

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Институт повышения квалификации
и переподготовки

Кафедра «Металлургия и технологии обработки материалов»

ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА (прокатное и метизное производство)

ПОСОБИЕ

**для слушателей специальности переподготовки
1-42 01 71 «Металлургическое производство
и материалобработка»
заочной формы обучения**

Гомель 2023

УДК 621.77(075.8)
ББК 34.621я73
Т33

*Рекомендовано кафедрой «Металлургия
и технологии обработки материалов» ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 11 от 08.11.2022 г.)*

Составитель *Ю. Л. Бобарикин*

Рецензент: зав. каф. «Материаловедение в машиностроении» ГГТУ им. П. О. Сухого
канд. техн. наук, доц. *Ж. В. Кадолич*

Т33 **Теория** и технология металлургического производства (прокатное и метизное производство) : пособие для слушателей специальности переподготовки 1-42 01 71 «Металлургическое производство и материалобработка» заоч. формы обучения / сост. Ю. Л. Бобарикин. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2023. – 189 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Составлено в соответствии с учебной программой по дисциплине «Теория и технология металлургического производства». Рассмотрены теоретические основы прокатного и метизного производства.

Для слушателей специальности переподготовки 1-42 01 71 «Металлургическое производство и материалобработка» заочной формы обучения ИПКиП.

УДК 621.77(075.8)
ББК 34.621я73

© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2023

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ И НАЗНАЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ

Прокатка - процесс обработки металлов давлением, при котором обрабатываемый металл непрерывно пластически деформируется между приводными прокатными валками.

Прокатные валки обычно имеют цилиндрическую форму. Поверхность валков может быть гладкой, может иметь кольцевые ручьи различной формы и размеров. Иногда форма валков может быть полуцилиндрической, овальной, плоской (в виде цилиндрических валков бесконечно большого радиуса). Относительно простая схема деформации прокатки отличается достаточно сложной схемой напряжений и деформаций. Поэтому процесс прокатки постоянно изучается и совершенствуется.

Основное назначение прокатки - это приближение формы и размеров исходной заготовки к требуемым размерам и форме получаемого проката, а также получение требуемых механических свойств металла за счет специальных деформационных и температурных режимов прокатки и термической обработки.

В качестве заготовки используются слитки металла, получаемые литьем в изложницы; заготовки, получаемые на машинах непрерывного литья, а также прокатные заготовки, получаемые прокатным способом. Прокатная продукция используется в машиностроении, строительстве, авиастроении и судостроении и других отраслях.

Первое упоминание в летописях о процессе прокатки датируется 1495 годом и принадлежит Леонардо-да-Винчи. Он впервые описал этот процесс, привел схему устройства для прокатки. Впервые прокаткой начали обрабатывать серебро и золото, как наиболее раннее известные металлы. Из этих благородных раскатанных металлов изготавливали украшения и монеты. С появлением олова и свинца процесс прокатки распространился и на эти металлы. Из свинцового и оловянного раската изготавливали посуду, трубы и др. Современное подобие прокатка получила в 19 веке с появлением черных металлов, имеющих запас пластичности для обработки давлением. В настоящее время около 80% выплавляемых сталей обрабатываются прокаткой.

Продукцией металлопрокатного производства является прокат. Прокатная продукция или прокат может быть готовым изделием или полуфабрикатом. Прокатный полуфабрикат предназначен для дальнейшей обработки другими процессами прокатки. Вся современная прокатная продукция готовых изделий разделяется на 5 основных видов:

- сортовой прокат простого профиля (круглого, квадратного, шестигранного),
- сортовой прокат фасонного профиля (угловой, рельсовый, швеллерный, тавровый и других сложных геометрических форм),

- листовой прокат (горячекатаный, холоднокатаный, со специальными покрытиями),
- трубный прокат (бесшовные трубы, сварные трубы, нарезные трубы, трубы со специальными покрытиями),
- специальный прокат (шарики, ролики, колеса, кольца и гнутые профили, валы, оси, шестерни и другое).

Основные виды прокатных полупродуктов:

Блюм – крупная заготовка квадратного или прямоугольного сечения с соотношением сторон около единицы, используемая как заготовка в сортопрокатном производстве.

Сляб – крупная прокатная заготовка прямоугольного сечения с большой разницей размеров сторон сечения. Используется как заготовка в горячей листовой прокатке.

