяжка в овальном калибре достигнет максимальной величины, в то время как в последующем квадратном калибре она будет минимальной;

при  $\lambda_i = \lambda_{i \min}$ , т.е. при минимальной вытяжке в овальном калибре и максимальной — в последующем квадрате.

Очевидно, что при полном заполнении ширина полосы будет равна ширине овального калибра (для простоты величиной зазора между валками можно пренебречь)  $b_i = b_{\kappa i} = h_{\kappa i} \sqrt{2a_i - 1}$ .

Подставляя в (5.36) это значение  $b_{\kappa i}$ , получим значение коэффициента  $a_i = 2,5$ , при котором соотношение размеров овального профиля достигает предельного значения ( $b_i/h_i = 2,0$ ).

Площадь овального калибра при  $a_i = 2,5$  найдем из выражения (4.48)

$$F_{\kappa i} = 1,4 h_{\kappa i}^2.$$

Вытяжка в овальном калибре при  $F_i = F_{\kappa i}$  и  $a_i = 2,5$

$$\lambda_i = \lambda_{i \max} = \frac{F_{i-1}}{F_{\kappa i}} = \frac{\lambda_{\Sigma \max 1}}{2,8 \psi_i^2}.$$

При  $a_i = 2,5$ ,  $\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\Sigma \max 1}$  и  $\lambda_i = \lambda_{i \max} = \frac{\lambda_{\Sigma \max 1}}{2,8 \psi_i^2}$  уравнения (4.62), (4.63) после преобразований примут следующий вид:

$$\lambda_{\Sigma \max 1} = \frac{2,8 \psi_i^2}{c_{yi} + \frac{\psi_i \sqrt{2}}{\sqrt{\lambda_{\Sigma \max 1}}} (1 - c_{yi}) (1 - \frac{\lambda_{\Sigma \max 1}}{27,6 \psi_i^2})}, \quad (5.37)$$

$$\psi_i = 1 - 0,791 \sqrt{\sqrt{1 + \frac{0,213}{A} (4 + \frac{D_{i+1}}{h_{\kappa i+1}})} (2,8 \psi_i^2 - 1) - 1}. \quad (5.38)$$

Коэффициент уширения в овальном калибре  $c_{yi}$  найдем из выражения (4.60) либо (4.61), при  $a_i = 2,5$  и  $\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\Sigma \max 1}$ .

Величина  $\lambda_{\Sigma \max 1}$  определяется совместным решением уравнений (5.37), (5.38) методом последовательных приближений.

Для этого из уравнения (5.38) при данных значениях коэффициента  $A$  и отношения  $D_{i+1}/h_{\kappa i+1}$ , также с помощью метода итераций, определяем сначала величину коэффициента  $\psi_i$ . Затем, задаваясь начальным значением  $\lambda_{\Sigma \max 1}$ , при найденном значении  $\psi_i$  и  $\lambda_{\Sigma \max 1} = \lambda_{\Sigma \max 1}^{(0)}$ ,  $a_i = 2,5$  определяем из (4.60) величину коэффициента уширения  $c_{yi} (c_{yi}^{(0)})$ . Далее, подставляя значения  $\psi_i$ ,  $\lambda_{\Sigma \max 1} = \lambda_{\Sigma \max 1}^{(0)}$  и  $c_{yi} = c_{yi}^{(0)}$  в правую часть уравнения (5.37), находим новое значение максимальной частной суммарной вытяжки  $\lambda_{\Sigma \max 1}^{(1)}$ . После этого при  $\lambda_{\Sigma \max 1} = \lambda_{\Sigma \max 1}^{(1)}$  и най-

денном ранее значении коэффициента  $\psi_i$  находим новое значение  $c_{yi} (c_{yi}^{(1)})$ , а затем из (5.37) при  $c_{yi} = c_{yi}^{(1)}$  и  $\lambda_{\Sigma \max 1} = \lambda_{\Sigma \max 1}^{(1)}$  следующее значение  $\lambda_{\Sigma \max 1}$ . Вычисления продолжаем до тех пор, пока разность значений  $\lambda_{\Sigma \max 1}$  при данном и предыдущем приближениях будет меньше или равна заданной погрешности.

Для определения величины максимальной частной суммарной вытяжки для другого крайнего случая распределения ее между овальным и последующим квадратным калибром, т.е. при  $\lambda_i = \lambda_{i \min}$ ,  $a_i = \infty$  принимаем поперечную деформацию при прокатке квадрата в гладких валках равномерной по высоте сечения. В этом случае ширину прямоугольной полосы на выходе из валков  $i$ -той клетки можно принять равной

$$b_i = F_i/h_i.$$

Подставив это значение  $b_i$  в (5.36), получим

$$\frac{b_i}{h_i} = \frac{F_i}{h_i^2} = \frac{F_{i+1} \lambda_{\Sigma \max 2}}{\lambda_{i \min} h_{\kappa(i+1)}^2 \psi_i^2} = \frac{\lambda_{\Sigma \max 2}}{2 \psi_i^2 \lambda_{i \min}}.$$

Отсюда величина вытяжки в  $i$ -той клетки при  $b_i/h_i = 2$  и  $a_i = \infty$  будет равна:

$$\lambda_{i \min} = \frac{\lambda_{\Sigma \max 2}}{4 \psi_i^2}.$$

Подставив это значение  $\lambda_{i \min}$  в (5.31) и (5.33), получим при  $\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\Sigma \max 2}$  следующие уравнения для определения максимальной частной суммарной вытяжки в случае, если  $\lambda_i = \lambda_{i \min}$ :

$$\lambda_{\Sigma \max 2} = \frac{4 \psi_i^2}{c_{yi} + (1 - c_{yi}) \psi_i \sqrt{2} / \sqrt{\lambda_{\Sigma \max 2}}}, \quad (5.39)$$

$$\psi_i = 1 - 0,26 \sqrt{\frac{1}{A} (4 + \frac{D_{i+1}}{h_{\kappa i+1}})} (4 \psi_i^2 - 1). \quad (5.40)$$

Значение коэффициента уширения  $c_{yi}$  найдем из выражения (5.32) либо (3.5).

Величину  $\lambda_{\Sigma \max 2}$  найдем путем совместного решения уравнений (5.39), (5.40). Решение выполняем с помощью метода последовательных приближений. Сначала из (5.40) находим величину коэффициента  $\psi_i$ , а затем из (5.39) также методом итераций — значение  $\lambda_{\Sigma \max 2}$ .

Как видно из рис. 89, на котором представлены значения  $\lambda_{\Sigma \max 1}$ ,  $\lambda_{\Sigma \max 2}$ , подсчитанные из уравнений (5.37), (5.38) и (5.39), (5.40) при различных значениях отношения  $D_{i+1}/h_{\kappa i+1}$ , допустимая величина частной суммарной вытяжки при  $\lambda_i = \lambda_{i \max}$  всегда больше,

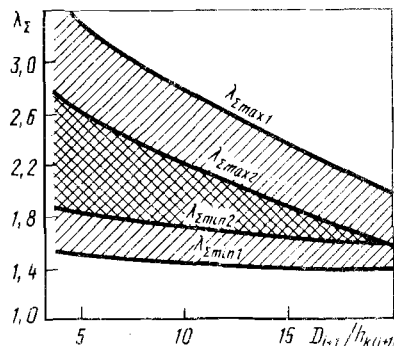


Рис. 89. Предельные значения частной суммарной вытяжки в системе овал — квадрат ( $A = 4,5$ )

чем при  $\lambda_i = \lambda_{i \min}$ . Таким образом, с точки зрения максимального использования вытяжных возможностей системы овал — квадрат целесообразно иметь соотношение вытяжек  $\lambda_i / \lambda_{i+1} > 1$ . Величина максимально допустимой частной суммарной вытяжки уменьшается с увеличением отношения  $D_{i+1} / h_{\kappa i+1}$  и уменьшением коэффициента  $A$ .

Величина частной суммарной вытяжки в системе овал — квадрат имеет не только верхний, но и нижний предел. Причем в отличие от таких систем калибров, как овал — круг или стрельчатый треугольник — круг, где минимальная величина  $\lambda_\Sigma$  определяется возможностями проводковой арматуры обеспечивать устойчивое положение овальной или треугольной полосы в круглых калибрах, в системе овал — квадрат нижний предел частной суммарной вытяжки, наряду с этим фактором, определяется необходимостью заполнения углов при вершинах квадратного калибра. Это условие требует, чтобы ширина полосы после овального калибра была больше или, по крайней мере, равна высоте последующего квадратного калибра, т.е.

$$b_i \geq h_{\kappa i+1}.$$

Чтобы выявить влияние соотношения вытяжек в овальном и квадратном калибрах на допустимую минимальную величину частной суммарной вытяжки, рассмотрим, как и при определении  $\lambda_{\Sigma \max}$ , два крайних случая:

1. При максимальном соотношении  $\lambda_i / \lambda_{i+1}$ , т.е. при полном заполнении овального калибра металлом ( $F_i = F_{\kappa i}$ ,  $\lambda_i = \lambda_{i \max}$ ).
2. При минимальном соотношении  $\lambda_i / \lambda_{i+1}$ , т.е. при  $\lambda_i = \lambda_{i \min}$ ,  $a_i = \infty$ , что соответствует случаю прокатки квадрата в гладких валках. Если пренебречь зазорами между валками, то при  $F_i = F_{\kappa i}$  имеем

$$b_i = b_{\kappa i} = h_{\kappa i} \sqrt{2 a_i - 1} \geq h_{\kappa i+1}.$$

Отсюда, поскольку  $h_{\kappa i} = \psi_i h_{\kappa i+1}$  минимальное значение коэффициента овальности, при котором достигается заполнение углов

при вершинах  $(i+1)$ -го квадратного калибра, будет равно  $a_i = \frac{1}{2} [1 + (1/\psi_i^2)]$ .

В случае полного заполнения металлом  $i$ -того овального калибра вытяжка в нем будет максимальной при данном значении  $\lambda_\Sigma$  и равной

$$\lambda_i = \lambda_{i \max} = \frac{F_{i-1}}{F_{\kappa i}} = \frac{h_{\kappa i+1}^2}{2 F_{\kappa i}} \lambda_{\Sigma \min}.$$

где  $F_{\kappa i}$  — площадь овального калибра.

Отсюда

$$\lambda_{\Sigma \min 1} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\lambda_{i \max}}{\psi_i^2} [(1 + \psi_i^2)^2 \arcsin \frac{2 \psi_i}{1 + \psi_i^2} - 2 \psi_i (1 - \psi_i^2)]. \quad (5.41)$$

Для нахождения  $\lambda_{\Sigma \min 1}$  уравнение (5.41) следует решать совместно с уравнениями (4.62), (4.63), в которых в этом случае  $a_i = \frac{1}{2} [1 + (1/\psi_i^2)]$ ,  $\lambda_\Sigma = \lambda_{\Sigma \min}$  и  $\lambda_i = \lambda_{i \max}$ . Учитывая, что в данном случае имеются в виду малые значения деформации, целесообразно выражение для коэффициента уширения использовать в виде (4.60). Уравнения решаются с помощью метода последовательных приближений. Порядок вычислений такой же, как и при расчетах  $\lambda_{\Sigma \max 1}$ .

В том случае, когда  $\lambda_i = \lambda_{i \min}$  и, следовательно,  $a_i = \infty$  ширину полосы, принимая уширение квадрата при прокатке в гладких валках равномерным по высоте, можно представить как

$$b_i = \frac{F_i}{h_i} = \frac{\lambda_\Sigma F_{i+1}}{\lambda_{i \min} h_i} = \frac{\lambda_\Sigma}{\lambda_{i \min}} \cdot \frac{h_{\kappa i+1}}{2 \psi_i}.$$

В предельном случае при  $b_i = h_{\kappa i+1}$  (рис. 90) имеем

$$\lambda_\Sigma = \lambda_{\Sigma \min 2}; \lambda_{i \min} = \lambda_{\Sigma \min 2} / 2 \psi_i.$$

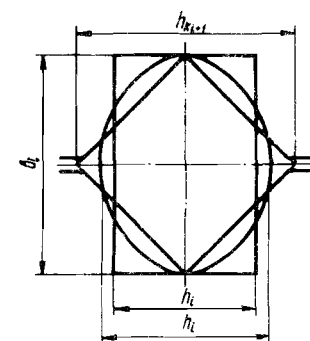


Рис. 90. К расчету минимальной частной суммарной вытяжки в системе калибров овал — квадрат

Подставляя значения  $\lambda_{\Sigma}$  и  $\lambda_{i \min}$  в (5.31) и (5.33), получим следующие уравнения для определения минимально допустимой величины частной суммарной вытяжки при минимальном соотношении вытяжек в овальном и последующем квадратном калибрах ( $\lambda_i = \lambda_{i \min}$ ):

$$\lambda_{\Sigma \min 2} = \frac{2 \psi_i}{c_{\psi i} + (1 - c_{\psi i}) \psi_i \sqrt{2} \sqrt{\lambda_{\Sigma \min 2}}}; \quad (5.42)$$

$$\psi_i = 1 - 0,26 \sqrt{\frac{1}{A} \left(4 + \frac{D_{i+1}}{h_{\kappa i+1}}\right) (2 \psi_i - 1)}. \quad (5.43)$$

Коэффициент уширения  $c_{\psi i}$  находим из выражения (5.32) при  $\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\Sigma \min 2}$ . Уравнения (5.42), (5.43) решаются с помощью метода последовательных приближений, порядок вычисления такой же, как при определении величины  $\lambda_{\Sigma \max 2}$ .

Результаты расчета значений  $\lambda_{\Sigma \min 1}$  и  $\lambda_{\Sigma \min 2}$  (рис. 89) показывают, что максимальному соотношению вытяжек  $\lambda_i / \lambda_{i+1}$ , т.е. полному заполнению металлом овального калибра, соответствует наименьшая величина допустимой частной суммарной вытяжки. Таким образом, с учетом результатов расчета  $\lambda_{\Sigma \max 1}$  и  $\lambda_{\Sigma \max 2}$  (рис. 89) диапазон допустимых значений частной суммарной вытяжки будет наибольшим при прокатке с полным заполнением овального калибра металлом. При уменьшении соотношения  $\lambda_i / \lambda_{i+1}$  диапазон допустимых значений  $\lambda_{\Sigma}$  уменьшается.

Объем вычислений при расчетах значений  $\lambda_{\Sigma \max 1}$ ,  $\lambda_{\Sigma \min 1}$ ,  $\lambda_{\Sigma \max 2}$ ,  $\lambda_{\Sigma \min 2}$  можно существенно сократить, если для определения начальных значений искомых корней использовать следующие выражения, найденные с помощью числового анализа исходных уравнений

$$\lambda_{\Sigma \max} = 1 + \frac{32 (2 + A)^2}{(20 + D_{i+1} / h_{\kappa i+1})^2}; \quad (5.44)$$

$$\lambda_{\Sigma \min} = 1 + \frac{1,5 (7 + A)}{30 + D_{i+1} / h_{\kappa i+1}}. \quad (5.45)$$

Если расчет не требует высокой точности, а соотношение вытяжек в овальном и последующем квадратном калибре находится в интервале  $1 < \lambda_i / \lambda_{i+1} < \lambda_{i \max}^2 / \lambda_{\Sigma}$  выражения (5.44), (5.45) можно использовать для определения допустимого диапазона значений предельных частных суммарных вытяжек в системе овал — квадрат вместо исходных уравнений.

При выборе и распределении по клетям частных суммарных вытяжек необходимо, чтобы их величина была в пределах этого диапазона. Невыполнение этого условия приведет либо к уменьшению ус-

тойчивости овальной полосы в квадратном калибре, если  $\lambda_{\Sigma} > \lambda_{\Sigma \max}$ , либо, если  $\lambda_{\Sigma} < \lambda_{\Sigma \min}$ , может вызвать незаполнение углов в вершинах квадратного калибра.

#### 4. СИСТЕМА ОВАЛ — КРУГ

Для анализа предельных значений вытяжки в калибрах системы овал — круг воспользуемся уравнениями (4.75), (4.76), связывающими размеры калибров с параметрами происходящей в них деформации.

Как и для системы овал — квадрат, вытяжка в овальном калибре при данной величине частной суммарной вытяжки будет максимальной в случае полного заполнения его металлом

$$\lambda_i = \lambda_{i \max} = F_{i-1} / F_{\kappa i}. \quad (5.46)$$

Используя (4.48) и выражая площадь предыдущего круга как  $F_{i-1} = \pi r_{i+1}^2 \lambda_{\Sigma}$ , получим уравнение для максимальной вытяжки в овальном калибре:

$$\lambda_{i \max} = \pi \lambda_{\Sigma} / 2 \psi_i^2 [a_i^2 \arcsin \frac{\sqrt{2a_i - 1}}{b_i} - (a_i - 1) \sqrt{2a_i - 1}]. \quad (5.47)$$

Величину максимальной вытяжки найдем совместным решением уравнения (5.47) и уравнений (4.75), (4.76), где в этом случае  $\lambda_i = \lambda_{i \max}$ ,  $\lambda_{i+1} = \lambda_{\Sigma} / \lambda_{i \max}$ . Уравнения решаются с помощью метода последовательных приближений. В качестве начального приближения для максимальной вытяжки можно принять  $\lambda_{i \max}^{(0)} = \sqrt{\lambda_{\Sigma}}$ .

Начальные значения коэффициентов  $a_i$  и  $\psi_i$  найдем из уравнений (4.78), (4.79) при  $\lambda_i = \lambda_{i+1} = \sqrt{\lambda_{\Sigma}}$ . В дальнейшем последовательность вычислений та же, что и при расчете максимальной вытяжки для системы овал — квадрат.

Очевидно, что полному заполнению овального калибра металлом соответствует наименьшая величина коэффициента овальности. С увеличением коэффициента  $a_i$  вытяжка в овальном калибре при том же значении частной суммарной вытяжки уменьшается и при  $a_i = \infty$  (что соответствует случаю прокатки круга в гладких валках) достигнет минимального значения.

При  $a_i = \infty$ ,  $\lambda_i = \lambda_{i \min}$  и  $\lambda_{i+1} = \lambda_{\Sigma} / \lambda_{i \min}$  уравнения (4.69) и (4.72) примут следующий вид:

$$\begin{aligned} & \arcsin \sqrt{1 - \frac{\psi_i^2}{\lambda_{\Sigma}}} - \frac{\psi_i}{\sqrt{\lambda_{\Sigma}}} \sqrt{1 - \frac{\psi_i^2}{\lambda_{\Sigma}}} = \\ & = \frac{\pi}{2} \frac{\lambda_{i \min} - 1}{\lambda_{i \min} (1 - c_{\psi i})}; \end{aligned} \quad (5.48)$$

$$\begin{aligned} & \arcsin \sqrt{1 - \psi_i^2} - \psi_i \sqrt{1 - \psi_i^2} = \\ & = \frac{\pi}{2} \left( \frac{\lambda_{\Sigma}}{\lambda_{i \min}} - 1 \right) \frac{c_{yi+1}}{1 - c_{yi+1}}. \end{aligned} \quad (5.49)$$

Приведем уравнения к виду, удобному для решения методом последовательных приближений. С этой целью из (5.48) выразим величину минимальной вытяжки  $\lambda_{i \min}$ , а из (5.49) — коэффициента  $\psi_i$ ; после подстановки в (5.49) значения  $c_{yi+1}$  из (3.16) получим:

$$\begin{aligned} \lambda_{i \min} = & 1 / \left[ 1 - \frac{2}{\pi} (1 - c_{yi}) \left( \arcsin \sqrt{1 - \frac{\psi_i^2}{\lambda_{\Sigma}}} - \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{\psi_i}{\sqrt{\lambda_{\Sigma}}} \sqrt{1 - \frac{\psi_i^2}{\lambda_{\Sigma}}} \right) \right], \end{aligned} \quad (5.50)$$

$$\begin{aligned} \psi_i = & \frac{1}{\sqrt{1 - \psi_i^2}} \left[ \arcsin \sqrt{1 - \psi_i^2} - \frac{\pi}{24A} \times \right. \\ & \left. \times \left( \frac{\lambda_{\Sigma}}{\lambda_{i \min}} - 1 \right) \left( 4 + \frac{D_{i+1}}{d_{i+1}} \right) \right]. \end{aligned} \quad (5.51)$$

Коэффициент уширения  $c_{yi}$  для случая прокатки круга в гладких валках определяется выражением:

$$c_{yi} = 1 / \left( 1 + \frac{4}{3} \frac{A}{4 + \frac{D_{i+1}}{d_{i+1}}} \cdot \frac{\sqrt{\lambda_{\Sigma}}}{\psi_i \sqrt{1 - \frac{\psi_i^2}{\lambda_{\Sigma}}}} \right). \quad (5.52)$$

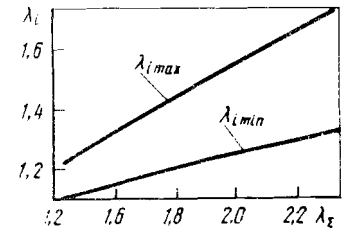
Величину минимальной вытяжки в овальном калибре системы овал — круг находим совместным решением уравнений (5.50) — (5.52), которое выполняем в следующей последовательности.