Основное принципиальное отличие прокатки металлов в валках от волочения металлов в волоках заключается в схеме приложения деформирующего усилия к обрабатываемому металлу.

Если приводной инструмент, то есть деформирующее усилие к металлу приложено через инструмент, то имеется процесс прокатки. В этом случае инструмент называют валками.

Если инструмент не приводной, то есть деформирующее усилие к металлу приложено не через инструмент, а приложено через протягивающее устройство, вытягивающее металл из инструмента, то имеется процесс волочения. В этом случае инструмент называют волоками (монолитными, роликовыми и др.). Часто в прокатке используют совмещение процесса с волочением, когда к прокатываемому металлу на выходе их валков приложена дополнительная протягивающая сила.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОРТАМЕНТА, ПРОФИЛЯ

Прокат – продукт прокатного производства. Он имеет разновидности, характеризующиеся сортаментом.

Сортамент прокатной продукции – совокупность профилей и размеров поперечных сечений проката.

Профиль прокатной продукции – это геометрическая форма контура поперечного сечения проката. Профиль может быть конечным (готовым) или промежуточным (полуфабрикатным, полупродуктом), используемым для дальнейшей обработки прокаткой.

Основная цель прокатного производства – это получение готового прокатного профиля с минимальными затратами.

Все прокатные профили можно разделить на следующие основные разновидности:

- сортовые профили;
- листовые профили;
- трубные профили;
- специальные профили.

В мировой прокатной индустрии наибольший объем выпуска принадлежит первым двум видам профилей.

К прокатной продукции также можно отнести профилировку листового металла. Профилировка выполняется на специальных профильных станах, основанная на формовке и изгибе листового профиля.

Основное отличие между профилировкой от прокатки состоит в отсутствии уменьшения поперечного сечения прокатного изделия.

В сортопрокатном производстве наиболее распространено изготовление простых профилей, то есть круглых, квадратных, иногда шестигранных сечений. К такой продукции относится арматурный профиль для железобетонных конструкций, круглый профиль различной продукции, в том числе катанка – заготовка для волочильного процесса. Реже получают квадратный и шестигранный профиль.

К фасонным сортовым профилям относят: уголок, швеллер, тавр, двутавр, рельс и другое.

Современная тенденция развития прокатного производства связана с наращиванием производительности прокатки.

Производительность можно повысить, повышая скорость вращения валков и увеличивая площадь сечения исходной заготовки. Чем больше площадь сечения заготовки и длина этой заготовки, тем большую длину получаем на готовом прокате.

Существует ограничение на скорость вращения валков, на сечение и длину исходной заготовки, поэтому используются методы оптимизации указанных параметров в соответствии с возможностями основного прокатного и нагревательного оборудования и вспомогательного оборудования.

Любая оптимизация производительности всегда должна согласовываться с качеством получаемой продукции.

В настоящее время все большее распространение получают литейно-прокатные агрегаты. Они состоят из модуля плавки и разливки металла и модуля прокатки отлитой заготовки. Причем литье и прокатка выполняются в непрерывном потоке.

Наиболее широко литейно-прокатные агрегаты распространены в листопрокатном производстве и в производстве проката из цветных металлов.

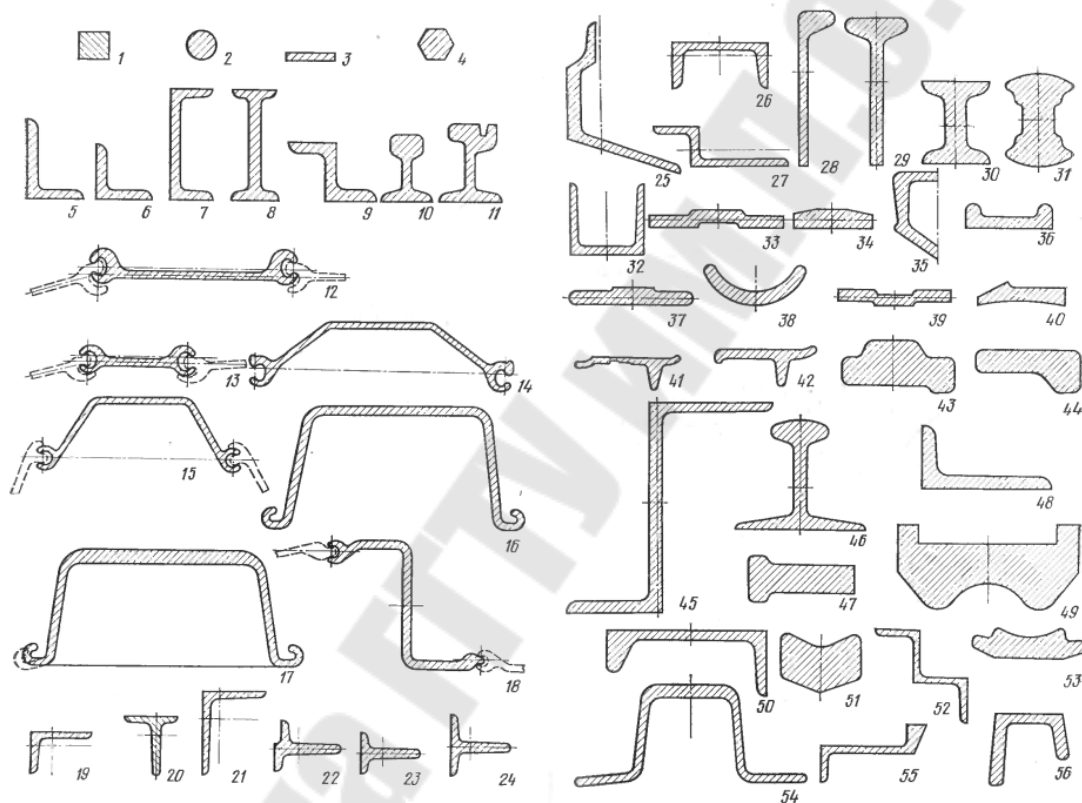


Рис. 1. Сортовые профили: 1 – квадрат; 2 – круг; 3 – полоса(прямоугольник); 4 – шестигранник; 5 – неравнобокий уголок; 6 – равнобокий уголок; 7 – швеллер; 8 – балка; 9 – зетовый профиль; 10 – рельс; 11 – трамвайный рельс; 12–56 – специальный фасонный профиль

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОКАНОГО СТАНА, ПРОКАТНОЙ КЛЕТИ, ПРИВОДА ПРОКАТНОЙ КЛЕТИ.

Прокатный стан – это комплекс основного и вспомогательного технологического оборудования, обеспечивающий хранение прокатной заготовки, её транспортировку, нагрев, прокатку в прокатных валках, термообработку и складирование. Таким образом, прокатный стан это цех, обеспечивающий весь цикл прокатного производства, начиная от складирования заготовки, заканчивая упаковкой готового профиля.

Основным технологическим оборудованием прокатного стана являются прокатные клетки. Их количество в прокатном стане может быть от одного до нескольких десятков.

Прокатная клетка – это конструкция, включающая станину и установленные на ней прокатные валки посредством механизма установки и регулировки положения прокатных валков. Прокатная клетка обеспечивает требуемое пространственное положение прокатных валков.

Основными узлами прокатной клетки являются:

- узел станины;
- узел прокатных валков с подушками, удерживающими валки в станине;
- устройство для регулировки зазора между валками.

Прокатные станы могут иметь различное количество прокатных клеток: от одной до сорока.

Каждая прокатная клетка имеет привод прокатных валков. Он может быть индивидуальный или групповой. Индивидуальный привод обеспечивает вращение одной пары валков от одного электродвигателя.

Индивидуальный привод обычно используется для проката крупных заготовок или сечений. Если сечение проката относительно невелико, то электродвигатель способен привести в движение несколько пар прокатных валков. В этом случае используется групповой привод прокатных клеток. От индивидуального привода отличается наличием многоступенчатого редуктора между прокатными клетками и электродвигателем. Редуктор распределяет момент вращения на все прокатные валки.

4. ОБЩАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОКАТКИ

В связи с большим разнообразием видов процесса прокатки их принято классифицировать по нескольким признакам классификации:

1. По температуре обрабатываемого материала:

- холодная прокатка;
- горячая прокатка.

При холодной прокатке температура обрабатываемого материала не превышает температуру его рекристаллизации. А при горячей – превышает.

Основное назначение холодной прокатки: форма изменяется без нагрева заготовки с упрочнением. Основным недостатком – относительно небольшие деформации исходной заготовки, ограничены перед упрочнением металла.