Принимаем начальное значение минимальной вытяжки  $\lambda_{i \min}^{(0)}$  и при  $\lambda_{i \min} = \lambda_{i \min}^{(0)}$  из (4.78) находим величину коэффициента  $\psi_i$  в начальном приближении. Выражение (4.78) при  $a_i = \infty$  будет иметь вид

$$\psi_i = 1 - 0,383 \sqrt[3]{\frac{1}{A^2} \left( 1 + \frac{D_{i+1}}{4d_{i+1}} \right)^2 \left( \frac{\lambda_{\Sigma}}{\lambda_{i \min}} - 1 \right)^2}.$$

Затем из уравнения (5.51) при  $\lambda_{i \min} = \lambda_{i \min}^{(0)}$  и  $\psi_i = \psi_i^{(0)}$  находим новое значение коэффициента  $\psi_i$  ( $\psi_i^{(1)}$ ) и, если разность  $\psi_i^{(1)} - \psi_i^{(0)}$  окажется больше заданной погрешности, вычисления коэффициента  $\psi_i$  повторяем при  $\lambda_{i \min} = \lambda_{i \min}^{(0)}$ ;  $\psi_i = 1/2 (\psi_i^{(1)} + \psi_i^{(0)})$  и так до тех пор, пока разница значений  $\psi_i$  при соседних приближениях будет меньше или равна заданной погрешности вычислений. После этого при найденном значении коэффициента  $\psi_i$  из (5.52) определяем

Рис. 91. Предельные значения вытяжки в овальном калибре; система овал — круг ( $D_{i+1}/d_{i+1} = 15$ ,  $A = 4,5$ )



величину коэффициента уширения  $c_{yi}$  и, подставляя значения  $\psi_i$ ;  $\lambda_{i \min} = \lambda_{i \min}^{(0)}$  и  $c_{yi} = c_{yi}^{(0)}$  в правую часть уравнения (5.50), находим новое значение минимальной вытяжки  $\lambda_{i \min}^{(1)}$ . Если разность  $\lambda_{i \min}^{(1)} - \lambda_{i \min}^{(0)}$  окажется больше принятой погрешности для  $\lambda_{i \min}$ , вычисления повторяем при новом значении  $\lambda_{i \min}$ , равном  $\lambda_{i \min} = \lambda_{i \min}^{(2)} = 1/2 (\lambda_{i \min}^{(0)} + \lambda_{i \min}^{(1)})$ .

Расчет заканчивается, когда разница значений  $\lambda_{i \min}$ , полученных на данном и предыдущем этапе вычислений, будет меньше или равна заданной погрешности. После определения максимальной (4.75), (4.76) и минимальной (5.5) — (5.52) вытяжки можно найти тот диапазон вытяжек в овальном калибре, в пределах которого при данной частной суммарной вытяжке возможно получение круглого профиля в последующем круглом калибре. От распределения вытяжки между овальным и круглым калибром зависят размеры и степень заполнения овального калибра металлом.

Результаты расчета предельных значений вытяжек в овальном калибре с помощью уравнений (4.75), (4.76), (5.47) и (5.50) — (5.52) представлены на рис. 91.

Учитывая, что определение величины максимальной и минимальной вытяжки связано с выполнением трудоемких вычислений трансцендентных уравнений, сделан их числовой анализ в широком диапазоне входящих в уравнение параметров ( $\lambda_{\Sigma} = 1,4 \div 2,5$ ;  $\lambda_i/\lambda_{i+1} = 0,91 \div 1,10$ ;  $D_{i+1}/d_{i+1} = 5 \div 30$ ;  $A = 3,5 \div 4,5$ ). Анализ показал, что значения максимальной и минимальной вытяжек в основном определяются величиной частной суммарной вытяжки и мало зависят от величины коэффициента  $A$  и отношения  $D_{i+1}/d_{i+1}$ .

В результате анализа получены следующие выражения для определения предельных значений вытяжки в овальном калибре системы овал — круг:

$$\lambda_{i \max} = [1 + 0,1 A (\sqrt{\lambda_{\Sigma}} - 1)^2] \sqrt{\lambda_{\Sigma}}; \quad (5.53)$$

$$\lambda_{i \min} = 3 \sqrt{\lambda_{\Sigma}} / (2 + \sqrt{\lambda_{\Sigma}}). \quad (5.54)$$

Таким образом, соотношение вытяжек в овальном и последующем круглом калибре должны находиться в диапазоне:

$$\frac{9}{(2 + \sqrt{\lambda_{\Sigma}})^2} < \frac{\lambda_i}{\lambda_{i+1}} < [1 + 0,1 A (\sqrt{\lambda_{\Sigma}} - 1)^2]^2.$$

Использование выражений (5.53), (5.54) для определения начальных значений максимальной и минимальной вытяжки при решении уравнений (4.75), (4.76), (5.47) и (5.50) — (5.52) дает возможность значительно упростить расчет  $\lambda_{i \max}$  и  $\lambda_{i \min}$ .

При выборе величины частной суммарной вытяжки для системы овал — круг необходимо принимать во внимание устойчивость овальной полосы при прокатке в последующем круглом калибре. Как и для системы овал — квадрат, в качестве условия устойчивости овальной полосы обычно принимается следующее соотношение ее линейных размеров (для удобства изложения высоту овального калибра выражаем через диаметр вписанной окружности):

$$b_i/d_i \leq 2. \quad (5.55)$$

Для того чтобы установить, при каком соотношении вытяжек в овальном и последующем круглом калибре допустимая величина частной суммарной вытяжки будет наибольшей, рассмотрим, по аналогии с системой овал — квадрат, два крайних случая:

прокатка с максимальной вытяжкой в овальном калибре ( $\lambda_i = \lambda_{i \max}$ ,  $a_i = a_{i \min}$ );

прокатка с минимальной вытяжкой в овальном калибре ( $\lambda_i = \lambda_{i \min}$ ,  $a_i = \infty$ ).

Вытяжка в овальном калибре будет максимальной при полном заполнении его металлом. В этом случае ширина полосы будет равна ширине калибра  $b_i = b_{ki} = d_i \sqrt{2a_i - 1}$ .

Отсюда при  $b_i/d_i = 2$  имеем  $a_i = 2,5$ .

Из уравнения (5.47) при  $a_i = 2,5$  и  $\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\Sigma \max 1}$  получим

$$\lambda_{\Sigma \max 1} = 1,78 \lambda_{i \max} \psi_i^2. \quad (5.56)$$

Величина максимальной частной суммарной вытяжки  $\lambda_{\Sigma \max 1}$  находится совместным решением уравнения (5.56) и уравнений (4.75), (4.76), где в этом случае принимается:  $a_i = 2,5$ ;  $\lambda_i = \lambda_{i \max}$ ;  $\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\Sigma \max 1}$ .

Уравнения решаются с помощью метода последовательных приближений в следующей последовательности.

Задаемся начальным значением величины  $\lambda_{\Sigma \max 1} (\lambda_{\Sigma \max 1}^{(0)})$  и  $\lambda_{i \max} (\lambda_{i \max}^{(0)})$ , причем в качестве начального приближения для  $\lambda_{i \max}$  можно принять:

$$\lambda_{i \max}^{(0)} = [1 + 0,1 A (\sqrt{\lambda_{\Sigma \max 1}^{(0)}} - 1)^2] \sqrt{\lambda_{\Sigma \max 1}^{(0)}}.$$

Затем при  $\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\Sigma \max 1}^{(0)}$ ,  $\lambda_{i+1} = \sqrt{\lambda_{\Sigma \max 1}^{(0)}}$  и  $a_i = 2,5$  из уравнения

(4.78) найдем значение коэффициента  $\psi_i$  в начальном приближении

$$\psi_i^{(0)} = 1 - 0,32 \sqrt[3]{\frac{1}{A^2} (\sqrt{\lambda_{\Sigma \max 1}^{(0)}} - 1)^2 (1 + \frac{D_{i+1}}{4d_{i+1}})^2},$$

а из (4.74) начальное значение коэффициента уширения  $c_{yi}$ . В дальнейшем последовательность вычислений аналогична принятой при расчете  $\lambda_{\Sigma \max 1}$  для системы овал — квадрат. Другим предельным случаем является прокатка с минимальной вытяжкой в овальном калибре, что достигается при  $a_i = \infty$ . При этом вытяжка в последующем круглом калибре для данного значения  $\lambda_{\Sigma}$  будет наибольшей.

Ширину полосы после прокатки круга в гладких валках представим как

$$b_i = b_{i \text{ ср}} = F_i / d_i.$$

В этом случае

$$\frac{b_i}{d_i} = \frac{F_i}{d_i^2} = \frac{\pi d_i^2 - 1}{4 \lambda_{i \min} d_{i+1}^2 \psi_i^2} = \frac{\pi \lambda_{\Sigma}}{4 \lambda_{i \min} \psi_i^2}.$$

При предельном соотношении размеров полосы ( $b_i/d_i = 2$ ) будем иметь

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\Sigma \max 2} = \frac{8}{\pi} \lambda_{i \min} \psi_i^2. \quad (5.57)$$

Для определения величины максимальной частной суммарной вытяжки уравнение (5.57) необходимо решать совместно с уравнениями (5.50), (5.51) при  $\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\Sigma \max 2}$ . Уравнения решаются методом последовательных приближений; последовательность вычислений такая же, как при расчете  $\lambda_{\Sigma \max 1}$  для системы овал — квадрат.

Сравнение значений  $\lambda_{\Sigma \max 1}$  и  $\lambda_{\Sigma \max 2}$ , подсчитанных в широком диапазоне значений входящих в расчетные уравнения параметров ( $\lambda_{\Sigma} = 1,2 \div 2,5$ ;  $D_{i+1}/d_{i+1} = 5 \div 30$ ;  $A = 3,5 \div 5,5$ ), показывает (рис. 92), что величина допустимой частной суммарной вытяжки достигает наибольшего значения при максимальной вытяжке в овальном калибре. Другими словами при  $\lambda_i = \lambda_{i \max}$  в максимальной

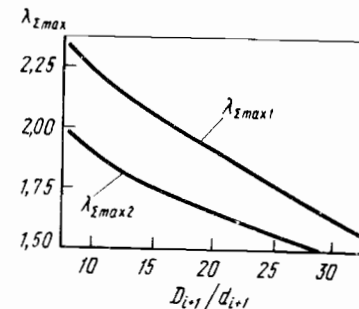


Рис. 92. Максимальные значения частной суммарной вытяжки в системе калибров овал — круг ( $A = 4,5$ )

степени реализуются вытяжные возможности системы овал — круг. Однако следует иметь в виду, что при прокатке с полным или близким к полному заполнением овального калибра происходит интенсивная потеря тепла в углах овального профиля и, как следствие, повышенный износ круглых калибров. Кроме того, такой овал имеет повышенную склонность к сваливанию в круглом калибре, и в этом случае даже незначительное изменение условий прокатки может привести к переполнению калибра и появлению поверхностных дефектов на полосе.

На практике в овале и последующем круге часто принимаются одинаковые вытяжки. В этом случае даже при малых сечениях полосы расчетная степень заполнения овального калибра составляет порядка 90 — 95 %, что предохраняет калибр от случайного переполнения, в то время как вытяжные возможности системы остаются достаточно высокими. Овальный профиль имеет в этом случае более притупленные углы, что положительно сказывается на устойчивости полосы в круглых калибрах и уменьшает их износ. Анализ уравнений (4.75), (4.76) при различных отношениях  $\lambda_i/\lambda_{i+1}$  показывает, что степень заполнения овального калибра металлом при  $\lambda_\Sigma = \text{const}$  возрастает с увеличением вытяжки в овальном калибре.

Величину максимальной частной суммарной вытяжки в системе овал — круг при крайних значениях вытяжки в овальном калибре можно найти из следующих выражений, полученных с помощью числового анализа исходных уравнений:

при  $\lambda_i = \lambda_{i \max}$

$$\lambda_{\Sigma \max 1} = 1 + \frac{0,31(2A + 1)^4}{\left[ \frac{D_{i+1}}{d_{i+1}} + \frac{4}{3}(1 + A)^2 \right]^2}; \quad (5.58)$$

при  $\lambda_i = \lambda_{i \min}$

$$\lambda_{\Sigma \max 2} = 1 + \frac{1,5 + A}{0,3 \left( 12 + \frac{D_{i+1}}{d_{i+1}} \right)}. \quad (5.59)$$

При любом другом распределении вытяжки между овальным и последующим круглым калибром в пределах допустимого диапазона соотношений  $\lambda_i/\lambda_{i+1}$  максимальная величина частной суммарной вытяжки будет находиться в интервале от  $\lambda_{\Sigma \max 1}$  до  $\lambda_{\Sigma \max 2}$ .

Для случая прокатки углеродистой стали при 1100 — 1200°C выражения (5.58), (5.59) будут иметь вид:

при  $\lambda_i = \lambda_{i \max}$

$$\lambda_{\Sigma \max 1} = 1 + \frac{3100}{\left( 40 + \frac{D_{i+1}}{d_{i+1}} \right)^2}; \quad (5.60)$$

при  $\lambda_i = \lambda_{i \min}$

$$\lambda_{\Sigma \max 2} = 1 + \frac{20}{12 + \frac{D_{i+1}}{d_{i+1}}}. \quad (5.61)$$

Если требуется иметь более точные значения максимальных частных суммарных вытяжек, выражения (5.58), (5.59) можно использовать при решении исходных уравнений для определения начальных величин  $\lambda_{\Sigma \max 1}$  и  $\lambda_{\Sigma \max 2}$ .

## 5. СИСТЕМА СТРЕЛЬЧАТЫЙ ТРЕУГОЛЬНИК — КРУГ

Расчет предельных значений вытяжек для системы трехвалковых калибров стрелчатый треугольник — круг, как и рассмотренных ранее систем двухвалковых калибров основывается на использовании уравнений, устанавливающих связь между размерами калибров и параметрами деформации (4.93), (4.94). Так же, как для ромбических и овальных калибров, максимальная вытяжка в стрелчатом треугольном калибре при данной величине частной суммарной вытяжки будет соответствовать случаю полного заполнения калибра металлом, т.е. при  $F_i = F_{\kappa i}$

$$\lambda_i = \lambda_{i \max} = \frac{F_{i-1}}{F_{\kappa i}}.$$

Используя для  $F_{\kappa i}$  выражение (4.88) и выражая  $F_{i-1}$  как  $F_{i-1} = \lambda_\Sigma \frac{\pi}{4} d_{i+1}^2$  получим уравнение для максимальной вытяжки в стрелчатом треугольном калибре

$$\lambda_{i \max} = \frac{F_{i-1}}{F_{\kappa i}} = \frac{\lambda_\Sigma}{\psi_i^2 \left( 1 + \frac{2}{\pi} \cdot \frac{a_{i+1}}{a_{i-1}} \right)}. \quad (5.62)$$

Для определения величины  $\lambda_{i \max}$  это уравнение необходимо решить совместно с уравнениями (4.93), (4.94) при  $\lambda_i = \lambda_{i \max}$ . Коэффициент уширения  $c_{yi}$  в стрелчатом треугольном калибре найдем из выражения (4.92).

Решение может быть выполнено с помощью метода последовательных приближений в том же порядке, как при вычислении  $\lambda_{i \max}$  для системы овал — квадрат.

Как и для овальных калибров, коэффициент овальности  $a_i$  при полном заполнении стрелчатого треугольника достигнет минималь-

ного для данной величины  $\lambda_{\Sigma}$  значения, так как при меньшем  $a_i$  произойдет переполнение калибра металлом. При постоянном значении частной суммарной вытяжки увеличение коэффициента  $a_i$  приведет к уменьшению вытяжки в стрелчатом треугольном калибре и при  $a_i = \infty$ , что соответствует случаю прокатки круга в треугольном калибре, вытяжка становится минимальной. При  $a_i = \infty$ ,  $\lambda_i = \lambda_{i \min}$ ,  $\lambda_{i+1} = \lambda_{\Sigma} / \lambda_{i \min}$  уравнения (4.90), (4.91) будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} & \arcsin \sqrt{1 - \frac{\psi_i^2}{\lambda_{\Sigma}}} - \frac{\psi_i}{\sqrt{\lambda_{\Sigma}}} \sqrt{1 - \frac{\psi_i^2}{\lambda_{\Sigma}}} = \\ & = \frac{\pi}{3} \frac{\lambda_{i \min} - 1}{\lambda_{i \min} (1 - c_{yi})}, \end{aligned} \quad (5.63)$$

$$\begin{aligned} & \arcsin \sqrt{1 - \psi_i^2} - \psi_i \sqrt{1 - \psi_i^2} = \\ & = \frac{\pi}{3} \frac{c_{yi+1}}{1 - c_{yi+1}} \left( \frac{\lambda_{\Sigma}}{\lambda_{i \min}} - 1 \right). \end{aligned} \quad (5.64)$$

Выражая из (5.63) значение  $\lambda_{i \min}$ , а из (5.64) коэффициента  $\psi_i$ , с учетом (3.19) получим систему двух уравнений для определения минимальной вытяжки в треугольном калибре:

$$\begin{aligned} \lambda_{i \min} = 1 / [1 - \frac{3}{\pi} (1 - c_{yi}) (\arcsin \sqrt{1 - \frac{\psi_i^2}{\lambda_{\Sigma}}} - \\ - \frac{\psi_i}{\sqrt{\lambda_{\Sigma}}} \sqrt{1 - \frac{\psi_i^2}{\lambda_{\Sigma}}})]; \end{aligned} \quad (5.65)$$

$$\begin{aligned} \psi_i = \frac{1}{\sqrt{1 - \psi_i^2}} [\arcsin \sqrt{1 - \psi_i^2} - \\ - \frac{\pi}{18A} (1 + \frac{D_{i+1}}{4d_{i+1}}) (\frac{\lambda_{\Sigma}}{\lambda_{i \min}} - 1)]. \end{aligned} \quad (5.66)$$

Коэффициент уширения  $c_{yi}$  при прокатке круга в плоском треугольном калибре ( $a_i = \infty$ ) найдем из выражения (3.17).

Уравнения (5.65), (5.66) решаются с помощью метода последовательных приближений. Принимаем некоторое значение  $\lambda_{i \min}$  в качестве начального приближения и при  $\lambda_i = \lambda_{i \min} = \lambda_{i \min}^{(0)}$  и  $a_i = \infty$  из (4.96) находим начальное значение коэффициента  $\psi_i$ . В дальнейшем последовательность вычислений такая же, как при расчете минимальной вытяжки в овальном калибре в системе овал — круг.

Числовой анализ уравнений (4.93), (4.94), (5.62) и (5.65), (5.66) в широком диапазоне значений входящих параметров ( $\lambda_{\Sigma} = 1,3 \div 2,0$ ;

$A = 3,5 \div 5,5$ ;  $D_{i+1}/d_{i+1} = 5 \div 30$ ) позволил получить приближенные выражения, которые дадут возможность существенно упростить расчет максимальной и минимальной вытяжки в стрелчатом треугольном калибре

$$\lambda_{i \max} = [1 + \frac{5(A+5)(\sqrt{\lambda_{\Sigma}} - 1)^2}{\lambda_{\Sigma}^2 (25 + \frac{D_{i+1}}{d_{i+1}})}] \sqrt{\lambda_{\Sigma}}; \quad (5.67)$$

$$\lambda_{i \min} = 0,965 \sqrt{\lambda_{\Sigma}}. \quad (5.68)$$

Таким образом, при распределении  $\lambda_{\Sigma}$  между калибрами данной пары соотношение вытяжек в стрелчатом треугольном и последующем круглом калибре должно находиться в интервале

$$0,93 \leq \frac{\lambda_i}{\lambda_{i+1}} \leq [1 + \frac{5(A+5)(\sqrt{\lambda_{\Sigma}} - 1)^2}{\lambda_{\Sigma}^2 (25 + \frac{D_{i+1}}{d_{i+1}})}]^2.$$

При расчете предельных вытяжек с помощью исходных уравнений выражения (5.67), (5.68) можно использовать для определения начальных значений вытяжек ( $\lambda_{i \max}^{(0)}$ ,  $\lambda_{i \min}^{(0)}$ ). Это значительно уменьшает объем вычислений.

На рис. 93 представлены значения максимальной и минимальной вытяжки в стрелчатом треугольном калибре, подсчитанные из уравнений (4.93), (4.94), (5.62) и (5.65), (5.66) при различном значении частной суммарной вытяжки. С увеличением  $\lambda_{\Sigma}$  кривые  $\lambda_{i \max}$  и  $\lambda_{i \min}$  сближаются и точка пересечения кривых будет соответствовать предельному максимальному значению частной суммарной вытяжки в системе стрелчатый треугольник — круг при данных значениях коэффициента  $A$  и отношения  $D_{i+1}/d_{i+1}$ .

Таким образом, частная суммарная вытяжка достигает максимальной величины при  $a_i = \infty$  и полном заполнении металлом треугольного калибра.

Вытяжка в треугольном калибре в этом случае будет равна:

$$\lambda_i = \lambda_{i \max} = \frac{F_{i-1}}{F_{\kappa i}} = \frac{\lambda_{\Sigma \max} \pi d_{i+1}^2}{3 \sqrt{3} d_i^2} = 0,605 \frac{\lambda_{\Sigma \max}}{\psi_i^2}.$$

Используя это значение  $\lambda_{i \max}$ , из (5.65) при  $\lambda_{i \min} = \lambda_{i \max}$ ,  $\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\Sigma \max}$  и  $a_i = \infty$  получим следующее уравнение для максимальной частной суммарной вытяжки:

$$\lambda_{\Sigma \max} = \frac{1,654 \psi_i^2}{1 - \frac{3}{\pi} (1 - c_{yi}) (\arcsin \sqrt{1 - \frac{\psi_i^2}{\lambda_{\Sigma \max}}} - \frac{\psi_i}{\sqrt{\lambda_{\Sigma \max}}}) - \dots}$$

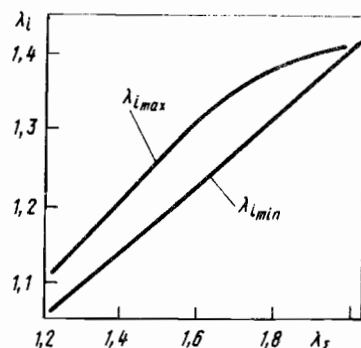


Рис. 93. Предельные значения вытяжки в стрельчатом треугольном калибре, система стрельчатый треугольник — круг ( $D_{i+1}/d_{i+1} = 15, A = 4,5$ )

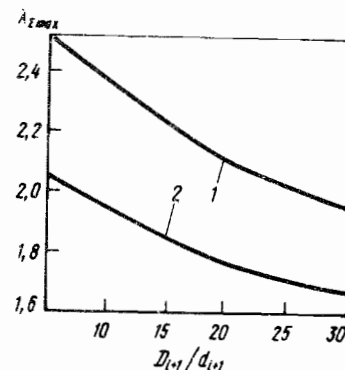


Рис. 94. Максимальные значения частной суммарной вытяжки в системе калибров стрельчатый треугольник — круг ( $A = 4,5$ ):  
1 — при  $a_i = \infty$ ; 2 — при  $a_i = 5,0$

$$\dots - \frac{\psi_i}{\sqrt{\lambda_{\Sigma \max}}} \sqrt{1 - \frac{\psi_i^2}{\lambda_{\Sigma \max}}} \quad (5.69)$$

Для определения  $\lambda_{\Sigma \max}$  уравнение (5.69) должно решаться совместно с (3.17) и (5.66), в которых  $\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\Sigma \max}$ . Уравнения решаются с помощью метода последовательных приближений, порядок вычислений такой же, как при расчете  $\lambda_{\Sigma \max}$  для системы овал — круг и овал — квадрат. Начальное значение коэффициента  $\psi_i$  можно определить из выражения (4.96), которое при  $\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\Sigma \max}$ ,  $a_i = \infty$  и  $\lambda_i = \lambda_{i \max}$  будет иметь вид:

$$\psi_i = 1 - 0,035 \sqrt[3]{\frac{1}{A^2} \left(4 + \frac{D_{i+1}}{d_{i+1}}\right)^2 (1,654 \psi_i^2 - 1)^2}.$$

Значения максимальной частной суммарной вытяжки при  $a_i = \infty$  в зависимости от величины отношения  $D_{i+1}/d_{i+1}$  и коэффициента  $A$  (рис. 94) показывает, что теоретически вытяжные возможности системы стрельчатый треугольник — круг достаточно высоки, даже по сравнению с системами двухвалковых калибров, особенно при прокатке мелких сечений. В действительности же реально достижимые значения вытяжек в трехвалковых калибрах значительно ниже, так как прокатка с полным заполнением плоского ( $a_i = \infty$ ) треугольного калибра металлом обладает рядом недостатков, главными из которых являются:

плохая устойчивость треугольного профиля с острыми углами при прокатке в круглом калибре;

трудности получения правильного круглого профиля, так как даже при нормальном заполнении металлом круглого калибра на поверхности полосы имеются три продольных плоских участка, соответствующие местам разъемов валков;

сильное остывание металла в углах треугольного профиля и, как следствие, плохой захват полосы в круглых калибрах, повышенный износ валков.

Опыт работы литейно-прокатных агрегатов с непрерывными трехвалковыми станами (блоками) показывает, что избежать указанных недостатков можно, если вытяжка в треугольном и последующем круглом калибре примерно одинакова, а треугольные калибры имеют достаточную стрельчатость. В частности, опыт работы ЛПА с трехвалковыми блоками показывает, что катанку достаточно круглой формы (без продольных фасок) можно получить при  $a_i = 5$ .

Если в качестве максимального с точки зрения качества геометрии круга значения коэффициента овальности принять  $a_i = 5$ , то величину частной суммарной вытяжки, соответствующую этому значению коэффициента  $a_i$  при  $\lambda_i = \lambda_{i \max}$ , можно условно считать максимально допустимой для системы калибров стрельчатый треугольник — круг.

Величину максимальной вытяжки в стрельчатом треугольном калибре найдем из (5.62). При  $a_i = 5$  и  $\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\Sigma \max}$  имеем

$$\lambda_{i \max} = \frac{\lambda_{\Sigma \max}}{1,424 \psi_i^2}. \quad (5.70)$$

Для определения величины максимальной частной суммарной вытяжки уравнение (5.70) решаем совместно с (4.93) и (4.94) при  $a_i = 5$ ,  $\lambda_i = \lambda_{i \max}$  и  $\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\Sigma \max}$ .

Выражение для коэффициента уширения в стрельчатом треугольном калибре при  $a_i = 5$ ,  $\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\Sigma \max}$  будет иметь следующий вид:

$$c_{yi} = 1 / \left\{ 1 + \frac{25A}{4 + D_{i+1}/d_{i+1} \sqrt{\lambda_{\Sigma \max}}} [1 + 0,8A \left( \frac{\sqrt{\lambda_{\Sigma \max}}}{\psi_i} - 1 \right)^2] \right\}. \quad (5.71)$$

Уравнения (4.93), (4.94), (5.70), (5.71) решаются методом последовательных приближений, порядок вычислений такой же, как при определении  $\lambda_{\Sigma \max}$  при  $\lambda_i = \lambda_{i \max}$  системы овал — круг.

Допустимое значение максимальной частной суммарной вытяжки можно найти также из следующего выражения, полученного путем числового анализа уравнений (4.93), (4.94), (5.70), (5.71).



$$\lambda_{\Sigma \max} = 1 + 5 \frac{4 + A}{35 + (D_{i+1}/d_{i+1})} \quad (5.72)$$

Проверка показала, что разница значений  $\lambda_{\Sigma \max}$ , подсчитанных с помощью исходных уравнений и выражения (5.72) в диапазоне значений  $D_{i+1}/d_{i+1} = 5 \div 30$ ,  $A = 3,5 \div 5,5$ ,  $\lambda_{\Sigma} = 1,2 \div 1,9$  составляют несколько процентов. В случае, если требуется более высокая точность, выражение (5.72) можно использовать при решении уравнений (4.93), (4.94), (5.70), (5.71) для вычисления начального значения  $\lambda_{\Sigma \max}$ .

Из рис. 94 видно, что реальные вытяжные возможности системы стрельчатый треугольник — круг значительно меньше теоретически допускаемых.

## 6. СИСТЕМА ТРЕУГОЛЬНИК — ТРЕУГОЛЬНИК

При выборе и распределении вытяжки в системе треугольных трехвалковых калибров следует иметь в виду следующее неперенное условие: обжатия в клетях должны быть такими, чтобы металл не заполнял углы калибров. Таким образом, поперечное сечение полосы, прокатываемой в треугольных калибрах, должно быть не треугольным, а шестиугольным. В противном случае невозможно будет предотвратить сворачивание полосы и особенно ее заднего конца в последующем калибре, что приведет к переполнению калибра, появлению на полосе "усов" и застреванию полосы в стансе. Очевидно, что требование обязательной незаполненности треугольных калибров в значительной степени уменьшает вытяжные возможности системы треугольник — треугольник.

Экспериментальные исследования прокатки в треугольных калибрах, проведенные ВНИИметмаш на ряде литейно-прокатных агрегатов алюминиевой и медной катанки, позволили установить, что устойчивость полосы в калибре зависит от соотношения сторон шестиугольника, образующего поперечное сечение полосы. Оказалось, что устойчивое положение полосы в калибре, в том числе и ее заднего конца, можно обеспечить в том случае, если в каждом калибре отношение наибольшей стороны шестиугольника к наименьшей (рис. 79) будет соответствовать неравенству:

$$BC/AB < 2,0.$$

Если принять в качестве предельного отношение  $BC/AB = 2,0$ , то вытяжку, обеспечивающую получение в треугольном калибре шестиугольного профиля с таким соотношением сторон, с точки зрения устойчивости полосы можно считать максимально возможной.

Таким образом, при  $\lambda_i = \lambda_{i \max}$  (см. рис. 79) имеем

$$AB = \frac{1}{4} A_1 C_1 = \frac{\sqrt{3}}{4} d_i,$$

где  $d_i$  — диаметр  $i$ -того треугольного калибра.

Площадь металла в  $i$ -том калибре, принимая уширение симметричным и равномерным по высоте сечения, будет равна:

$$F_i = \frac{3}{4} \sqrt{3} [d_i^2 - (AB)^2] = 1,055 d_i^2.$$

Для системы однородных калибров, в том числе для рассматриваемой системы треугольник — треугольник, можно принять  $d_{i-1}/d_i = \sqrt{\lambda_i}$ .

При предельном соотношении сторон шестиугольного сечения полосы в треугольном калибре

$$\frac{d_{i-1}}{d_i} = \sqrt{\lambda_{i \max}} \quad (5.73)$$

Подставляя найденное значение  $F_i$  в (4.3) и выражая разность  $F_{\kappa i} - \Delta F_{\kappa i}$  как

$$F_{\kappa i} - \Delta F_{\kappa i} = \frac{\sqrt{3}}{4} d_i^2 [3 - (2 - \frac{d_{i-1}}{d_i})^2],$$

получим с учетом (5.73) следующее уравнение для определения максимальной вытяжки в калибрах системы треугольник — треугольник

$$\lambda_{i \max} = (2 - \sqrt{3} - 2,44 \frac{1 - c_{yi} \lambda_{i \max}}{1 - c_{yi}})^2 \quad (5.74)$$

При  $\lambda_i \approx \lambda_{i+1}$  выражение для коэффициента уширения в треугольном калибре будет иметь вид:

$$c_{yi} = \frac{1}{1 + \frac{25A}{4 + D_i/d_i \lambda_{i \max}}} \quad (5.75)$$

Величина  $\lambda_{i \max}$  определяется совместным решением уравнений (5.74), (5.75) с помощью метода последовательных приближений. Вычисления проводим в следующем порядке. Принимаем в качестве начального некоторое значение  $\lambda_{i \max}$  и при заданных величинах  $D_i/d_i$  и коэффициента  $A$  находим из (5.75) величину коэффициента уширения  $c_{yi}$ , а затем, подставляя в правую часть уравнения (5.74) значение  $c_{yi}$  и  $\lambda_{i \max} = \lambda_{i \max}^{(0)}$ , находим новое значение максимальной вытяжки  $\lambda_{i \max}^{(1)}$ . В той же последовательности повторяем вычисления при  $\lambda_{i \max} = \lambda_{i \max}^{(1)}$  и так далее. Расчет продолжаем до тех пор, пока разница значений  $\lambda_{i \max}$ , найденных при данном и предыдущем приближениях, будет меньше или равна заданной погрешности.

Наряду с уравнениями (5.74), (5.75) величину максимальной вытяжки в калибре системы треугольник — треугольник можно найти

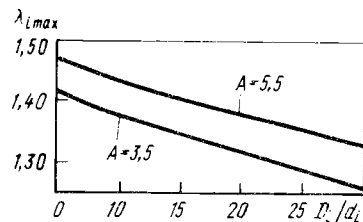


Рис. 95. Максимальные значения вытяжки в калибрах системы треугольник — треугольник

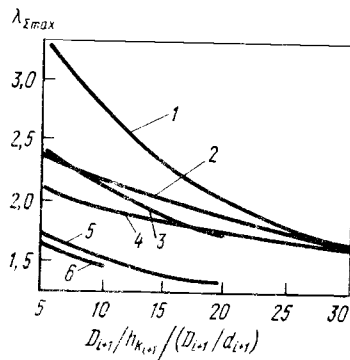


Рис. 96. Расчетные вытяжные возможности различных систем калибров ( $A = 4,5$ ):

1 — система овал — квадрат; 2 — система овал — круг; 3 — система ромб — квадрат при  $\beta_{i \min} = 25^\circ$ ; 4 — система стрелчатый треугольник — круг; 5 — система ромб — квадрат при  $\beta_{i \min} = 30^\circ$ ; 6 — система прямоугольник — квадрат

из следующего выражения, полученного с помощью числового анализа этих уравнений при различных значениях параметров  $A$  и  $D_i/d_i$

$$\lambda_{i \max} = 1 + \frac{0,3 (4 + A)^2}{10A + D_i/d_i} \quad (5.76)$$

Выражение (5.76) можно использовать также для вычисления начального значения  $\lambda_{i \max}$  при решении уравнений (5.74), (5.75).

Сравнение вытяжных возможностей системы треугольник — треугольник и системы стрелчатый треугольник — круг показывает (см. рис. 94, 95), что в этом отношении ни одна из этих двух основных систем трехвалковых калибров не имеет существенного преимущества над другой.

Уравнения для определения максимальных значений частных суммарных вытяжек могут быть использованы для сравнения вытяжных возможностей различных систем калибров. Как видно из рис. 96, где представлены результаты расчета значений  $\lambda_{\Sigma \max}$  в зависимости от величины отношения  $D_{i+1}/d_{i+1} (D_{i+1}/h_{\kappa i+1})$ , вытяжные возможности разных систем калибров различны и возрастают с увеличением поперечного сечения прокатываемой полосы. При этом отличительной чертой систем трехвалковых калибров является меньшая зависимость величины максимально допустимой деформации от сечения прокатываемой полосы. Наибольшие вытяжки в калибрах допускает система овал — квадрат (кривая 1), наименьшие —

система ящичных калибров (кривая 6). Вытяжные возможности системы ромб — квадрат определяются значением угла  $\beta_i$ , принятого в качестве минимального (кривые 3, 5); при  $\beta_{i \min} = 30^\circ$  вытяжные возможности системы ромб — квадрат примерно такие же, как у системы прямоугольник — квадрат. Система овал — круг и ее эквивалент в клетях с трехвалковыми калибрами стрелчатый треугольник — круг (кривые 2, 4) для полос малого и среднего сечения обладают приблизительно одинаковыми вытяжными возможностями. Таким образом, двухвалковые и трехвалковые чистовые проволочные блоки, в которых обычно применяются эти системы калибров, с этой точки зрения примерно равнозначны.

## Глава VI. РАСЧЕТЫ КАЛИБРОВОК ВАЛКОВ И КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОКАТКИ

Рассмотрим несколько примеров расчета калибровок валков и энергосиловых параметров прокатки по изложенным выше методам. Задачу будет ставить в самом общем виде, задаваясь только размерами готового проката и исходной заготовки, скоростью выхода полосы из последней клетки стана, начальной температурой заготовки, а также величиной идеальных диаметров прокатных валков.

### 1. СИСТЕМА ЯЩИЧНЫХ КАЛИБРОВ

*Пример.* Выполнить расчет калибровки валков для прокатки полосы квадратного сечения  $120 \times 120$  мм из заготовки размером  $200 \times 200$  мм, материал — сталь 45, система калибров прямоугольник — квадрат, идеальный диаметр валков во всех клетях 750 мм.

Требуется определить необходимое число пропусков (клетей), площади сечения металла в каждом калибре, размеры калибров.

Расчет выполняем в следующей последовательности.

Определяем общую вытяжку  $\lambda_0 = (200/120)^2 = 2,778$ .

Для определения необходимого числа клетей (пропусков) с помощью выражений (5.10), (5.11) найдем величину максимальных допустимых значений частной суммарной вытяжки в каждой паре калибров — прямоугольник, квадрат. Расчет выполняем против хода прокатки, начиная с последнего квадратного калибра. Величину коэффициента  $A$  для углеродистой стали принимаем равной 4,5.

Максимальная величина частной суммарной вытяжки в последней паре калибров будет равна:

из условия захвата полосы валками

$$\lambda_{\Sigma \max} = 1 + 0,08 \frac{4,5}{7,0} \left( \frac{630}{120} + \frac{5,5}{4,5} \right)^2 = 1,78;$$

из условия устойчивости прямоугольной полосы в последнем  $n$ -м квадратном калибре

$$\lambda_{\Sigma \max} = 1,96 - \frac{0,14 \cdot 14,25}{6} = 1,63.$$

Таким образом, максимальная величина частной суммарной вытяжки в последней паре калибров определяется условием устойчивости, и максимальная площадь сечений предшествующего  $(n-2)$ -го квадрата будет равна:

$$F_{n-2} = 1,63 \cdot 120^2 = 23470 \text{ мм}^2 \text{ (153} \times \text{153 мм),}$$

Аналогично находим значения максимальных частных суммарных вытяжек в предшествующей паре калибров прямоугольник — квадрат: из условия захвата полосы валками

$$\lambda_{\Sigma \max} = 1 + 0,0514 \left( \frac{597}{153} + \frac{5,5}{4,5} \right) = 1,60;$$

из условия устойчивости полосы в  $(n-2)$ -м квадратном калибре

$$\lambda_{\Sigma \max} = 1,96 - 0,14 \frac{12,9}{6} = 1,66.$$

Для данной пары калибров определяющими при выборе величины деформации являются условия захвата; максимальная площадь сечения предшествующего квадрата будет равна  $F_{n-4} = 1,60 \cdot 23470 = 37550 \text{ мм}^2$  ( $\sim 194 \times 194 \text{ мм}$ ).