Горячая прокатка отличается повышенной степенью деформации исходной заготовки, расходы на нагрев, охлаждение, на утилизацию окалины и т.д.

В некоторых случаях используют теплую прокатку.

2. В зависимости от равенства распределения деформаций, температуры металла в контакте с 2-мя валками:

- симметричная прокатка;
- несимметричная прокатка.

При симметричной прокатке указанные параметры одинаковые для двух прокатных валков. Для несимметричной (асимметричной) такого равенства нет. Отсутствие симметрии прокатки может быть вызвано разницей диаметров прокатных валков, неравенством скоростей вращения валков, разницей температур на двух контактах валков, разницей чистоты обработки двух валков и т.д.

Строго говоря, абсолютной симметрии в практике прокатки не бывает. Всегда присутствуют приведенные отклонения в разной степени, поэтому на практике часто используют принудительное несоответствие симметрии прокатки, например: устанавливают разную величину диаметров валков на 5-10 мм. В этом случае отсутствует фактор случайной асимметрии и прокатка предсказуема. Возникновение случайной асимметрии компенсируют также другими способами:

- установка специальной привалковой арматуры;
- натяжение полосы.

Основное проявление асимметрии полосы: наличие изгиба или оковывание прокатываемой полосы вокруг валка.

3. В зависимости от наличия дополнительных усилий, действующих на полосы кроме как от прокатных валков:

- свободную прокатку;
- несвободную прокатку.

К дополнительным усилиям относится натяжение и подпоры полосы на входе и на выходе из прокатных валков.

4. В зависимости от направления деформации или в зависимости от кинематики схемы деформации металла:

- продольная;
- поперечная;
- винтовая.

5. В зависимости от назначения процесса прокатки:

- на процессы для получения полуфабрикатов;
- получение готового проката.

Полуфабрикаты – блюмы, слябы, крупные заготовки.

Готовый прокат – листовой, сортовой, трубный, специальный.

6. В зависимости от схемы движения полосы различают следующие виды прокатки:

- непрерывную;
- реверсивную.

Если стан сочетает в себе элементы непрерывной и реверсивной прокатки, то его называют полунепрерывным.

5. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОКАТКИ ПО КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СХЕМЕ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛА

В связи с большим разнообразием видов процессов прокатки используются несколько признаков классификации этих процессов.

В соответствии со схемой деформации заготовки в прокатных валках различают: *продольную, поперечную и винтовую прокатку*.

При продольной прокатке (рис.2) вектор линии скорости вращения валков на выходе из очага деформации направлен вдоль оси заготовки (продольно), заготовка совершает только поступательное движение. Это самая распространенная схема прокатки, используемая в сортовой, листовой, трубной прокатке и при прокатке специальных профилей. Приводными могут быть два валка или один.

При прокатке тонких профилей могут использоваться дополнительные опорные валки, которые обычно не приводные (рис. 3). Опорные валки имеют большой диаметр, количество их может достигать 24. Такая схема прокатки называется многовалковой. Чем больше количество опорных валков, тем меньше диаметр рабочего валка. Чем меньше диаметр рабочего валка, тем тоньше прокатываемое изделие.

Она снижает давление прокатки и позволяет получить тонкий и тончайший профиль, например фольгу.

При поперечной прокатке (рис. 4) вектор линейной скорости вращения валков направлен перпендикулярно (поперечно) оси заготовки. Заготовка совершает только вращательное движение и обжимается в радиальном направлении.

Деформация заготовки возможна при уменьшении зазора между валками. Изменение этого зазора обеспечивается сведением осей валков, непостоянными радиусами валков. Валки могут быть видоизменены до формы конической плиты.

Поперечная прокатка используется в заготовительных цехах, чаще в машиностроительных предприятиях. Предназначена для раскатки круглой исходной заготовки в определенную форму деталей вращения: ступени, вал, ось и т.д.

При винтовой (косой, поперечно-винтовой) прокатке (рис.5) вектор линейной скорости вращения валков направлен под углом $5-20^\circ$ к оси заготовки в точке касания поверхности валка и заготовки. Заготовка совершает одновременно вращательное и поступательное движение, т.е. винтовое движение. Схема используется в производстве бесшовных труб, шариков, роликов.

Таким образом, различие между продольной, поперечной и винтовой прокаткой заключается в расположении осей валков относительно оси заготовки (рис.6).