Таким образом, число пропусков (клетей), необходимое для прокатки сечения  $120 \times 120 \text{ мм}$  из исходного квадрата  $200 \times 200 \text{ мм}$ , должно быть не менее четырех. Учитывая, что при четырех пропусках прокатка будет происходить в предельных условиях, для повышения стабильности процесса прокатки целесообразно увеличить число пропусков до шести. При этом с целью более равномерного распределения нагрузок по пропускам режим обжатий выбираем с небольшим снижением их в первых пропусках. С учетом этого принимаем следующую схему прокатки:  $200 \times 200 \text{ мм} \rightarrow 175 \times 175 \text{ мм} \rightarrow 145 \times 145 \text{ мм} \rightarrow 120 \times 120 \text{ мм}$ .

Площади сечения полосы в квадратных калибрах без учета закруглений будут равны:

$$F_2 = 30625 \text{ мм}^2, F_4 = 21025 \text{ мм}^2, F_6 = 14400 \text{ мм}^2.$$

В соответствии с принятой схемой прокатки находим величину частных суммарных вытяжек в каждой паре калибров:

$$\lambda_{\Sigma 1,2} = 1,306, \lambda_{\Sigma 3,4} = 1,457, \lambda_{\Sigma 5,6} = 1,460.$$

Используя выражение (4.26), распределяем частную суммарную вытяжку между прямоугольным и квадратным калибрами каждой пары:

$$\lambda_1 / \sqrt{\lambda_{\Sigma 1,2}} = 1 + \frac{(\sqrt{1,306} - 1)^2}{15} \sqrt{\frac{575}{175}}, \lambda_1 = 1,146, \lambda_2 = 1,140;$$

$$\lambda_3 / \sqrt{\lambda_{\Sigma 3,4}} = 1 + \frac{(\sqrt{1,457} - 1)^2}{15} \sqrt{\frac{605}{145}}, \lambda_3 = 1,214, \lambda_4 = 1,200;$$

$$\lambda_5 / \sqrt{\lambda_{\Sigma 5,6}} = 1 + \frac{(\sqrt{1,460} - 1)^2}{15} \sqrt{\frac{630}{120}}, \lambda_5 = 1,216, \lambda_6 = 1,200.$$

Площади сечения полосы в прямоугольных калибрах без учета закруглений в углах профиля будут равны:

$$F_1 = 1,140 \cdot 30625 = 34910 \text{ мм}^2, F_3 = 25230 \text{ мм}^2, F_5 = 17280 \text{ мм}^2.$$

Следующим этапом расчета является определение размеров калибров. Высоту квадратного ящичного калибра принимаем равной стороне прокатываемого в нем квадратного сечения, т.е.  $h_{\kappa 6} = h_6 = 120 \text{ мм}$ ;  $h_{\kappa 4} = 145 \text{ мм}$ ;  $h_{\kappa 2} = 175 \text{ мм}$ .

Используя выражение (4.19), найдем величину углов выпуска квадратных калибров

$$\varphi_2 = \arctg \frac{0,140 \sqrt{1,306}}{3 \cdot 4,5} \left( 4 \sqrt{1,306} + \frac{575}{175} \right) = 4,9^\circ;$$

$$\varphi_4 = \arctg \frac{0,20 \sqrt{1,457}}{3 \cdot 4,5} \left( 4 \sqrt{1,457} + \frac{605}{145} \right) = 8,1^\circ;$$

$$\varphi_6 = \arctg \frac{0,20 \sqrt{1,460}}{3 \cdot 4,5} \left( 4 \sqrt{1,460} + \frac{630}{120} \right) = 9,04^\circ.$$

Принимаем  $\varphi_2 = 5^\circ$ ;  $\varphi_4 = 8^\circ$ ;  $\varphi_6 = 9^\circ$ .

Ширину квадратных калибров определяем с помощью выражения (4.20):

$$b_{\kappa 2} = 175 \left( 1 - \frac{0,5 \operatorname{tg} 5^\circ}{1 + \sqrt{\frac{\sqrt{1,306} - 1}{\operatorname{tg} 5^\circ}}} \right) = 172 \text{ мм};$$

$$b_{\kappa 4} = 145 \left( 1 - \frac{0,5 \operatorname{tg} 8^\circ}{1 + \sqrt{\frac{\sqrt{1,457} - 1}{\operatorname{tg} 8^\circ}}} \right) = 140 \text{ мм};$$

$$b_{\kappa 6} = 120 \left( 1 - \frac{0,5 \operatorname{tg} 9^\circ}{1 + \sqrt{\frac{\sqrt{1,460} - 1}{\operatorname{tg} 9^\circ}}} \right) = 116 \text{ мм}.$$

Высоту прямоугольных калибров принимаем равной ширине следующего квадратного калибра:  $h_{\kappa 1} = b_{\kappa 2} = 172 \text{ мм}$ ;  $h_{\kappa 3} = 140 \text{ мм}$ ;  $h_{\kappa 5} = 116 \text{ мм}$ , ширину прямоугольных калибров — равной высоте предыдущего квадратного калибра:  $b_{\kappa 1} = 200 \text{ мм}$ ;  $b_{\kappa 3} = 175 \text{ мм}$ ;  $b_{\kappa 5} = 145 \text{ мм}$ .

Величину углов выпуска прямоугольных калибров найдем, используя выражение (4.24), в соответствии с которым:

$$\varphi_1 = \arctg \frac{1,40 \cdot 0,146}{3 \cdot 4,5 \sqrt{1,306}} - \left( \frac{575}{175} + 4 \sqrt{1,306} \right) = 6,04^\circ;$$

$$\varphi_3 = \arctg \frac{1,200 \cdot 0,214}{3 \cdot 4,5 \sqrt{1,457}} - \left( \frac{605}{145} + 4 \sqrt{1,457} \right) = 8,07^\circ;$$

$$\varphi_5 = \arctg \frac{1,200 \cdot 0,216}{3 \cdot 4,5 \sqrt{1,460}} - \left( \frac{630}{120} + 4 \sqrt{1,460} \right) = 9,1^\circ.$$

Принимаем  $\varphi_1 = 6^\circ$ ;  $\varphi_3 = 8^\circ$ ;  $\varphi_5 = 9^\circ$ .

Заключительным этапом расчета размеров калибров является проверка. Необходимо, чтобы в каждом пропуске площадь сечения полосы была меньше или равна площади калибра.

Площади ящичных калибров определяем с помощью выражения (4.8). Без учета величины зазора между валками и закруглений в углах калибра будем иметь:

$$F_{K1} = 171 \cdot 200 + \frac{171^2}{2} \operatorname{tg} 6^\circ = 35740 > F_1;$$

$$F_{K2} = 175 \cdot 171 + \frac{175^2}{2} \operatorname{tg} 5^\circ = 31260 > F_2;$$

$$F_{K3} = 140 \cdot 175 + \frac{140^2}{2} \operatorname{tg} 8^\circ = 25880 > F_3;$$

$$F_{K4} = 145 \cdot 140 + \frac{145^2}{2} \operatorname{tg} 8^\circ = 21780 > F_4;$$

$$F_{K5} = 115 \cdot 145 + \frac{115^2}{2} \operatorname{tg} 9^\circ = 17720 > F_5;$$

$$F_{K6} = 120 \cdot 115 + \frac{120^2}{2} \operatorname{tg} 9^\circ = 14940 > F_6.$$

Значения радиусов закруглений и зазоров между валками принимаем в соответствии с размерами калибров.

Радиусы закруглений в углах калибров ( $r_{1i} = 0,15 b_{Ki}$ ):

$$r_1 = 0,15 \cdot 200 = 30 \text{ мм}; r_2 = 26 \text{ мм};$$

$$r_3 = 26 \text{ мм}; r_4 = 22 \text{ мм}; r_5 = 22 \text{ мм}; r_6 = 18 \text{ мм}.$$

Радиусы закруглений у реборд валков ( $r_{2i} = 0,5 r_{1i}$ ):

$$r_1 = 0,5 \cdot 30 = 15 \text{ мм}; r_2 = 13 \text{ мм};$$

$$r_3 = 13 \text{ мм}; r_4 = 11 \text{ мм}; r_5 = 11 \text{ мм}; r_6 = 9 \text{ мм}.$$

Зазоры между валками ( $s_i = 0,2 h_{Ki}$ ):

$$s_1 = s_2 = 35 \text{ мм}; s_3 = s_4 = 29 \text{ мм}; s_5 = s_6 = 24 \text{ мм}.$$

Глубина вреза в валки  $h_{pi} = 0,5 (h_{Ki} - s_i)$ :

$$h_{p1} = 0,5 (171 - 35) = 68 \text{ мм}; h_{p2} = 70 \text{ мм};$$

$$h_{p3} = 55,5 \text{ мм}; h_{p4} = 58 \text{ мм}; h_{p5} = 45,5 \text{ мм}; h_{p6} = 48 \text{ мм}.$$

Ширина вреза в валки у реборд ( $b_{pi} = b_{Ki} + 2h_{pi} \operatorname{tg} \varphi_i$ ):

$$b_{p1} = 214 \text{ мм}; b_{p2} = 183 \text{ мм}; b_{p3} = 191 \text{ мм};$$

$$b_{p4} = 156 \text{ мм}; b_{p5} = 159 \text{ мм}; b_{p6} = 130 \text{ мм}.$$

## 2. СИСТЕМА РОМБ – КВАДРАТ

*Пример.* Из исходной заготовки сечением 120 X 120 мм необходимо прокатать способом непрерывной прокатки квадрат 60 X 60 мм. Привод клетей стана – индивидуальный, прокатываемый материал – сталь 45, диаметр валков (идеальный) всех клетей – 530 мм, температура начала прокатки – 1150°C, скорость прокатки в последней клетке стана – 1,5 м/с, расстояние между клетями – 2,5 м.

Необходимо найти требуемое число рабочих клетей, площади сечения полосы в каждом калибре, размеры калибров и скорости вращения валков в каждой клетке.

Расчет выполняем в следующей последовательности.

Определяем значения максимально допустимых частных суммарных вытяжек для всех пар калибров, начиная с последней клетки.

Используя приближенные выражения (5.25), (5.27), находим значения максимально допустимых частных суммарных вытяжек для всех пар калибров, начиная с последней клетки. Принимаем в качестве минимального угол  $\beta_i$ , равный  $30^\circ$  ( $\beta_{i \min} = 30^\circ$ ). В соответствии с прокатываемым материалом и температурой прокатки принимаем коэффициент  $A$  равным 4,5.

Для последней пары калибров, состоящей из  $n$ -го квадратного и предшествующего  $(n-1)$ -го ромбического калибров, имеем:

из условия захвата полосы валками

$$\lambda_{\Sigma \max} = 1 + \frac{20,5}{2800} \left( 5 + \frac{530 - 60\sqrt{2}}{60\sqrt{2}} \right)^2 \approx 1,77;$$

из условия устойчивости полосы

$$\lambda_{\Sigma \max} = 1 + \frac{0,364 \cdot 5,8^2}{\frac{8}{3} \cdot 4,5 + \frac{530 - 60\sqrt{2}}{60\sqrt{2}}} = 1,71.$$

Таким образом, максимально допустимая площадь сечения предшествующего квадрата будет равна  $F_{n-2} = 1,71 \cdot 60^2 = 6156 \text{ мм}^2$ , что соответствует квадрату  $\sim 78,5 \times 78,5 \text{ мм}$ .

Аналогично находим максимальные значения частных суммарных вытяжек в предшествующей паре калибров:

из условия захвата полосы валками

$$\lambda_{\Sigma \max} = 1 + \frac{20,5}{2800} \left( 5 + \frac{530 - 78,5\sqrt{2}}{78,5\sqrt{2}} \right)^2 = 1,56;$$

из условия устойчивости полосы

$$\lambda_{\Sigma \max} = 1 + \frac{0,364 \cdot 5,8^2}{\frac{8}{3} \cdot 4,5 + \frac{530 - 78,5\sqrt{2}}{78,5\sqrt{2}}} = 1,78.$$

Наибольшая площадь предшествующего данной паре калибров квадрата определяется условиями захвата и будет равна  $F_{n-4} = 1,56 \cdot 6156 \cong 9600 \text{ мм}^2$ , что соответствует квадрату  $98 \times 98 \text{ мм}$ .

Величина максимально допустимых частных суммарных вытяжек в предыдущей паре калибров:

из условия захвата полосы валками

$$\lambda_{\Sigma \max} = 1 + \frac{20,5}{2800} \left( 5 + \frac{530 - 98\sqrt{2}}{98\sqrt{2}} \right)^2 = 1,45;$$

из условия устойчивости полосы

$$\lambda_{\Sigma \max} = 1 + \frac{0,364 \cdot 5,8^2}{\frac{8}{3} \cdot 4,5 + \frac{530 - 98\sqrt{2}}{98\sqrt{2}}} = 1,82.$$

Величина максимально допустимой частной суммарной вытяжки в данной паре калибров также определяется условиями захвата полосы валками. Отсюда наибольшая площадь предшествующего квадратного сечения будет равна  $F_{n-6} = 1,45 \cdot 9600 = 13920 \text{ мм}^2$ , что соответствует квадрату  $118 \times 118 \text{ мм}$ .

Таким образом, для прокатки квадрата  $60 \times 60 \text{ мм}$  из исходного сечения  $120 \times 120 \text{ мм}$  необходимо иметь в стане не менее шести рабочих клетей.

На основании проделанного расчета принимаем следующую схему прокатки:  $120 \times 120 \text{ мм} \rightarrow 100 \times 100 \text{ мм} \rightarrow 80 \times 80 \text{ мм} \rightarrow 60 \times 60 \text{ мм}$ .

В соответствии с этим находим величины частных суммарных вытяжек в каждой паре калибров:

$$\lambda_{\Sigma 1,2} = \frac{120^2}{100^2} = 1,440; \lambda_{\Sigma 3,4} = 1,5625; \lambda_{\Sigma 5,6} = 1,778.$$

Ввиду того, что принятое значение частной суммарной вытяжки в пятой и шестой клетях несколько больше максимально допустимого с точки зрения устойчивости полосы, ромбический калибр пятой клетки будет иметь угол  $\beta_5$  меньше  $30^\circ$ . Однако, поскольку это превышение невелико, отклонение  $\beta_5$  от  $30^\circ$  будет незначительным.

Для обоснованного распределения частной суммарной вытяжки между ромбическим и последующим квадратным калибром найдем с помощью приближенного выражения (5.15) максимально допустимые значения вытяжки в ромбических калибрах:

$$\lambda_{1 \max} = \left( 1 + \frac{4,5}{100} \cdot \frac{530 - 100\sqrt{2}}{100\sqrt{2}} \right) 0,2^3 \cdot 1,2 = 1,201;$$

$$\lambda_{3 \max} = \left( 1 + \frac{4,5}{100} \cdot \frac{530 - 80\sqrt{2}}{80\sqrt{2}} \right) 0,25^3 \cdot 1,25 = 1,253;$$

$$\lambda_{5 \max} = \left( 1 + \frac{4,5}{100} \cdot \frac{530 - 60\sqrt{2}}{60\sqrt{2}} \right) 0,333^3 \cdot 1,333 = 1,345.$$

Для уменьшения опасности переполнения ромбических калибров металлом вытяжку в них принимаем несколько меньше максимальной, а именно:  $\lambda_1 = 1,175$ ;  $\lambda_3 = 1,230$ ;  $\lambda_5 = \sqrt{1,778} = 1,333$ .

Находим величину вытяжек в квадратных калибрах:

$$\lambda_2 = \frac{1,440}{1,175} = 1,226; \lambda_4 = \frac{1,5625}{1,230} = 1,270; \lambda_6 = 1,333.$$

Таким образом, площади сечения полосы в калибрах без учета закруглений в углах профиля будут следующими:

$$F_1 = 12260 \text{ мм}^2; F_2 = 10000 \text{ мм}^2; F_3 = 8130 \text{ мм}^2;$$

$$F_4 = 6400 \text{ мм}^2; F_5 = 4800 \text{ мм}^2; F_6 = 3600 \text{ мм}^2.$$

Размеры ромбических калибров определяем с помощью уравнений (4.37), (4.38), решая их методом последовательных приближений.

Используя выражения (4.40), (4.38), находим начальные значения угла наклона образующих ромбических калибров и коэффициента  $\psi_i$ :

$$\beta_1^{(0)} = \arctg \frac{1}{1 + \frac{0,46}{8,5^2} \cdot \frac{0,44^3}{2,44} \left( 2,748 + \frac{36\sqrt{4,5}}{1,44^2} \right) \cdot \frac{1,226 \cdot 0,226}{1,175 \cdot 0,175}} = 34,2^\circ; \beta_3^{(0)} = 31,1^\circ; \beta_5^{(0)} = 27,4^\circ.$$

Начальные значения коэффициента  $\psi_i$  определяем с помощью уравнения (4.38):

$$\psi_1^{(0)} = 1 - \sqrt{\frac{0,226}{15 \cdot 4,5} \cdot 6,748 (1 - \tg 34,2^\circ)} = 0,915;$$

$$\psi_3^{(0)} = 0,890; \psi_5^{(0)} = 0,852.$$

Значения  $\beta_i^{(0)}$  и  $\psi_i^{(0)}$  подставляем в уравнения (4.37), (4.38) и, проведя вычисления методом последовательных приближений, будем иметь:

$$\beta_1 = 34,2^\circ; \beta_3 = 31,6^\circ; \beta_5 = 28,0^\circ.$$

Окончательно принимаем следующие значения угла  $\beta_i$  в ромбических калибрах:

$$\beta_1 = 34^\circ; \beta_3 = 31,5^\circ; \beta_5 = 28^\circ.$$

При этих значениях угла  $\beta_i$  из уравнения (4.38) находим величины коэффициента  $\psi_i$ :

$$\psi_1 = 0,914; \psi_3 = 0,891; \psi_5 = 0,854.$$

Высота ромбических калибров без учета закруглений в углах при вершине будет равна:

$$h_{K1} = 0,914 \cdot 100 \sqrt{2} = 129,2 \text{ мм};$$

$$h_{K3} = 100,8 \text{ мм}; h_{K5} = 72,5 \text{ мм}.$$

При проверке размеров ромбических калибров необходимо, чтобы площадь полосы была меньше или равна площади соответствующего калибра.

Площади ромбических калибров (без учета закруглений в углах и зазора между валками) равны:

$$F_{K1} = \frac{129,2^2}{2 \operatorname{tg} 34^\circ} = 12370 \text{ мм}^2 > F_1;$$

$$F_{K3} = 8290 \text{ мм}^2 > F_3; F_{K5} = 4940 \text{ мм}^2 > F_5.$$

Радиусы закруглений в углах квадратного калибра принимаем равными  $0,1 h_{i+1}$ , где  $h_{i+1}$  — сторона квадрата. Принимаем также, что радиусы закруглений в углах ромбических калибров равны соответствующим радиусам закруглений в последующих квадратных калибрах:  $r_1 = r_2 = 10 \text{ мм}; r_3 = r_4 = 8 \text{ мм}; r_5 = r_6 = 6 \text{ мм}$ .

Высота квадратных калибров (с учетом закруглений в углах) равна:

$$h'_{K2} = 100 \sqrt{2} - 0,83 \cdot 10 = 133,1 \text{ мм};$$

$$h'_{K4} = 106,5 \text{ мм}; h'_{K6} = 79,9 \text{ мм}.$$

Высоту ромбических калибров с учетом закруглений в углах определяем с помощью выражения (4.36):

$$h'_{K1} = 129,2 - 2 \cdot 10 \left( \frac{1}{\cos 34^\circ} - 1 \right) = 125,1 \text{ мм};$$

$$h'_{K3} = 98,0 \text{ мм}; h'_{K5} = 70,9 \text{ мм}.$$

Величину зазоров между валками принимаем:

$$s_1 = s_2 = 12 \text{ мм}; s_3 = s_4 = 10 \text{ мм}; s_5 = s_6 = 8 \text{ мм}.$$

Глубина вреза калибров в валки:

$$h_{p1} = 0,5 (125,1 - 12) = 56,55 \text{ мм}; h_{p2} = 60,55 \text{ мм};$$

$$h_{p3} = 44,0 \text{ мм}; h_{p4} = 48,25 \text{ мм}; h_{p5} = 31,45 \text{ мм}; h_{p6} = 35,95 \text{ мм}.$$

Ширину вреза калибров в валки определяем по формуле:

$$b_{pi} = (h_{Ki} - s_i) / \operatorname{tg} \beta_i,$$

$$b_{p1} = \frac{129,2 - 12}{0,6745} = 173,8 \text{ мм}; b_{p2} = 129,4 \text{ мм};$$

$$b_{p3} = 148,2 \text{ мм}; b_{p4} = 103,1 \text{ мм}; b_{p5} = 121,3 \text{ мм}; b_{p6} = 76,9 \text{ мм}.$$

Определяем скорости вращения валков. Расчет выполняем, начиная с последней клетки, скорость вращения валков которой определяется заданной скоростью прокатки.

Частота вращения валков последней клетки равна, об/мин:

$$n_6 = \frac{60 v_6}{\pi D_{K6}} = \frac{60 \cdot 15 \cdot 10^3}{\pi D_{K6}} = 28,6 \cdot 10^3 \frac{1}{D_{K6}},$$

где  $D_{K6}$  — катающий диаметр последней, шестой клетки, мм.

Скорость вращения валков предыдущих клеток определяем, используя условие постоянства секундных объемов металла в каждой клетке:

$$n_5 = \frac{60 v_6}{\pi D_{K5} \lambda_6} = \frac{21,5 \cdot 10^3}{D_{K5}}.$$

Аналогичным образом находим:

$$n_4 = \frac{16,1 \cdot 10^3}{D_{K4}}; n_3 = \frac{12,7 \cdot 10^3}{D_{K3}}; n_2 = \frac{10,4 \cdot 10^3}{D_{K2}};$$

$$n_1 = \frac{8,4 \cdot 10^3}{D_{K1}}.$$

Величину катающих диаметров находим с помощью выражений (2.30), (2.31), предварительно определив значения всех входящих в эти выражения величин.

Используя выражения (2.43), (2.44), вычисляем значения координат  $y_{0i}$ ,  $y_{0i+1}$  для всех калибров:

$$y_{01} = \frac{120 \sqrt{2} - 129,2}{2(1 - \operatorname{tg} 34^\circ)} = 62,2 \text{ мм};$$

$$y_{02} = \frac{129,2 - 100 \sqrt{2} \operatorname{tg} 34^\circ}{2(1 - \operatorname{tg} 34^\circ)} = 52,0 \text{ мм}.$$

Аналогичным образом находим значения координат  $y_{0i}$ ,  $y_{0i+1}$  для всех остальных клеток:  $y_{03} = 52,4 \text{ мм}; y_{04} = 40,6 \text{ мм}; y_{05} = 43,4 \text{ мм}; y_{06} = 29,2 \text{ мм}$ .

Диаметры валков  $z$  вершине калибров без учета закруглений в углах профиля:

$$D_1 = 530 - 129,2 = 400,8; D_2 = 388,6 \text{ мм}; D_3 = 429,2 \text{ мм};$$

$$D_4 = 416,9 \text{ мм}; D_5 = 457,5 \text{ мм}; D_6 = 445,1 \text{ мм}.$$

Диаметры валков в точке с координатами  $y_0$ ,  $z_0$  получим из выражений (2.23), (2.25):

$$D_{y01} = 484,8 \text{ мм}; D_{y02} = 492,6 \text{ мм}; D_{y03} = 493,4 \text{ мм};$$

$$D_{y04} = 498,2 \text{ мм}; D_{y05} = 503,6 \text{ мм}; D_{y06} = 503,5 \text{ мм}.$$

Средние по ширине зоны деформации в калибре диаметры валков определяем из (2.13):

$$D_{ср1} = 442,8 \text{ мм}; D_{ср2} = 440,6 \text{ мм}; D_{ср3} = 461,3 \text{ мм};$$

$$D_{ср4} = 457,6 \text{ мм}; D_{ср5} = 480,6 \text{ мм}; D_{ср6} = 473,9 \text{ мм}.$$

Величину коэффициентов уширения в ромбических и квадратных калибрах при найденных значениях углов  $\beta_i$  и коэффициентов  $\psi_i$  рассчитываем из уравнений (4.39) и (3.15):

$$c_{y1} = 0,153; c_{y2} = 0,091; c_{y3} = 0,125;$$

$$c_{y4} = 0,102; c_{y5} = 0,101; c_{y6} = 0,120.$$

Из выражения (2.12) находим среднюю длину дуги захвата в калибрах:

$$l_1 = \sqrt{\frac{2140 \cdot 442,8}{3,0 \cdot 62,2 \cdot 0,847}} = 77,4 \text{ мм}; l_2 = 83,4 \text{ мм}; l_3 = 79,2 \text{ мм};$$

$$l_4 = 85,1 \text{ мм}; l_5 = 81,1 \text{ мм}; l_6 = 85,9 \text{ мм}.$$

Подставляя найденные значения параметров  $\gamma_{oi}$ ,  $D_{срi}$ ,  $\beta_i$  в выражение (2.30) и принимая для данного случая прокатки коэффициент трения на поверхности контакта прокатываемого металла и валков равным 0,4, получим:

$$\frac{D_{к1}}{D} = 1 + \sqrt[3]{\frac{9}{4} \left[ \frac{62,2}{400,8} \left( 1 - \frac{77,4}{0,4 \cdot 442,8} \right) \operatorname{tg} 34^\circ \right]^2 0,175 \frac{442,8}{400,8}} = 1,115;$$

$$D_{к1} = 1,115 \cdot 400,8 = 446,8 \text{ мм}.$$

Аналогично вычисляем величину катающих диаметров для всех остальных клеток, мм:

$$D_{к2} = 443,8; D_{к3} = 472,7; D_{к4} = 467,8; D_{к5} = 497,8; D_{к6} = 490,1.$$

Используя найденные значения катающих диаметров, найдем скорости вращения валков, об/мин:

$$n_1 = \frac{8,4 \cdot 10^3}{446,8} = 18,8; n_2 = \frac{10,4 \cdot 10^3}{443,8} = 23,4;$$

$$n_3 = 26,9; n_4 = 34,4; n_5 = 43,2; n_6 = 58,4.$$

Скорости выхода полосы из клеток, м/с:

$$v_1 = 0,440; v_2 = 0,540; v_3 = 0,664;$$

$$v_4 = 0,844; v_5 = 1,125; v_6 = 1,5.$$

### 3. СИСТЕМА ОВАЛ – КВАДРАТ

*Пример.* Из исходной квадратной заготовки сечением 60 × 60 мм ( $F_0 = 3570 \text{ мм}^2$ ) требуется получить на непрерывном стане квадрат сечением 14 ×

14 мм, материал – сталь 45. Привод клеток стана – индивидуальный, калибровка валков – овал – квадрат, диаметр (идеальный) рабочих валков – 350 мм, температура прокатки 1100 – 1150°C, скорость прокатки в последней клетки – 10 м/с. Требуется определить необходимое число клеток, площади сечения полосы в каждом калибре, размеры калибров и скорости вращения валков во всех клетях.

При выборе числа клеток и режима обжатий следует иметь в виду два обстоятельства:

так как целью прокатки в данном случае не является получение чистового квадратного профиля, вытяжки в клетях, в том числе и в последних, должны быть по возможности максимальными;

поскольку все клетки имеют одинаковый диаметр валков, то для улучшения условий захвата и более равномерной нагруженности оборудования вытяжки в первых клетях должны быть приняты меньшими, чем в последующих.

Определяем величину общей суммарной вытяжки  $\lambda_0 = (60/14)^2 = 18,37$ .

С помощью выражения (5.44) находим максимальные из условия устойчивости овальной полосы в квадратном калибре значения частной суммарной вытяжки (принимая значение коэффициента  $A$  равным 4,5).

Для последней пары калибров имеем

$$\lambda_{\Sigma \max} = 1 + 32 \left( \frac{2 + 4,5}{20 + \frac{350 - 14\sqrt{2}}{14\sqrt{2}}} \right)^2 = 2,00.$$

Площадь сечения предшествующего квадрата при  $\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\Sigma \max}$  будет равна  $F_{n-2} = 2,00 \cdot 14^2 = 392 \text{ мм}^2$ , что соответствует квадрату 19,8 × 19,8 мм.

Если в качестве средней для стана частной суммарной вытяжки принять величину  $\lambda_{\Sigma \max} = 2,0$ , то ориентировочное число клеток в стане будет равно

$$N = 2 \frac{\ln 18,37}{\ln 2,0} = 8,4.$$

Итак, для прокатки квадрата 14 × 14 мм из сечения 60 × 60 мм необходимо не менее восьми клеток, причем в некоторых из них вытяжки должны быть больше, чем в последних клетях стана.

В связи с этим необходимо найти величины максимально допустимых частных суммарных вытяжек для предшествующих пар калибров.

Принимая, что полоса после шестой клетки имеет сечение 20 × 20 мм, из (5.44) получим

$$\lambda_{\Sigma 5,6} = 1 + \frac{32 \cdot 6,5^2}{31,37^2} = 2,37.$$

Отсюда наибольшая площадь сечения полосы после четвертой клетки будет равна  $F_4 = 2,37 \cdot 400 = 949 \text{ мм}^2$ , что соответствует квадрату  $30,8 \times 30,8 \text{ мм}$ .

Как видно из выражения (5.44), в предшествующих клетях с точки зрения устойчивости полосы могут быть допущены значения частной суммарной вытяжки больше 2,37. Поскольку этого не требуется, расчеты максимально допустимых значений вытяжек для первых четырех клеток можно не проводить.

Таким образом, на основании расчета предельных значений частных суммарных вытяжек и приведенных выше соображений принимаем следующую схему прокатки квадрата  $14 \times 14 \text{ мм}$ :  $60 \times 60 \rightarrow 45 \times 45 \rightarrow 30 \times 30 \rightarrow 20 \times 20 \rightarrow 14 \times 14 \text{ мм}$ .

Радиусы закруглений в углах квадратных калибров принимаем в соответствии с размерами калибров:  $r_2 = 5 \text{ мм}$ ,  $r_4 = 3 \text{ мм}$ ,  $r_6 = 2 \text{ мм}$ ,  $r_8 = 1,5 \text{ мм}$ .

Площади сечения квадратом с учетом закруглений в углах профиля,  $\text{мм}^2$ :

$$F_2 = 45^2 - 0,86 \cdot 5^2 = 2004; F_4 = 30^2 - 0,86 \cdot 3^2 = 892;$$

$$F_6 = 20^2 - 0,86 \cdot 2^2 = 397; F_8 = 14^2 - 0,86 \cdot 1,5^2 = 194.$$

Отсюда получаем частные суммарные вытяжки:

$$\lambda_{\Sigma 1,2} = \frac{3570}{2004} = 1,781; \lambda_{\Sigma 3,4} = 2,247,$$

$$\lambda_{\Sigma 5,6} = 2,247; \lambda_{\Sigma 7,8} = 2,046.$$

Распределяем величину частной суммарной вытяжки между овальным и последующим квадратным калибром каждой пары, для чего предварительно с помощью выражения (5.34) находим максимально допустимые значения вытяжек в овальных калибрах:

$$\lambda_{1\text{max}} = \left[ 1 + \frac{1}{18} \left( 7 + \frac{350 - 45\sqrt{2}}{45\sqrt{2}} \right) \right] \times$$

$$\times (\sqrt{1,781} - 1)^3 \sqrt{1,781} = 1,366.$$

$$\lambda_{3\text{max}} = 1,646, \lambda_{5\text{max}} = 1,689, \lambda_{7\text{max}} = 1,580.$$

Чтобы избежать переполнения овальных калибров, величину вытяжки в них принимаем несколько меньше максимальной, но больше средней вытяжки ( $\sqrt{\lambda_{\Sigma}}$ ). Для простоты вытяжку во всех овальных калибрах принимаем равной среднегеометрической крайних значений диапазона  $\sqrt{\lambda_{\Sigma i,i+1}} \div \lambda_{i\text{max}}$ , т.е.

$$\lambda_i = \sqrt{\lambda_{i\text{max}}} \sqrt{\lambda_{\Sigma i,i+1}}.$$

Подставляя сюда значения  $\lambda_{i\text{max}}$  и  $\sqrt{\lambda_{\Sigma i,i+1}}$  для каждой пары

калибров, получим следующие величины вытяжек в овальных калибрах:

$$\lambda_1 = \sqrt{1,366} \sqrt{1,781} = 1,350; \lambda_3 = 1,571,$$

$$\lambda_5 = 1,591; \lambda_7 = 1,503.$$

Величина вытяжек в квадратных калибрах:

$$\lambda_2 = \frac{1,781}{1,350} = 1,319; \lambda_4 = \frac{2,247}{1,571} = 1,430;$$

$$\lambda_6 = 1,412; \lambda_8 = 1,361.$$

Площади сечения полосы в овальных калибрах,  $\text{мм}^2$ :

$$F_1 = 1,319 \cdot 2004 = 2643; F_3 = 1276; F_5 = 561; F_7 = 264.$$

Определяем размеры калибров. Высота квадратных калибров с учетом закруглений в углах,  $\text{мм}$ :

$$h'_{\kappa 2} = 45 \sqrt{2} - 0,83 \cdot 5 = 59,5; h'_{\kappa 4} = 39,9;$$

$$h'_{\kappa 6} = 26,6; h'_{\kappa 8} = 18,6.$$

Размеры овальных калибров определяем с помощью уравнений (4.62), (4.63). Уравнения решаем с помощью метода последовательных приближений. Начальные значения коэффициентов  $a_i$  и  $\psi_i$  находим, используя выражения (4.64) и (4.63):

$$a_1^{(0)} = 1 + 28,5 \frac{6,5}{5,5} \cdot \frac{(\sqrt{1,781} - 1)^3}{1,781} \cdot \left( \frac{0,319}{0,350} \right)^2 = 1,590.$$

$$\psi_1^{(0)} = 1 - 0,5 \sqrt{1,590} \left[ \sqrt{1 + \frac{8}{15 \cdot 4,5} \cdot \frac{0,319}{1,590} (8,5 - 1)} \right] = 0,804.$$

Аналогичным образом находим начальные значения коэффициентов  $a_i$  и  $\psi_i$  для всех остальных овальных калибров:

$$a_3^{(0)} = 2,508; \psi_3^{(0)} = 0,739; a_5^{(0)} = 2,868;$$

$$\psi_5^{(0)} = 0,703; a_7^{(0)} = 2,949; \psi_7^{(0)} = 0,679.$$

Подставляя значения  $a_i^{(0)}$  и  $\psi_i^{(0)}$  в уравнения (4.60), (4.62) и (4.63), после 1–2 итераций получим окончательные значения коэффициентов  $a_i$  и  $\psi_i$ :

$$a_1 = 1,550; \psi_1 = 0,804; a_3 = 2,517; \psi_3 = 0,739;$$

$$a_5 = 2,902; \psi_5 = 0,702; a_7 = 2,968; \psi_7 = 0,679.$$

Для проверки найденных значений коэффициентов  $a_i$  и  $\psi_i$  используем условие (4.65):

$$a_{1\text{min}} = 0,0583 \left( 1 + \frac{2}{0,804^2} (1,319)^2 \right) = 1,505 < a_1;$$



$$a_{3\min} = 2,27 < a_3; a_{5\min} = 2,641 < a_5; a_{7\min} = 2,779 < a_7.$$

Определяем высоту и радиус образующих овальных калибров, мм:

$$h_{\kappa 1} = 0,804 \cdot 45\sqrt{2} \approx 51,2; R_{\text{об}p1} = 0,5 \cdot 1,550 \cdot 51,2 \approx 40;$$

$$h_{\kappa 3} = 31,4; R_{\text{об}p3} = 40; h_{\kappa 5} = 19,9;$$

$$R_{\text{об}p5} = 29; h_{\kappa 7} = 13,4; R_{\text{об}p7} = 20.$$

Величину зазоров между валками принимаем, исходя из высоты калибров, мм:

$$s_1 = s_2 = 6; s_3 = s_4 = 4; s_5 = s_6 = 3; s_7 = s_8 = 2.$$

Глубина вреза калибров в валки, мм:

$$h_{p1} = \frac{51,2 - 6}{2} = 22,6; h_{p2} = \frac{59,5 - 6}{2} = 26,8;$$

$$h_{p3} = 13,7; h_{p4} = 17,95; h_{p5} = 8,45;$$

$$h_{p6} = 11,8; h_{p7} = 5,7; h_{p8} = 8,3.$$

Ширину вреза калибров в валки определяем с помощью выражения (4.46):

$$b_{p1} = (51,2 - 6) \sqrt{\frac{4 \cdot 40}{51,2 - 6,0}} - 1 = 72 \text{ мм},$$

$$b_{p2} = 45\sqrt{2} - 6 = 57,6 \text{ мм}, b_{p3} = 60,3 \text{ мм}; b_{p4} = 38,4 \text{ мм};$$

$$b_{p5} = 40,9 \text{ мм}; b_{p6} = 25,3 \text{ мм}; b_{p7} = 28,0; b_{p8} = 17,8 \text{ мм}.$$

Определяем частоту вращения валков. Расчет выполняем, начиная с последней клетки, скорость вращения валков которой вычисляем из выражения:

$$n_8 = \frac{60 v_8}{\pi D_{\kappa 8}} = 191 \cdot 10^3 \frac{1}{D_{\kappa 8}} \text{ (об/мин)},$$

где  $D_{\kappa 8}$  — катающий диаметр валков последней, восьмой клетки, мм.

Используя условие постоянства секундных объемов металла в клетях, найдем:

$$n_7 = \frac{60 v_8}{\pi D_{\kappa 7} \lambda_8} = \frac{60 \cdot 10 \cdot 10^3}{\pi 1,361 D_{\kappa 7}} = 140,3 \frac{10^3}{D_{\kappa 7}} \text{ (об/мин)},$$

$$n_6 = 93,3 \frac{10^3}{D_{\kappa 6}}; n_5 = 66,1 \frac{10^3}{D_{\kappa 5}}; n_4 = 41,5 \frac{10^3}{D_{\kappa 4}};$$

$$n_3 = 29,0 \frac{10^3}{D_{\kappa 3}}; n_2 = 18,5 \frac{10^3}{D_{\kappa 2}}; n_1 = 14,02 \frac{10^3}{D_{\kappa 1}}.$$

Величину катающих диаметров находим с помощью выражений (2.30) и (2.34), определив предварительно значения входящих в них величин.