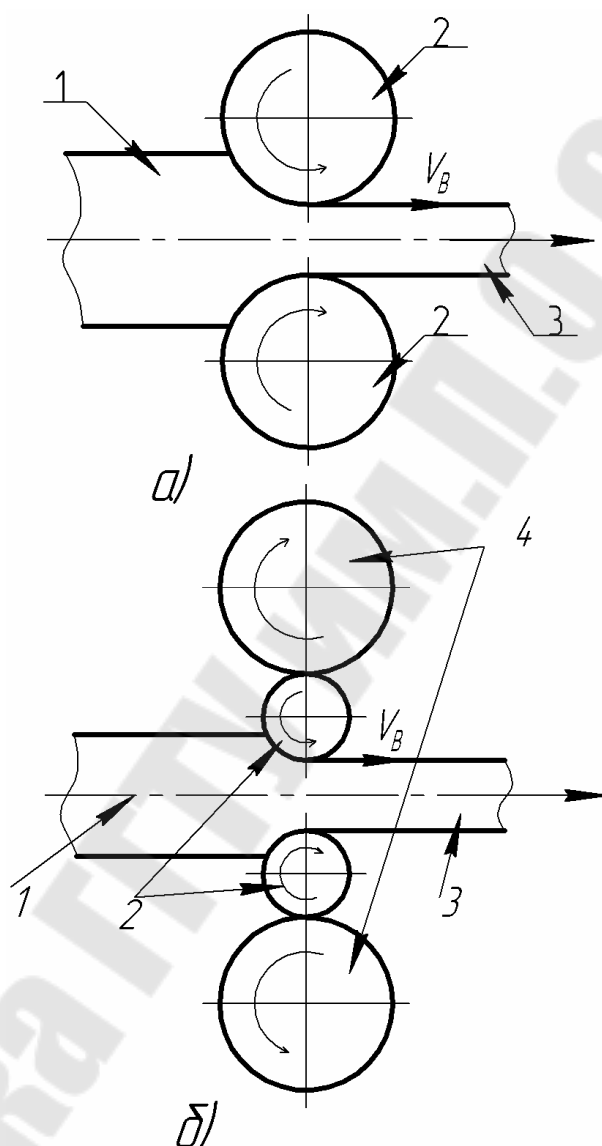


Рис. 2. Схемы продольной прокатки: *а* – двухвалковая прокатка: 1 – заготовка; 2 – прокатные валки; 3 – прокат; V_B – вектор линейной скорости вращения валков; *б* – четырехвалковая прокатка: 1 – заготовка; 2 – прокатные валки; 3 – прокат; 4 – опорные валки; V_B – вектор линейной скорости вращения валков

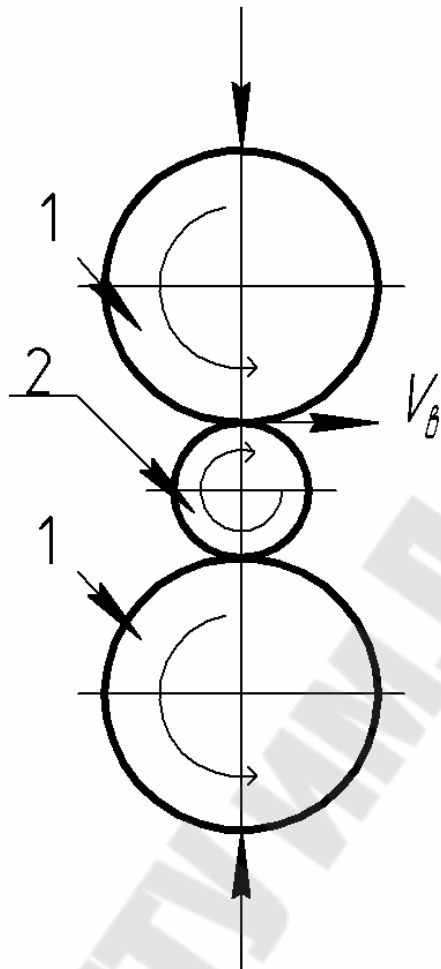


Рис. 3. Схема поперечной прокатки: 1 – прокатные валки; 2 – заготовка

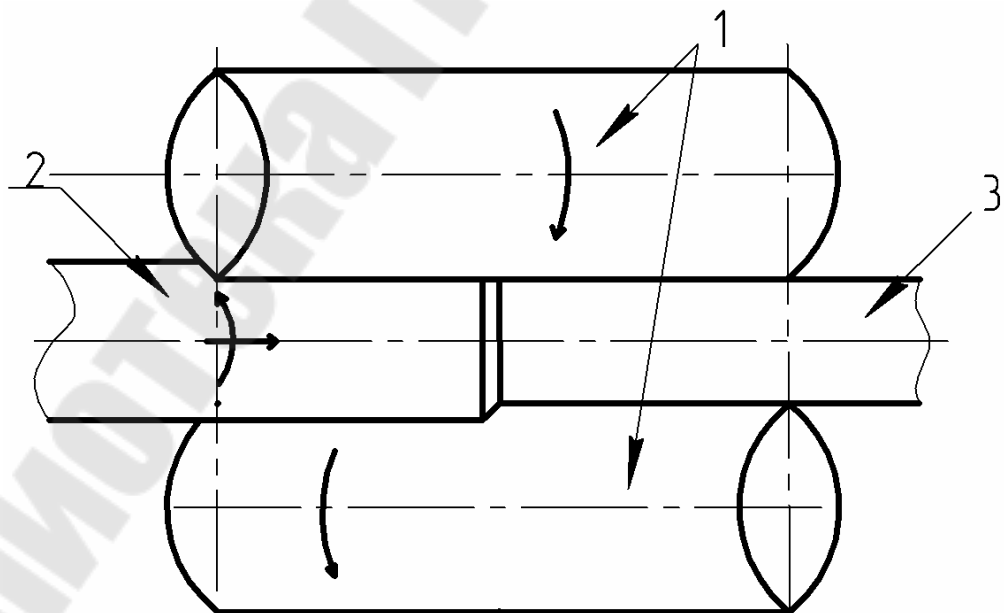


Рис. 4. Схема винтовой прокатки:
1 – прокатные валки; 2 – заготовка; 3 – прокат

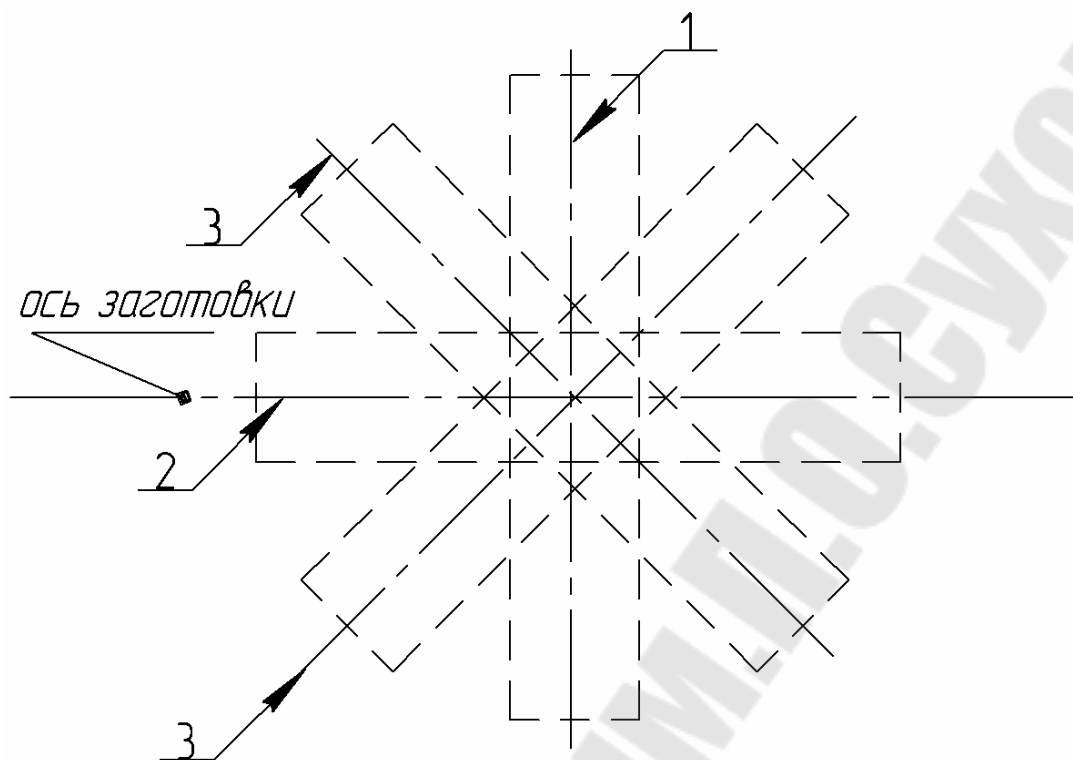


Рис.5. Схема расположения осей валков и заготовки:

1 – оси валков продольной прокатки; 2 – оси валков поперечной прокатки и ось заготовки; 3 – оси валков винтовой прокатки

6. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОКАТКИ ПО СХЕМЕ ПРОХОДА В ПРОКАТНЫХ КЛЕТЯХ.

В современном прокатном производстве одна клеть используется только в реверсивном цикле, то есть при возвратно-поступательном движении обрабатываемого металла с остановками между проходами металла через валки. Реверсивные одноклетьевые станы используются в производстве блюмов и слябов, в листопрокатном и трубном производстве.

Максимальную производительность можно получить с максимальным количеством прокатных клетей, расположенных в одну линию прокатки. В этом случае валки всех клетей вращаются в одном направлении. Заготовка деформируется одновременно в нескольких прокатных клетях. Она не останавливается после каждого прохода между валками. Такая прокатка называется непрерывной и самой перспективной.

В зависимости от схемы расположения прокатных клетей процессы прокатки бывают непрерывные, реверсивные и полунепрерывные. В непрерывных прокатных станах (рис. 6) одна заготовка одновременно деформируется в нескольких прокатных клетях или в нескольких прокатных валках.

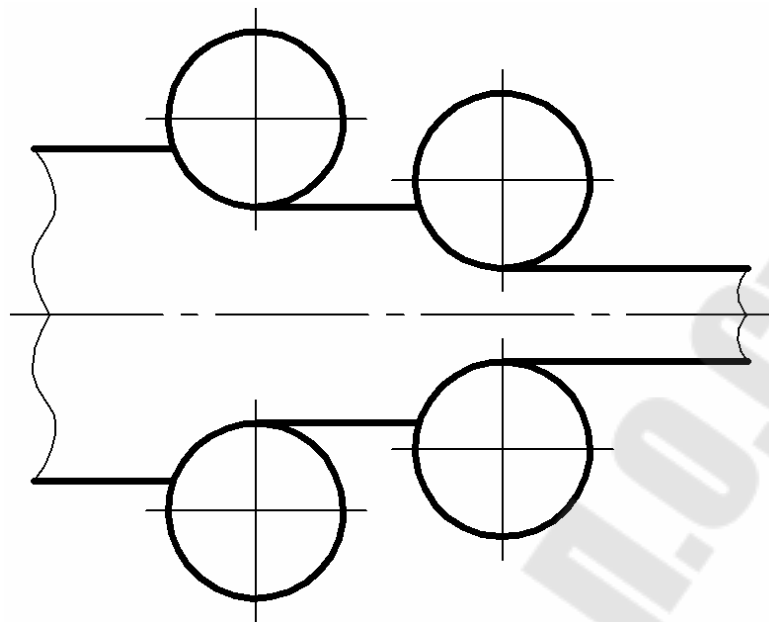


Рис. 6. Схема непрерывной прокатки

В линейном реверсивном прокатном стане (рис. 7) заготовка деформируется только в одной паре прокатных валков. После этой деформации наступает пауза, и заготовка подается на следующий цикл деформации одной пары валков. Современные линейные станы представляют собой одноклетьевые реверсивные прокатные станы, в которых валки совершают возвратное движение, деформируя заготовку с помощью возвратно поступательного движения. После каждого возвратного движения зазор между валками изменяется.