Значения координаты  $y_{0j+1}$  определяем из выражения (2.46):

$$y_{01} = 30 \text{ мм}, y_{02} = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{2 \cdot 40^2 - \left( 40 + \frac{45\sqrt{2} - 51,2}{2} \right)^2} - \left( 40 - \frac{114,8}{2} \right) \right] = 25 \text{ мм}, y_{03} = 22,5 \text{ мм}, y_{04} = 15,3 \text{ мм},$$

$$y_{05} = 15,0, y_{06} = 9,6 \text{ мм}, y_{07} = 10 \text{ мм}, y_{08} = 6,4 \text{ мм}.$$

Диаметры валков в вершинах овальных и квадратных (без учета закруглений в углах квадрата) калибров:

$$D_1 = 350 - 51,2 = 298,8 \text{ мм}, D_2 = 350 - 45\sqrt{2} = 286,4 \text{ мм},$$

$$D_3 = 318,6 \text{ мм}, D_4 = 307,6 \text{ мм}, D_5 = 330,1 \text{ мм},$$

$$D_6 = 321,7 \text{ мм}, D_7 = 336,6 \text{ мм}, D_8 = 330,2 \text{ мм}.$$

Значения диаметров валков в точке с координатами  $y_0, z_0$  определяем из выражений (2.25), (2.28):

$$D_{y01} = 298,8 + 2 \cdot 40 \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{30^2}{40^2}} \right) = 325,9 \text{ мм};$$

$$D_{y02} = 286,4 \text{ мм} + 2 \cdot 25 = 336,4 \text{ мм}; D_{y03} = 332,5 \text{ мм};$$

$$D_{y04} = 338,2 \text{ мм}; D_{y05} = 338,5 \text{ мм}; D_{y06} = 340,9 \text{ мм};$$

$$D_{y07} = 342,0 \text{ мм}; D_{y08} = 343,0 \text{ мм}.$$

Средний диаметр валков в зоне деформации:

$$D_{\text{ср}1} = \frac{298,8 + 325,9}{2} = 312,4 \text{ мм}, D_{\text{ср}2} = 311,4 \text{ мм},$$

$$D_{\text{ср}3} = 325,6 \text{ мм}, D_{\text{ср}4} = 322,9 \text{ мм}, D_{\text{ср}5} = 334,3 \text{ мм},$$

$$D_{\text{ср}6} = 331,3 \text{ мм}, D_{\text{ср}7} = 339,3 \text{ мм}, D_{\text{ср}8} = 336,6 \text{ мм}.$$

Значения коэффициентов уширения в калибрах находим с помощью выражений (4.60), (3.15)

$$c_{y1} = 0,115, c_{y2} = 0,112, c_{y3} = 0,105, c_{y4} = 0,143,$$

$$c_{y5} = 0,138, c_{y6} = 0,186, c_{y7} = 0,199, c_{y8} = 0,235.$$

Используя выражение (2.12), определяем среднюю длину горизонтальной проекции дуги захвата:

$$l_1 = \sqrt{\frac{2643 \cdot 0,350 \cdot 312,4}{3,4 \cdot 30,0 \cdot 0,885}} = 56,6 \text{ мм};$$

$$l_2 = \sqrt{\frac{2004 \cdot 0,319 \cdot 311,4}{3,4 \cdot 25,0 \cdot 0,888}} = 51,4 \text{ мм};$$

$$l_3 = 58,8 \text{ мм}; l_4 = 52,7 \text{ мм}; l_5 = 50,2 \text{ мм};$$

$$l_6 = 45,2 \text{ мм}; l_7 = 40,7 \text{ мм}; l_8 = 37,6 \text{ мм}.$$

С помощью выражений (2.30), (2.34) находим начальные значения катающих диаметров соответственно квадратных и овальных калибров (коэффициент трения между прокатываемой полосой и валками принимаем равным 0,4):

$$D_{K1} = 298,8 \left[ 1 + \frac{2 \cdot 30,0}{\pi \cdot 298,8} \left( 1 - \frac{56,6}{0,4 \cdot 312,4} \right) \right] \times \\ \times \sqrt[3]{0,350 \frac{312,4}{40}} = 316,1 \text{ мм}; \quad D_{K2} = 286,4 \left[ 1 + \right. \\ \left. + \sqrt[3]{\frac{9}{4} \left( \frac{25,0}{286,4} \right)^2 \left( 1 - \frac{51,4}{0,4 \cdot 311,4} \right)^2 0,319 \frac{311,4}{286,4}} \right] = 322,8 \text{ мм}.$$

Аналогичным образом вычисляем значения катающих диаметров для всех остальных клетей:

$$D_{K3} = 335,5 \text{ мм}; D_{K4} = 337,1 \text{ мм}; D_{K5} = 345,7 \text{ мм};$$

$$D_{K6} = 344,8 \text{ мм}; D_{K7} = 349,6 \text{ мм}; D_{K8} = 348,2 \text{ мм}.$$

Как видим, величина катающего диаметра в клетях III, V — VIII больше диаметра валка в точке с координатами  $y_0, z_0$  ( $D_{y_0}$ ). Поэтому значения катающих диаметров в этих клетях определяем с помощью уравнения (2.39). Величину поправочного коэффициента  $\delta$  находим из графиков, изображенных на рис. 10, 11, в зависимости от величины отношения  $(D_K - D) / (D_{y_0} - D)$ .

Уточненные значения катающих диаметров в клетях III, V — VIII будут равны:

$$D_{K3} = 318,6 \left[ 1 + \left( \frac{335,5}{318,6} - 1 \right) 1,09 \right] = 337,0 \text{ мм};$$

$$D_{K5} = 330,1 \left[ 1 + \left( \frac{345,7}{330,1} - 1 \right) 1,36 \right] = 351,3 \text{ мм};$$

$$D_{K6} = 321,7 \left[ 1 + \left( \frac{344,8}{321,7} - 1 \right) 1,09 \right] = 346,9 \text{ мм};$$

$$D_{K7} = 336,6 \left[ 1 + \left( \frac{349,6}{336,6} - 1 \right) 1,68 \right] = 358,4 \text{ мм};$$

$$D_{K8} = 330,2 \left[ 1 + \left( \frac{348,2}{330,2} - 1 \right) 1,24 \right] = 352,5 \text{ мм}.$$

Используя найденные значения катающих диаметров, определяем скорости вращения валков всех клетей:

$$n_1 = \frac{14020}{316,1} = 44,4 \text{ об/мин}, n_2 = 57,3 \text{ об/мин}, n_3 = 86,1 \text{ об/мин},$$

$$n_4 = 123,1 \text{ об/мин}, n_5 = 188,2 \text{ об/мин}, n_6 = 269,0 \text{ об/мин},$$

$$n_7 = 391,5 \text{ об/мин}, n_8 = 541,8 \text{ об/мин}.$$

#### 4. СИСТЕМА ОВАЛ — КРУГ

Применительно к системе овал — круг рассмотрим два различных варианта расчета:

расчет калибровки валков непрерывного стана с индивидуальным приводом клетей;

расчет калибровки валков непрерывного стана с общим приводом клетей.

Между этими вариантами имеется существенная разница в методике и последовательности расчета.

*Пример 1.* В шестиклетевом непрерывном стане с индивидуальным приводом клетей необходимо прокатать круг диаметром 14 мм из заготовки круглого сечения диаметром 26 мм. Прокатываемый материал — углеродистая сталь, температура прокатки —  $1100 \div 1150^\circ\text{C}$ , диаметр валков (идеальный) всех клетей — 300 мм, скорость прокатки в последней клетке — 10 м/с.

Требуется выполнить расчет калибровки и скоростей вращения валков всех клетей стана. Поскольку в данном примере число клетей стана задано, последовательность расчета будет несколько иной, чем в предыдущем случае при рассмотрении системы овал — квадрат.

Определяем величину общей вытяжки

$$\lambda_0 = \left( \frac{26}{14} \right)^2 = 3,45.$$

Отсюда среднее значение частной суммарной вытяжки в стане будет равно

$$\lambda_{\Sigma \text{ ср}} = \sqrt[3]{3,45} = 1,511.$$

Находим в первом приближении при  $\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\Sigma \text{ ср}}$  площади поперечного сечения и диаметры промежуточных круглых калибров:

$$F_2 = \frac{\pi 26^2}{4 \cdot 1,511} = 351,4 \text{ мм}^2; d_2 = 21,2 \text{ мм};$$

$$F_4 = 1,511 \frac{\pi 14^2}{4} = 232,6 \text{ мм}^2; d_4 = 17,2 \text{ мм}.$$

С учетом этого принимаем следующую схему прокатки круга диаметром 14 мм: круг 26 мм → круг 21 мм → круг 17 мм → круг 14 мм.

Определяем величину частных суммарных вытяжек в соответствии с выбранной схемой прокатки:

$$\lambda_{\Sigma 1,2} = (26/21)^2 = 1,533, \lambda_{\Sigma 3,4} = (21/17)^2 = 1,526,$$

$$\lambda_{\Sigma 5,6} = (17/14)^2 = 1,474.$$

С помощью выражения (5.60) находим значения максимально допустимых частных суммарных вытяжек для всех пар калибров:

$$\lambda_{\Sigma \text{ max } 1,2} = 1 + \frac{3100}{(40 + \frac{279}{21})^2} = 2,090;$$

$$\lambda_{\Sigma \max 3,4} = 1,966; \lambda_{\Sigma \max 5,6} = 1,849.$$

Как видим, принятые значения  $\lambda_{\Sigma}$  меньше максимально допустимых, что подтверждает обоснованность выбранной схемы прокатки.

Внутри каждой пары вытяжку между овальным и последующим круглым калибром распределяем поровну. Получим

$$\lambda_1 = \lambda_2 = 1,238, \lambda_3 = \lambda_4 = 1,235, \lambda_5 = \lambda_6 = 1,214.$$

Таким образом, площади сечения металла по клетям будут равны:

$$F_1 = 1,238 \frac{\pi}{4} 21^2 = 428,8 \text{ мм}^2, F_2 = 346,4 \text{ мм}^2,$$

$$F_3 = 280,3 \text{ мм}^2, F_4 = 227,0 \text{ мм}^2, F_5 = 186,9 \text{ мм}^2, F_6 = 153,9 \text{ мм}^2.$$

Определяем размеры калибров. Угол выпуска всех круглых калибров принимаем равным  $25^\circ$ . Ширина круглых калибров будет равна:

$$b_{K2} = \frac{21}{\cos 25^\circ} = 23,2 \text{ мм}, b_{K4} = 18,8 \text{ мм}, b_{K6} = 15,4 \text{ мм}.$$

Размеры овальных калибров вычисляем из уравнений (4.74), (4.75) и (4.76) с помощью метода последовательных приближений. Начальные значения коэффициентов  $a_i$ ,  $\psi_i$  находим из выражений (4.79), (4.78).

Принимая значение коэффициента  $A$  равным 4,5, получим:

$$a_1^{(0)} = 1 + \frac{200}{25 + 13,5} \left( 10 + \frac{279}{21} \right) \left( \frac{0,238}{2,238} \right)^2 = 2,37;$$

$$\psi_1^{(0)} = 1 - 0,383 \sqrt[3]{\frac{1,37}{2,37} \cdot \frac{0,238^2}{4,5^2} \left( 1 + \frac{279}{4 \cdot 21} \right)^2} = 0,881.$$

Аналогичным образом находим:

$$a_3^{(0)} = 2,53; \psi_3^{(0)} = 0,865; a_5^{(0)} = 2,48; \psi_5^{(0)} = 0,859.$$

Подставляем значения  $a_i^{(0)}$  и  $\psi_i^{(0)}$  в уравнения (4.74), (4.75), (4.76) после 1–2 итераций, получим окончательные значения коэффициентов  $a_i$ ,  $\psi_i^*$ :

$$a_1 = 2,375; \psi_1 = 0,882; a_3 = 2,535;$$

$$\psi_3 = 0,866; a_5 = 2,482; \psi_5 = 0,860.$$

Значения коэффициентов  $a_i$  и  $\psi_i$  проверяем с помощью условия (4.80)

$$a_{1\min} = 0,0583 \left( 1 + \pi \frac{1,238}{0,882^2} \right)^2 = 2,099 < a_1;$$

$$a_{3\min} = 2,22 < a_3, a_{5\min} = 2,21 < a_5.$$

\* Результаты расчета подтверждают, в частности, высокую точность приближенных выражений (4.78), (4.79).

Находим высоту (диаметр вписанной окружности) и радиусы образующих овальных калибров:

$$d_1 = 0,882 \cdot 21 = 18,5 \text{ мм}, d_3 = 14,7 \text{ мм}, d_5 = 12,0 \text{ мм},$$

$$R_{обр1} = 2,375 \frac{18,5}{2} = 22 \text{ мм}, R_{обр3} = 18,6 \text{ мм}, R_{обр5} = 14,9 \text{ мм}.$$

Принимаем:

$$R_{обр1} = 22 \text{ мм}, R_{обр3} = 19 \text{ мм}, R_{обр5} = 15 \text{ мм}.$$

Ширина овальных калибров

$$b_{K1} = 18,5 \sqrt{\frac{4 \cdot 22}{18,5}} - 1 = 35,9 \text{ мм}, b_{K3} = 30,0 \text{ мм},$$

$$b_{K5} = 24,0 \text{ мм}.$$

Величину зазоров между валками выбираем в соответствии с диаметром калибров

$$s_1 = s_2 = s_3 = s_4 = 2,0 \text{ мм}; s_5 = s_6 = 1,5 \text{ мм}.$$

Глубина вреза калибров в валки

$$h_{p1} = \frac{18,5 - 2}{2} = 8,25 \text{ мм}, h_{p2} = 9,5 \text{ мм}, h_{p3} = 6,35 \text{ мм},$$

$$h_{p4} = 7,5 \text{ мм}, h_{p5} = 5,25 \text{ мм}, h_{p6} = 6,25 \text{ мм}.$$

С помощью выражений (4.46), (4.67) находим ширину вреза калибров в валки

$$b_{p1} = (18,5 - 2) \frac{4 \cdot 22}{18,5 - 2} - 1 = 34,3 \text{ мм},$$

$$b_{p2} = 23,2 - 2 \operatorname{tg} 25^\circ = 22,3 \text{ мм}, b_{p3} = 28,4 \text{ мм},$$

$$b_{p4} = 17,9 \text{ мм}, b_{p5} = 22,8 \text{ мм}, b_{p6} = 14,7 \text{ мм}.$$

Расчет скоростного режима прокатки выполняем, начиная с последней, шестой клетки, скорость вращения валков которой определяется заданной скоростью прокатки (10 м/с)

$$n_6 = \frac{60 \cdot 10 \cdot 10^3}{\pi D_{K6}} = 191 \cdot 10^3 \frac{1}{D_{K6}} \text{ (об/мин)},$$

где  $D_{K6}$  — катающий диаметр в шестой клетки (мм).

Скорость вращения валков предыдущих клеток вычисляем на основании закона постоянства секундных объемов металла в клетях:

$$n_5 = \frac{60 \cdot 10 \cdot 10^3}{\pi 1,214} \cdot \frac{1}{D_{K5}} = 157,3 \cdot 10^3 \frac{1}{D_{K5}};$$

$$n_4 = 129,5 \cdot 10^3 \frac{1}{D_{K4}}; n_3 = 105,0 \cdot 10^3 \frac{1}{D_{K3}};$$

$$n_2 = 84,9 \cdot 10^3 \frac{1}{D_{K2}}; n_1 = 68,6 \cdot 10^3 \frac{1}{D_{K1}}.$$

Для определения катающих диаметров находим значения входя-

щих в выражения (2.34), (2.36) величин. Значения координаты  $y_0$  для овальных и круглых калибров найдем из (2.47) и (2.48) соответственно:

$$y_{01} = \frac{18,5}{2} \sqrt{\left(\frac{26,0}{18,5}\right)^2 - \frac{[4 \cdot 22 - 18,5 (1 + \frac{26,0^2}{18,5^2})]^2}{4 (2 \cdot 22 - 18,5)^2}} = 11,5 \text{ мм};$$

$$y_{02} = \frac{18,5}{2} \cdot \frac{4 \cdot 22 - 18,5 [1 + (\frac{1}{0,882})^2]}{2 (2 \cdot 22 - 18,5)} = 8,3 \text{ мм},$$

$$y_{03} = 9,2 \text{ мм}, y_{04} = 6,6 \text{ мм}, y_{05} = 7,5 \text{ мм}, y_{06} = 5,3 \text{ мм}.$$

Диаметры валков в вершине калибров

$$D_1 = 300 - 18,5 = 281,5 \text{ мм}, D_2 = 279 \text{ мм}, D_3 = 285,3 \text{ мм},$$

$$D_4 = 283,0 \text{ мм}, D_5 = 288,0 \text{ мм}, D_6 = 286,0 \text{ мм}.$$

Диаметры валков в точке с координатами  $y_0, z_0$  определяем из выражений (2.26), (2.27).

$$D_{y01} = 281,5 + 2 \cdot 22 [1 - \sqrt{1 - (\frac{11,5}{22})^2}] = 288,0 \text{ мм};$$

$$D_{y02} = 279 + 21 [1 - \sqrt{1 - (\frac{8,3}{10,5})^2}] = 287,1 \text{ мм};$$

$$D_{y03} = 290,1 \text{ мм}, D_{y04} = 289,3 \text{ мм}, D_{y05} = 292,0 \text{ мм}, D_{y06} = 290,9 \text{ мм}.$$

Средний по ширине зоны деформации диаметр валка

$$D_{ср1} = \frac{281,5 + 288,0}{2} = 284,8 \text{ мм}, D_{ср2} = 283,0 \text{ мм},$$

$$D_{ср3} = 287,7 \text{ мм}, D_{ср4} = 286,2 \text{ мм}, D_{ср5} = 290,0 \text{ мм},$$

$$D_{ср6} = 288,5 \text{ мм}.$$

Величину коэффициентов уширения в овальных и круглых калибрах определяем при помощи уравнений (4.74), (3.16):

$$c_{y1} = 0,204, c_{y2} = 0,204, c_{y3} = 0,245,$$

$$c_{y4} = 0,234, c_{y5} = 0,276, c_{y6} = 0,266.$$

Из выражения (2.12) находим среднюю длину горизонтальной проекции дуги захвата

$$l_1 = \sqrt{\frac{428,8 \cdot 0,238 \cdot 284,8}{3,4 \cdot 11,5 \cdot 0,796}} = 30,6 \text{ мм}, l_2 = 34,3 \text{ мм},$$

$$l_3 = 28,4 \text{ мм}, l_4 = 31,7 \text{ мм}, l_5 = 25,1 \text{ мм}, l_6 = 28,6 \text{ мм}.$$

С помощью выражений (2.34), (2.36) находим начальные значения катающих диаметров и сравниваем их с диаметром валка  $D_{y0}$

(коэффициент трения на поверхности соприкосновения полосы с валком принимаем равным 0,4):

$$D_{к1} = 281,5 [1 + \frac{2}{\pi} \frac{11,5}{281,5} (1 - \frac{30,6}{0,4 \cdot 284,8})] \times$$

$$\times \sqrt{0,238 \frac{284,8}{22}} = 290,9 \text{ мм}; D_{к2} = 279 [1 +$$

$$+ \frac{2}{\pi} \frac{8,3}{279} (1 - \frac{34,3}{0,4 \cdot 283,0})] \sqrt{0,238 \frac{283,0}{10,5}} = 288,6 \text{ мм};$$

$$D_{к3} = 293,6 \text{ мм}, D_{к4} = 291,4 \text{ мм}, D_{к5} = 295,6 \text{ мм}, D_{к6} = 293,4 \text{ мм}.$$

Таким образом, во всех клетях значения катающих диаметров превышают величину диаметра валка с координатами  $y_0, z_0$ . Используя выражение (2.39), уточняем значения катающих диаметров. Величину поправочного коэффициента  $\delta$  определяем с помощью графика, представленного на рис. 11:

$$\delta_1 = 1,17, \delta_2 = 1,07, \delta_3 = 1,30,$$

$$\delta_4 = 1,11, \delta_5 = 1,40, \delta_6 = 1,22.$$

Окончательно:

$$D_{к1} = [1 + (\frac{290,9}{281,5} - 1) 1,17] 281,5 = 292,5 \text{ мм}; D_{к2} = 289,0 \text{ мм};$$

$$D_{к3} = 296,1 \text{ мм}; D_{к4} = 292,3 \text{ мм}; D_{к5} = 298,6 \text{ мм};$$

$$D_{к6} = 295,0 \text{ мм}.$$

Подставляя эти значения катающих диаметров в приведенные выше выражения для определения скоростей вращения валков, получим:

$$n_1 = 68,6 \cdot 10^3 \frac{1}{292,5} = 235 \text{ об/мин}, n_2 = 293 \text{ об/мин},$$

$$n_3 = 355 \text{ об/мин}, n_4 = 442 \text{ об/мин}, n_5 = 527 \text{ об/мин},$$

$$n_6 = 647 \text{ об/мин}.$$

**Пример 2.** Рассчитать калибровку валков 6-клетевого непрерывного стана с общим приводом клетей для прокатки катанки диаметром 8 мм из заготовки круглого сечения диаметром 18 мм. Прокатываемый материал — медь, температура заготовки — 750°C, скорость прокатки в последней клетке — 10 м/с, диаметр валков (идеальный) всех клетей — 256 мм. В качестве технологической смазки используется эмульсия жирностью 4 — 6 %. Величина отношений скоростей вращения валков соседних клетей (кинематических коэффициентов скорости) приведены ниже:

Номер клетки . . . . .	1	2	3	4	5	6
Кинематический коэффициент скорости ( $\eta_i$ )	1,0	1,370	1,299	1,303	1,246	1,253

Требуется определить площади сечения полосы и размеры калибров во всех клетях стана.

Расчет калибровки валков выполняем в следующей последовательности.

Определяем площади сечения полосы по клетям, принимая в качестве начального приближения  $\lambda_i = \eta_i$ . Исходя из закона постоянства секундных объемов металла по клетям непрерывного стана (2.58), это равнозначно допущению, что катающие диаметры во всех клетях равны между собой.

Расчет начинаем с последней, шестой клетки, площадь сечения металла в которой задана:  $F_6 = 50,3 \text{ мм}^2$ ;  $F_5 = 1,253 \cdot 50,3 = 63,0 \text{ мм}^2$ ;  $F_4 = 1,253 \cdot 1,246 \cdot 50,3 = 78,5 \text{ мм}^2$ ;  $F_3 = 102,3 \text{ мм}^2$ ;  $F_2 = 132,9 \text{ мм}^2$ ;  $F_1 = 182,1 \text{ мм}^2$ .

Находим диаметры круглых калибров (клетки 2, 4, 6) и диаметры валков в вершинах калибров:

$$d_2 = \sqrt{\frac{4}{\pi} 132,9} = 13,0 \text{ мм}; d_4 = 10 \text{ мм}; d_6 = 8 \text{ мм};$$

$$D_2 = 256 - 13 = 243 \text{ мм}; D_4 = 246 \text{ мм}; D_6 = 248 \text{ мм}.$$

Величины частных суммарных вытяжек при начальном приближении будут равны:

$$\lambda_{\Sigma 1,2} = (18/13)^2 = 1,917; \lambda_{\Sigma 3,4} = (13/10)^2 = 1,690;$$

$$\lambda_{\Sigma 5,6} = (10/8)^2 = 1,562.$$

$$\text{Вытяжка в первой клетке } \lambda_1 = 1,917/1,370 = 1,399.$$

Подставляя найденные значения частных суммарных вытяжек и диаметров  $d_{i+1}$ ,  $D_{i+1}$  в выражение (4.79), а затем в (4.78), получим при  $\lambda_i = \eta_i$ ,  $\lambda_{i+1} = \eta_{i+1}$  значения коэффициентов  $a_i$  и  $\psi_i$  при начальном приближении (коэффициент  $A$  для меди при данных условиях прокатки принимаем равным 5,0):

$$a_1 = 1 + \frac{200}{25 + 15} \left(10 + \frac{243}{13}\right) \left(\frac{\sqrt{1,917} - 1}{\sqrt{1,917} + 1}\right)^2 \frac{1,37 \cdot 0,37}{1,399 \cdot 0,399} = 4,39;$$

$$\psi_1 = 1 - 0,383 \sqrt[3]{\frac{3,39}{4,39}} \left(\frac{0,370}{5}\right)^2 \left(1 + \frac{243}{4 \cdot 13}\right)^2 = 0,803.$$

Аналогичным образом находим:

$$a_3 = 3,99; \psi_3 = 0,801; a_5 = 3,62; \psi_5 = 0,800.$$

Высота овальных калибров и диаметры валков в вершине калибров:

$$d_1 = 0,803 \cdot 13 = 10,4 \text{ мм}; d_3 = 0,801 \cdot 10 = 8 \text{ мм};$$

$$d_5 = 0,800 \cdot 8 = 6,4 \text{ мм}; D_1 = 256 - 10,4 = 245,6 \text{ мм};$$

$$D_3 = 248 \text{ мм}; D_5 = 249,6 \text{ мм}.$$

Принимая, что величина катающего диаметра в каждой клетке равна диаметру валка по вершине калибра, с помощью выражений (4.126)

найдем новые, уточненные значения площадей металла и вытяжек в клетях:

$$F_5^{(1)} = 63 \frac{248,0}{249,6} = 62,6 \text{ мм}^2; F_4^{(1)} = 78,5 \frac{248,0}{246,0} = 79,1 \text{ мм}^2;$$

$$F_3^{(1)} = 102,3 \frac{248,0}{248,0} = 102,3 \text{ мм}^2; F_2^{(1)} = 132,9 \frac{248,0}{243,0} =$$

$$= 135,6 \text{ мм}^2; F_1^{(1)} = 182,1 \frac{248,0}{245,6} = 183,9 \text{ мм}^2.$$

Отсюда вытяжки в калибрах будут равны:

$$\lambda_1^{(1)} = \frac{254,5}{183,9} = 1,384; \lambda_2^{(1)} = \frac{183,9}{135,6} = 1,356;$$

$$\lambda_3^{(1)} = 1,326; \lambda_4^{(1)} = 1,293; \lambda_5^{(1)} = 1,264; \lambda_6^{(1)} = 1,245.$$

Величина частных суммарных вытяжек:

$$\lambda_{\Sigma 1,2} = \frac{254,5}{135,6} = 1,876; \lambda_{\Sigma 3,4} = \frac{135,6}{79,1} = 1,714;$$

$$\lambda_{\Sigma 5,6} = \frac{79,1}{50,3} = 1,573.$$

Диаметры круглых калибров и диаметры валков при вершинах:

$$d_2^{(1)} = 13,1 \text{ мм}; d_4^{(1)} = 10,0 \text{ мм}; d_6 = 8,0 \text{ мм};$$

$$D_2^{(1)} = 242,9 \text{ мм}; D_4^{(1)} = 246 \text{ мм}; D_6 = 248 \text{ мм}.$$

При данных значениях  $\lambda$ ,  $\lambda_{\Sigma}$ ,  $d$  и  $D$ , используя выражения (4.79), (4.78), находим новые величины коэффициентов  $a_i$ ,  $\psi_i$ :

$$a_1 = 1 + \frac{200}{25 + 15} \left(10 + \frac{242,9}{13,1}\right) \left(\frac{\sqrt{1,876} - 1}{\sqrt{1,876} + 1}\right)^2 \times$$

$$\times \frac{1,356 \cdot 0,356}{1,384 \cdot 0,384} = 4,15;$$

$$\psi_1 = 1 - 0,383 \sqrt[3]{\frac{3,15}{4,15}} \left(\frac{0,356}{5}\right)^2 \left(1 + \frac{242,9}{4 \cdot 13,1}\right)^2 = 0,810.$$

Аналогично находим значения  $a$  и  $\psi$  для третьей и пятой клеток

$$a_3 = 3,72; \psi_3 = 0,807; a_5 = 3,38; \psi_5 = 0,806.$$

Отсюда:

$$d_1 = 0,810 \cdot 13,1 = 10,6 \text{ мм}; d_3 = 0,807 \cdot 10 = 8,1 \text{ мм};$$

$$d_5 = 0,806 \cdot 8 = 6,4 \text{ мм}; D_1 = 245,4 \text{ мм};$$

$$D_3 = 247,2 \text{ мм}; D_5 = 249,6 \text{ мм}.$$

При помощи выражений (2.34), (2.36) вычисляем величину катающих диаметров во всех клетях, для чего предварительно найдем значения входящих в эти выражения величин.

Из выражений (2.47), (2.48) определяем значения координат  $u_i$

$$y_{01} = \frac{10,6}{2} \sqrt{\frac{1,876}{0,810^2} - \frac{2 \cdot 4,15 - 1 - \frac{1,876}{0,810^2}}{4 \cdot 3,15}} = 8,2 \text{ мм};$$

$$y_{02} = \frac{13,1}{2} \cdot 0,810 \frac{2 \cdot 4,15 - 1 - \frac{1}{0,810^2}}{2 \cdot 3,15} = 4,9 \text{ мм};$$

$$y_{03} = 5,9 \text{ мм}; y_{04} = 3,6 \text{ мм}; y_{05} = 4,2 \text{ мм}; y_{06} = 2,8 \text{ мм}.$$

Диаметры валков в точке с координатами  $y_0, z_0$ :

$$D_{y01} = 245,4 + 4,15 \cdot 10,6 \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{8,2}{4,15 \cdot 5,3} \right)^2} \right] = 248,6 \text{ мм},$$

$$D_{y02} = 242,9 + 13,1 \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{4,9}{6,55} \right)^2} \right] = 247,3 \text{ мм},$$

$$D_{y03} = 250,3 \text{ мм}; D_{y04} = 249,1 \text{ мм};$$

$$D_{y05} = 251,3 \text{ мм}; D_{y06} = 250,3 \text{ мм}.$$

Средний диаметр валков в зоне деформации:

$$D_{cp1} = \frac{245,4 + 248,6}{2} = 247,0 \text{ мм}; D_{cp2} = 245,1 \text{ мм};$$

$$D_{cp3} = 249,1 \text{ мм}; D_{cp4} = 247,6 \text{ мм};$$

$$D_{cp5} = 250,4 \text{ мм}; D_{cp6} = 249,2 \text{ мм}.$$

С помощью уравнений (4.74), (3.16) находим величину коэффициентов уширения в овальных и круглых калибрах:

$$c_{y1} = 0,206; c_{y2} = 0,231; c_{y3} = 0,260;$$

$$c_{y4} = 0,276; c_{y5} = 0,307; c_{y6} = 0,318.$$

Средняя длина горизонтальной проекции дуги захвата:

$$l_1 = \sqrt{\frac{183,9 \cdot 0,384 \cdot 247,0}{3,4 \cdot 8,2 \cdot 0,794}} = 28,1 \text{ мм}; l_2 = 32,4 \text{ мм};$$

$$l_3 = 23,6 \text{ мм}; l_4 = 27,1 \text{ мм}; l_5 = 20,4 \text{ мм}; l_6 = 23,2 \text{ мм}.$$

Подставляя найденные значения  $y_{0i}, D_i, D_{cpi}, l_i, \lambda_i$  в выражения (2.34), (2.36), вычисляем величину катающих диаметров в клетях (коэффициент трения на контакте металла с валками принимаем равным 0,3):

$$D_{K1} = 245,4 \left[ 1 + \frac{2}{\pi} \frac{8,2}{245,4} \left( 1 - \frac{28,1}{0,3 \cdot 247,0} \right) \sqrt{0,384 \frac{247,0}{4,15 \cdot 5,3}} \right] = 252,1 \text{ мм},$$

$$D_{K2} = 242,9 \left[ 1 + \frac{2}{\pi} \frac{4,9}{242,9} \left( 1 - \right. \right.$$

$$\left. - \frac{32,4}{0,3 \cdot 245,1} \right) \sqrt{0,356 \frac{245,1}{6,55}} \right] = 249,3 \text{ мм}.$$

Аналогичным образом находим величину катающих диаметров для всех остальных клетей стана:

$$D_{K3} = 253,9 \text{ мм}; D_{K4} = 251,3 \text{ мм};$$

$$D_{K5} = 254,4 \text{ мм}; D_{K6} = 252,6 \text{ мм}.$$

Сравнивая эти значения катающих диаметров с величиной диаметров валков в точке с координатами  $y_0, z_0 (D_{y0})$ , видим, что во всех клетях  $D_K > D_{y0}$ . Уточненные значения катающих диаметров найдем, используя выражение (2.39). Величину поправочного коэффициента  $\delta$  для каждой клетки определяем с помощью графика на рис. 11:

$$\delta_1 = 1,49; \delta_2 = 1,20; \delta_3 = 1,70; \delta_4 = 1,30; \delta_5 = 1,90; \delta_6 = 1,42.$$

Уточненные значения катающих диаметров:

$$D_{K1} = 245,4 \left[ 1 + \left( \frac{252,1}{245,4} - 1 \right) 1,49 \right] = 255,4 \text{ мм};$$

$$D_{K2} = 250,6 \text{ мм}; D_{K3} = 258,1 \text{ мм}; D_{K4} = 252,9 \text{ мм};$$

$$D_{K5} = 258,7 \text{ мм}; D_{K6} = 254,5 \text{ мм}.$$

Подставляя найденные величины катающих диаметров в выражения (4.127), вычисляем новые значения площадей сечения металла по клетям:

$$F_5 = 63,0 \frac{254,5}{258,7} = 62,0 \text{ мм}^2; F_4 = 78,5 \frac{254,5}{252,9} = 79,0 \text{ мм}^2;$$

$$F_3 = 102,3 \frac{254,5}{258,1} = 100,9 \text{ мм}^2; F_2 = 132,9 \frac{254,5}{250,6} = 135,2 \text{ мм}^2;$$

$$F_1 = 182,1 \frac{254,5}{255,4} = 181,5 \text{ мм}^2.$$

Диаметры круглых калибров:

$$d_2 = 13,1 \text{ мм}; d_4 = 10,0 \text{ мм}; d_6 = 8,0 \text{ мм}.$$

Величины частных суммарных вытяжек и вытяжек в клетях:

$$\lambda_{\Sigma 1,2} = \frac{254,5}{135,2} = 1,882; \lambda_{\Sigma 3,4} = \frac{135,2}{79,0} = 1,711;$$

$$\lambda_{\Sigma 5,6} = \frac{79,0}{50,3} = 1,571.$$

$$\lambda_1 = \frac{254,5}{181,5} = 1,402; \lambda_2 = 1,342; \lambda_3 = 1,340;$$

$$\lambda_4 = 1,277; \lambda_5 = 1,274; \lambda_6 = 1,233.$$

С помощью выражений (4.79), (4.78) находим новые значения коэффициентов  $a_i$  и  $\psi_i$ :

$$a_1 = 3,87; \psi_1 = 0,816; a_3 = 3,47;$$

$$\psi_3 = 0,814; a_5 = 3,22; \psi_5 = 0,813.$$

Затем полностью повторяем расчет катающих диаметров и далее до получения новых значений площадей сечения металла и вытяжек в клетях. Вычисления продолжаем до тех пор, пока значения вытяжек при данном и предыдущем приближениях не будут достаточно близки между собой. На последних операциях приближения величины коэффициентов  $a_i$  и  $\psi_i$ , найденные с помощью зависимостей (4.78), (4.79), целесообразно проверить решением исходных уравнений (4.75), (4.76).

После этого по аналогии с предыдущим примером принимаются величина углов выпуска и зазоров между валками и определяются остальные размеры: ширина калибров, глубина и ширина вреза в валки.

Частоту вращения валков последней клетки определяем по формуле:

$$n_6 = \frac{60 v_6}{\pi D_{к6}} = \frac{60 \cdot 10 \cdot 10^3}{\pi \cdot 254,5} = 750 \text{ об/мин.}$$

Частота вращения валков предыдущих клеток:

$$n_5 = \frac{750}{1,253} = 599 \text{ об/мин; } n_4 = \frac{750}{1,253 \cdot 1,246} = 480 \text{ об/мин;}$$

$$n_3 = 368 \text{ об/мин; } n_2 = 284 \text{ об/мин; } n_1 = 207 \text{ об/мин.}$$

В такой же последовательности выполняется расчет калибровки валков трехвалковых блоков, имеющих систему калибров стрелчатый треугольник — круг.

## 5. СИСТЕМЫ ТРЕХВАЛКОВЫХ КАЛИБРОВ

**Пример.** Рассчитать калибровку валков трехвалкового блока для прокатки катанки диаметром 10 мм из заготовки круглого сечения. Прокатываемый материал — алюминий марки А7Е, температура начала прокатки 500°C, скорость выхода полосы из последней клетки 12 м/с, в качестве технологической смазки используется эмульсия жирностью 4 — 7 %. Число клеток в блоке 8, идеальный диаметр валков 300 мм, отношение скоростей вращения валков соседних клеток постоянно для всех клеток блока и равно 1,25. Необходимо определить площади сечения полосы и размеры калибров во всех клетях блока, а также диаметр исходной заготовки.

Принимаем, что схема калибровки валков первых пяти клеток блока представляет собой систему плоских треугольных калибров, калибр шестой клетки — черновой (подготовительный) круг, калибры седьмой и восьмой клеток — соответственно стрелчатый треугольник и чистовой круг диаметром 10 мм.

Определяем площади сечения полосы по клетям, принимая, что во всех калибрах вытяжка равна кинематическому коэффициенту скорости ( $\lambda = 1,25$ ):

$$F_8 = 78,5 \text{ мм}^2; \dot{F}_7 = 1,25 \cdot 7,85 = 98,2 \text{ мм}^2;$$

$$F_6 = 122,7 \text{ мм}^2; F_5 = 153,4 \text{ мм}^2; F_4 = 191,7 \text{ мм}^2;$$

$$F_3 = 239,7 \text{ мм}^2; F_2 = 299,6 \text{ мм}^2; F_1 = 374,5 \text{ мм}^2.$$

Определяем диаметр круглого калибра 6-ой клетки, а также диаметры приведенных кругов для клеток (№ 1 — 5) с плоскими треугольными калибрами:

$$d_{пр1} = \sqrt{\frac{4}{\pi} 374,5} = 21,8 \text{ мм; } d_{пр2} = 19,5 \text{ мм;}$$

$$d_{пр3} = 17,5 \text{ мм; } d_{пр4} = 15,6 \text{ мм;}$$

$$d_{пр5} = 14,0 \text{ мм; } d_{пр6} = 12,5 \text{ мм.}$$

Принимая в качестве начального приближения, что коэффициент  $\alpha$  для всех треугольных калибров равен единице, из соотношений (4.111) найдем начальные значения диаметров треугольных калибров и диаметров валков клеток № 1 — 6.

$$d_1 = d_{пр2} = 19,5 \text{ мм; } d_2 = 17,5 \text{ мм;}$$

$$d_3 = 15,6 \text{ мм; } d_4 = 14,0 \text{ мм; } d_5 = 12,5 \text{ мм;}$$

$$D_1 = 280,5 \text{ мм; } D_2 = 282,5 \text{ мм; } D_3 = 284,4 \text{ мм;}$$

$$D_4 = 286,0 \text{ мм; } D_5 = 287,5 \text{ мм; } D_6 = 287,5 \text{ мм.}$$

Подставляя значения  $d_i$  и  $D_i$  в выражение (4.114) и принимая с учетом заданных условий прокатки величину коэффициента  $A$  равной 4,5, получим при  $\lambda = \eta$ :

$$c_{y1} = \frac{1}{1 + \frac{25 \cdot 4,5 \cdot 1,25 \cdot 19,5}{4 \cdot 1,25 \cdot 19,5 + 280,5}} = 0,121; c_{y2} = 0,131;$$

$$c_{y3} = 0,142; c_{y4} = 0,153; c_{y5} = 0,166.$$

Из выражения (4.115), считая, что вытяжка в первой клетке также равна 1,25, находим уточненные значения коэффициента  $\alpha$ , диаметров треугольных калибров и диаметров валков клеток № 1 — 5:

$$\alpha_1 = 1,35 \sqrt{\frac{1,25 (1 - 0,121 \cdot 1,25)}{0,879 (4 \sqrt{1,25 - 2,25})}} = 0,995;$$

$$\alpha_2 = 0,993; \alpha_3 = 0,991; \alpha_4 = 0,989; \alpha_5 = 0,987;$$

$$d_1 = 0,995 \cdot 19,5 = 19,4 \text{ мм; } d_2 = 0,993 \cdot 17,5 = 17,4 \text{ мм;}$$

$$d_3 = 15,5 \text{ мм; } d_4 = 13,8 \text{ мм; } d_5 = 12,3 \text{ мм;}$$

$$D_1 = 280,6 \text{ мм; } D_2 = 282,6 \text{ мм; } D_3 = 284,5 \text{ мм;}$$

$$D_4 = 286,2 \text{ мм; } D_5 = 287,7 \text{ мм.}$$

Размеры стрелчатого треугольного калибра седьмой клетки определяем с помощью приближенных выражений (4.95), (4.96) при  $\lambda_7 = \lambda_8 = 1,25$  и  $D_8/d_8 = 29,0$ :

$$a_7 = 1 + 0,13 (20 + \sqrt{29}) (1,25^2 - 0,55)^4 = 4,468;$$

$$\psi_7 = 1 - 0,035 \sqrt[3]{\frac{3,468}{4,468}} 0,25^2 \frac{(4 + 29)^2}{4,5^2} = 0,952.$$

$$\text{Отсюда } d_7 = 0,952 \cdot 10 = 9,5 \text{ мм, } D_7 = 290,5 \text{ мм.}$$

С помощью уравнений (4.126), принимая, что в каждой клетке величина катающего диаметра равна диаметру валка по дну калибра, вычисляем уточненные значения площадей металла и вытяжек в калибрах:

$$F_7 = 98,2 \frac{290,0}{290,5} = 98,0 \text{ мм}^2; F_6 = 122,7 \frac{290,0}{287,5} = 123,8 \text{ мм}^2;$$

$$F_5 = 153,4 \frac{290,0}{287,7} = 154,6 \text{ мм}^2; F_4 = 191,7 \frac{290,0}{286,2} = 194,2 \text{ мм}^2;$$

$$F_3 = 244,3 \text{ мм}^2; F_2 = 307,4 \text{ мм}^2; F_1 = 387,0 \text{ мм}^2.$$

Отсюда:

$$\lambda_2 = 1,259; \lambda_3 = 1,258; \lambda_4 = 1,258;$$

$$\lambda_5 = 1,256; \lambda_6 = 1,249; \lambda_7 = 1,263;$$

$$\lambda_8 = 1,248; \lambda_{\Sigma 7,8} = \frac{123,8}{78,5} = 1,577.$$

Как показала числовая проверка, коэффициенты уширения в треугольных калибрах при уточненных значениях вытяжек имеют ту же величину, что и при предыдущей итерации (при  $\lambda = \eta$ ).

Принимая  $\lambda_1 = 1,25$ , с помощью выражений (4.111), (4.113) находим новые значения диаметров калибров клеток № 1 – 6:

$$d_1 = 1,35 \sqrt{\frac{4}{\pi}} 307,4 \frac{1,250 (1 - 0,121 \cdot 1,250)}{0,879 (4 \sqrt{1,250} - 2,250)} = 19,7 \text{ мм};$$

$$d_2 = 17,5 \text{ мм}; d_3 = 15,6 \text{ мм}; d_4 = 13,9 \text{ мм};$$

$$d_5 = 12,4 \text{ мм}; d_6 = 12,6 \text{ мм}.$$

Размеры стрелчатого треугольного калибра при  $\lambda_7 = 1,263$  и  $\lambda_8 = 1,248$  будут:

$$a_7 = 1 + 0,13 (20 + \sqrt{29}) (1,577 - 0,55)^4 \left(\frac{0,248}{0,263}\right)^2 = 4,27,$$

$$\psi_7 = 1 - 0,035 \sqrt{\frac{3,27}{4,27}} 0,248^2 \frac{33^2}{4,5^2} = 0,952; d_7 = 9,5 \text{ мм}.$$

Коэффициенты уширения в клетях 6 – 8 определяем с помощью уравнений (3.19) и (4.92):

$$c_{y6} = \frac{1}{1 + \frac{90 \cdot 4,5 \cdot 12,6}{4 \cdot 12,6 + 287,6}} = 0,062;$$

$$c_{y8} = \frac{1}{1 + \frac{90 \cdot 4,5 \cdot 10}{4 \cdot 10 + 290}} = 0,075;$$

$$c_{y7} = \frac{1}{1 + \frac{25 \cdot 4,5 \cdot 10 \sqrt{1,577}}{4 \cdot 10 \sqrt{1,577} + 290} [1 + 20 \frac{45}{4,27^2} (\frac{\sqrt{1,577}}{0,952} - 1)^2]} = 0,136.$$

Среднюю ширину зоны контакта в калибрах системы треугольник – треугольник, за исключением первой клетки, находим из выражения (2.53).

Для первой клетки

$$2y_{01} = d_1 \sqrt{\frac{d_0^2}{d_1^2}} - 1,$$

где  $d_0$  – диаметр заготовки.

При  $\lambda_1 = 1,250$  получим  $d_0 = 24,8$  мм;  $2y_{01} = 15,1$  мм.

Для остальных клеток с треугольными клетями имеем:

$$2y_{02} = \frac{2}{\sqrt{3}} (19,7 - \frac{17,5}{2}) = 12,6 \text{ мм}; 2y_{03} = 11,2 \text{ мм};$$

$$2y_{04} = 10,0 \text{ мм}; 2y_{05} = 8,9 \text{ мм}.$$

Величину  $2y_0$  для клеток № 6 – 8 вычисляем из выражений (2.54), (2.49), (2.52) и (2.50) соответственно:

$$2y_{06} = \frac{\sqrt{3}}{2} 12,4 [1 - \sqrt{\frac{1}{3} (\frac{12,6^2}{12,4^2} - 1)}] = 9,6 \text{ мм};$$

$$2y_{07} = \sqrt{12,6^2 - 9,5^2} \frac{(2 \cdot 4,27 - 1 - \frac{12,6^2}{9,5^2})^2}{4 (4,270 - 1)^2} = 9,4 \text{ мм};$$

$$2y'_{08} = 9,5 \sqrt{(\frac{10}{9,5})^2 - \frac{(2 \cdot 4,27 - 1 - \frac{10^2}{9,5^2})^2}{4 (4,270 - 1)^2}} = 3,6 \text{ мм};$$

$$2y_{08} = 9,5 \sin (\frac{\pi}{3} - \arcsin \frac{3,6}{9,5}) = 5,8 \text{ мм}.$$

Диаметр валка в точке с координатами  $y_0, z_0$  находим, используя выражения (2.26), (2.27)

$$D_{y06} = 287,4 + 12,6 [1 - \sqrt{1 - (\frac{9,6}{12,6})^2}] = 291,8 \text{ мм};$$

$$D_{y07} = 290,5 + 4,27 \cdot 9,5 [1 - \sqrt{1 - (\frac{9,4}{4,27 \cdot 9,5})^2}] = 291,6 \text{ мм};$$



$$D_{y08} = 291,9 \text{ мм.}$$

Средний диаметр валка в зоне деформации:

$$D_{cp6} = \frac{287,4 + 291,8}{2} = 289,6 \text{ мм;}$$

$$D_{cp7} = 291,1 \text{ мм; } D_{cp8} = 291,0 \text{ мм.}$$

Средняя длина горизонтальной проекции дуги захвата будет равна:

$$l_1 = \sqrt{\frac{387 \cdot 0,25 \cdot 280,3}{3 \cdot 15,1 \cdot 0,879}} = 26,1 \text{ мм; } l_2 = 26,2 \text{ мм;}$$

$$l_3 = 25,0 \text{ мм; } l_4 = 23,8 \text{ мм; } l_5 = 22,6 \text{ мм;}$$

$$l_6 = 20,3 \text{ мм; } l_7 = 19,0 \text{ мм; } l_8 = 21,0 \text{ мм.}$$

Величину катающих диаметров в клетях с плоскими треугольными калибрами определяем с помощью выражения (2.32). Для вычисления катающих диаметров в круглых калибрах клеток № 6, 8 и стрельчатом треугольном калибре клетки № 7 используем выражения (2.34), (2.36) и (2.39). Принимая коэффициент трения на контакте металла с валками равным 0,3, получим:

$$D_{K1} = 280,3 \left[ 1 + \frac{0,250}{4} \left( 1 - \frac{26,1}{0,3 \cdot 280,3} \right)^2 \right] = 288,6 \text{ мм;}$$

$$D_{K2} = 291,2 \text{ мм; } D_{K3} = 293,5 \text{ мм;}$$

$$D_{K4} = 295,7 \text{ мм; } D_{K5} = 297,6 \text{ мм.}$$

Начальные значения катающих диаметров клеток 6 -- 8 находим из выражений (2.34), (2.36):

$$D_{K6} = 295,3 \text{ мм; } D_{K7} = 295,0 \text{ мм; } D_{K8} = 295,3 \text{ мм.}$$

Сравниваем начальные значения катающих диаметров с диаметрами валков в точке с координатами  $y_0$ ,  $z_0$  и, поскольку во всех этих клетях  $D_K > D_{y0}$ , повторяем вычисления катающих диаметров с помощью выражения (2.39). Величину коэффициента  $\delta$  находим из графика на рис. 11:

$$\delta_6 = 1,30; \delta_7 = 2,65; \delta_8 = 1,90.$$

Уточненные значения катающих диаметров

$$D_{K6} = 297,7 \text{ мм; } D_{K7} = 302,4 \text{ мм; } D_{K8} = 300,1 \text{ мм.}$$

Подставив значения катающих диаметров в (4.127), получим новые значения площадей сечения полосы и вытяжек в клетях:

$$F_1 = 374,5 \frac{300,1}{288,6} = 389,4 \text{ мм}^2; F_2 = 299,6 \frac{300,1}{291,2} = 308,8 \text{ мм}^2.$$

$$F_3 = 245,1 \text{ мм}^2; F_4 = 194,5 \text{ мм}^2; F_5 = 154,7 \text{ мм}^2;$$

$$F_6 = 123,7 \text{ мм}^2; F_7 = 97,5 \text{ мм}^2;$$

$$\lambda_2 = 1,250; \lambda_3 = 1,260; \lambda_4 = 1,259; \lambda_5 = 1,258;$$

$$\lambda_6 = 1,253; \lambda_7 = 1,269; \lambda_8 = 1,242.$$

В соответствии с полученными величинами  $F_i$  и  $\lambda_i$  при тех же значениях коэффициентов уширения вычисляем новые значения диаметров калибров:

$$d_1 = 1,35 \sqrt{\frac{4}{\pi}} 308,8 \frac{1,26 (1 - 0,121 \cdot 1,26)}{0,879 (4 \cdot 1,26 - 2,26)} = 19,8 \text{ мм;}$$

$$d_2 = 17,5 \text{ мм; } d_3 = 15,6 \text{ мм; } d_4 = 13,9 \text{ мм;}$$

$$d_5 = 12,4 \text{ мм; } d_6 = 12,6 \text{ мм.}$$

Размеры стрельчатого треугольного калибра при  $\lambda_7 = 1,269$ ,  $\lambda_8 = 1,242$  равны  $a_7 = 3,96$ ;  $\psi_7 = 0,953$ .

Отсюда  $d_7 = 9,5$  мм;  $R_{обp7} = 19$  мм.

На этом расчет калибровки валков клеток № 2 -- 8 можно считать законченным, так как при последующих приближениях значения площадей металла по клетям и размеры калибров практически не изменяются.

Диаметр круглой заготовки находим из уравнения (4.118), решая его методом последовательных приближений. В результате решения получим  $d_0 = 23,4$  мм;  $F_0 = 430 \text{ мм}^2$ ;  $\lambda_1 = 1,104$ .

Так как найденный диаметр заготовки и величина вытяжки в первой клетке существенно отличаются от принятых на более раннем этапе вычислений, необходимо дополнительно корректировать расчет первого калибра и диаметр заготовки. При  $d_0 = 23,4$  мм и  $\lambda_1 = 1,104$  заново определяются ширина и длина зоны контакта металла с валками, величина катающего диаметра и площадь сечения металла в первой клетке, а затем из выражения (4.118) — новое значение диаметра заготовки. После этого вычисления повторяются при новых значениях  $F_1$  и  $d_0$  до тех пор, пока разница значений  $F_1$  и  $d_0$ , найденных при соседних приближениях, не будет превышать заданной погрешности.

Опуская промежуточные этапы вычислений, приведем здесь лишь окончательные результаты:

$$d_1 = 19,8 \text{ мм; } F_1 = 395 \text{ мм}^2; D_{K1} = 285 \text{ мм;}$$

$$d_0 = 23,7 \text{ мм; } F_0 = 441 \text{ мм}^2; \lambda_1 = 1,116.$$

Найденные значения диаметров плоских треугольных калибров необходимо проверить с помощью условия (4.116), размеры стрельчатого треугольного калибра — из условия (4.99).

Принимая величину зазора между валками равным  $0,1d_i$ , а угол выпуска круглых калибров —  $20^\circ$ , с помощью выражений (4.85), (4.86) и (4.97), (4.98) находим ширину и глубину вреза в валки круглых и стрельчатого треугольного калибра

$$b_{06} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{12,6}{\cos 20^\circ} - 1,3 \cos 40^\circ = 10,6 \text{ мм, } b_{p8} = 8,4 \text{ мм;}$$

$$h_{p6} = 6,3 \left( 1 - \frac{1}{2 \cos 20^\circ} \right) - 0,65 \sin 40^\circ = 2,5 \text{ мм},$$

$$h_{p8} = 2,0 \text{ мм}; h_{p7} = \frac{9,5}{8} (6,96 - 0,2 \sqrt{3}) [1 -$$

$$- \sqrt{1 - 12 \left( \frac{1 - 0,2/\sqrt{3}}{6,96 - 0,2\sqrt{3}} \right)^2} = 0,9 \text{ мм}; b_{p7} = 11,5 \text{ мм}.$$

Частоту вращения валков находим, исходя из заданной скорости прокатки в последней клети:

$$n_8 = \frac{60 \cdot 12 \cdot 10^3}{\pi \cdot 300,1} = 764 \text{ об/мин}, n_7 = \frac{764}{1,25} = 611 \text{ об/мин};$$

$$n_6 = 489 \text{ об/мин}, n_5 = 391 \text{ об/мин}, n_4 = 313 \text{ об/мин},$$

$$n_3 = 250 \text{ об/мин}, n_2 = 200 \text{ об/мин}, n_1 = 160 \text{ об/мин}.$$

Приведенные выше числовые примеры расчета различных систем вытяжных калибров не относятся к каким-либо конкретным прокатным станам и призваны лишь показать основные принципы практического использования изложенного здесь метода расчета калибровок валков и энергосиловых параметров прокатки. В случае выполнения расчетов с помощью ЭВМ представленные примеры, а также подробные описания алгоритмов расчета размеров калибров и предельных значений вытяжек, данные в гл. IV, V, позволяют существенно упростить составление соответствующих расчетных программ.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Буланов А.В., Скрябин С.А., Вольф Г.Н. Исследования влияния формы боковых внеконтактных зон раската на уширение при продольной прокатке и вальцовке. // Технология легких сплавов. 1980, № 8. С. 33 — 36.
- Диомидов Б.Б., Литовченко Н.В. Технология прокатного производства. — М.: Металлургия, 1979. — 488 с.
- Кацнельсон М.П., Серебриер В.П., Минкин А.В. Унифицированные прокатные станы литейно-прокатных агрегатов для катанки из цветных металлов. // Создание и исследование прокатных станов: Темат. сб. науч. тр./ВНИИметмаш — М.: Металлургия, 1980. С. 58 — 63.
- Минкин А.В., Дрозд В.Г. Исследования уширения стали при прокатке в вытяжных калибрах. // Прогрессивная технология и машины для обработки и отделки проката ВНИИметмаш. Темат. сб. науч. тр./ВНИИметмаш. — М.: Металлургия, 1986. С. 180 — 188.
- Минкин А.В., Ласкин А.В. Расчет калибровки трехвалковых проволочных блоков. // Черная металлургия: Бюл. НТИ. 1973. № 12. С. 45 — 48.
- Оптимизация расхода энергии в процессах деформации. А. Хензель, Т. Шпиттель, М. Шпиттель, М. Гайдук, И. Конвичный. Пер. с нем. — М.: Металлургия. — 1985. — 184 с.
- Первый отечественный литейно-прокатный агрегат медной катанки. // П.И. Софинский, А.Ю. Шевченко, А.В. Ласкин и др. Научные труды ВНИИметмаш. — М.: ВНИИметмаш. 1974. № 36. С. 92 — 99.
- Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: Справочник. — 2-е изд. перераб. и доп. — М.: Металлургия, 1983. — 351 с.
- Расчет усилий при непрерывной горячей прокатке. В.Н. Жучин, Г.С. Никитин, Я.С. Шварцбарт, И.Г. Зуев. — М.: Металлургия, 1986. — 198 с.
- Сапожников А.Я. Блоки чистовых клетей современных проволочных станов за рубежом. Металлургическое оборудование. — М.: ВНИИИИформтяжмаш, 1973, вып. 46. 47 с.
- Свет Д.Я. Температурное излучение металлов и некоторых веществ. — М.: Металлургия, 1964. 134 с.
- Смирнов В.К., Шилов В.А., Литвинов К.И. Деформация и усилия в калибрах простой формы. — М.: Металлургия, 1982. 144 с.
- Смирнов В.К., Шилов В.А., Инатович Ю.В. Калибровка прокатных валков. — М.: Металлургия, 1987. 368 с.
- Сортовые профили проката: Справочник. В.В. Лемпицкий, И.П. Шулаев, И.С. Тришевский и др. — М.: Металлургия, 1981. — 624 с.
- Теория прокатки: Справочник. А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин, А.В. Третьяков, Г.С. Никитин. — М.: Металлургия, 1982. — 335 с.
- Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением: Справочник. — М.: Металлургия, 1973. — 244 с.
- Хензель А., Шпиттель Т. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением: Справочник/Пер. с нем. — М.: Металлургия, 1982. — 360 с.
- Целиков А.И. Металлургические машины и агрегаты: настоящее и будущее. — М.: Металлургия, 1979. — 141 с.
- Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян С.Е. Теория продольной прокатки: Учебник для вузов. — М.: Металлургия, 1980. — 320 с.

Цоухер Г. Силовые воздействия при прокатке в вытяжных калибрах/Пер. с нем. — М.: Металлургиздат, 1963. — 208 с.

*Brauer H.* — Draht — Welt. 1971. № 12. S. 611 — 618.  
*Demny W.* — Draht — Welt. 1971. № 9. S. 433 — 444.  
*Frank G., Neumann H.* — Neue Hütte. 1982. Bd. 27. № 5. S. 163 — 169.  
*Hajduk M., Zidek M.* и др. — Hutnicke listy. 1972. № 8. S. 567 — 571.  
*Hensel A., Goldhahn G.* — Neue Hütte. 1981. Bd. 26. № 2. S. 51 — 55.  
*Niyama E.* и др. — Iron and Steel Engineer. 1981. № 8. S. 38 — 42.  
*Schmitz-Steger W.* — Draht — Welt. 1973. № 1. S. 17 — 31.

Производственное издание

**Адольф Васильевич МИНКИН**

# **РАСЧЕТ СИСТЕМЫ ВЫТЯЖНЫХ КАЛИБРОВ**

Редактор издательства **Т.А.Дьяконова**  
Художественный редактор **А.А.Якубенко**  
Технический редактор **Е.К.Астафьева**  
Корректоры **Т.Ф.Лобанова, Л.М.Зинченко**  
Обложка художника **Б.Г.Дударева**

Подписано в печать 16.08.89

Формат бумаги 60x90 1/16

Печать офсетная

Тираж 810 экз.

Усл.печ.л. 13,0

Заказ 2880

Усл.кр.-отт. 13,25

Цена 75 к.

ИБ 3300

T-15513

Бумага офсетная № 2

Уч.-изд.л. 14,92

Изд № 1548

Набрано в издательстве "Металлургия"  
на НПТ оператором **Л.В.Сизовой**

Ордена Трудового Красного Знамени  
издательство "Металлургия", 119857, ГСП, Москва, Г-34,  
2-й Обыденский пер., д.14

Московская типография № 9 НПО "Всесоюзная книжная палата"  
при Государственном комитете СССР  
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли  
109033, Москва, Волочаевская ул., 40