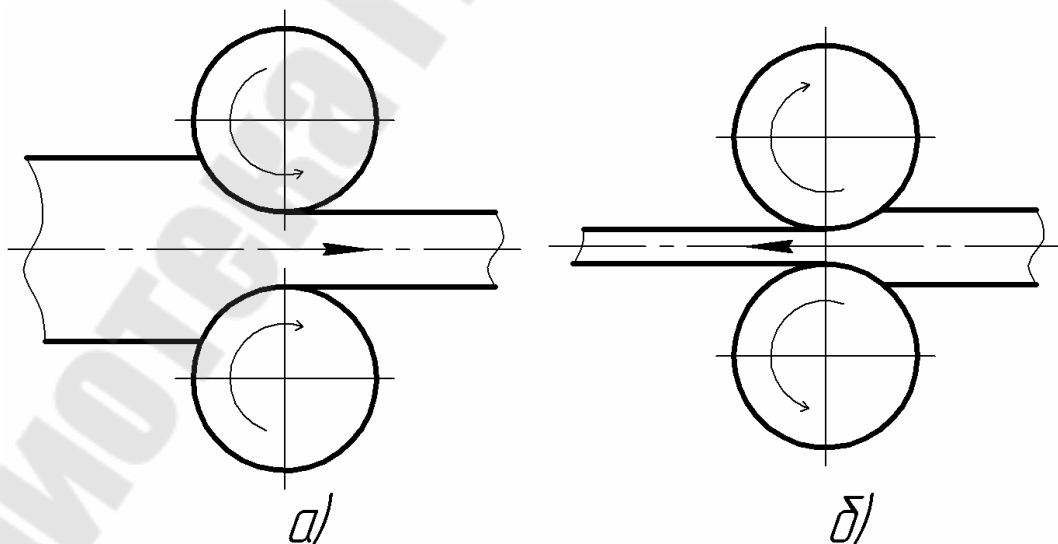


Рис. 7. Схема реверсивной прокатки:
a – проход прокатки прямой; *б* – проход прокатки обратный
 в этой же клетки

Непрерывные прокатные станы обладают повышенной производительностью, но требуют точного согласования скоростей вращения валков. Реверсивные станы этого согласования не требуют. Имеют низкую производительность и повышенную точность прокатки. Для комбинации этих свойств используют полунепрерывные прокатные станы, сочетающие в себе элементы непрерывной и реверсивной прокатки.

В сортопрокатном производстве в настоящее время используется преимущественно непрерывная прокатка.

В листопрокатном производстве для горячей прокатки также преимущественно применяется непрерывная прокатка.

Для холодно листового производства используют реверсивную прокатку.

В производстве бесшовных труб непрерывная продольная прокатка используется для раскатки черновых труб и для редуцирования чистовых труб.

7. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОКАТКИ ПО НАЗНАЧЕНИЮ

В зависимости от назначения все процессы прокатки можно разделить на две группы:

1 – процессы прокатки, предназначенные для получения готовой прокатки или чистовой продукции.

Примеры: чистовая горяче- или холоднокатаная труба, сортовой прокат, горяче- или холоднокатаный листовой прокат и т.п.

Чистовой прокат не обрабатываемый, далее прокатка.

2 – процессы прокатки предназначенные для получения полуфабриката (полупродукта).

Примеры: блюм, сляб, катанная заготовка.

Блюм – это крупная катанная заготовка, преимущественно квадратных сечений с размером сечения от 140×140 ÷ 450×450 мм. Получают на блюминге.

Блюминг – крупный одноклетевой реверсивный прокатный стан с диаметром валков от 300 ÷ 1500 мм.

Сляб – заготовка прямоугольного сечения с размером меньшей стороны профиля от 100 ÷ и размером большей стороны от 350 ÷ 1250 мм. Получают на слябинге.

Слябинг – крупный прокатный одноклетевой реверсивный прокатный стан с диаметром валков от 800 ÷ 1500 мм.

Основное различие между блюмингом и слябингом в том, что валки блюминга имеют на поверхности глубокие нарезанные ручьи (проточки).

Два валка блюминга при их сведении имеют на уровне ручьев калибры – просветы в зазоре между валками. Форма калибров обеспечивает получение квадратного сечения блюмов.

Валки слябинга калиброваны так, что позволяют после прокатки получить широкое прямоугольное сечение.

Заготовочный стан – это прокатный стан с диаметром валков от 500÷800 мм. Обычно работает по непрерывному принципу прокатки. Исходная заготовка – блюм, получаемый полуфабрикат имеет квадратное или круглое сечение с размером профиля от 50 ÷250 мм. Получаемая заготовка далее используется в сортопрокатном производстве.

Сортовые станы – предназначенные для прокатки простых и сложных фасонных профилей. Простые: круг, квадрат, прямоугольник, шестигранник.

Сортовые станы делятся на:

- крупносортные с диаметром валков 500÷950 мм. Предназначены для прокатки профиля с габаритами 80÷150 мм.

- мелкосортные с диаметром валков 150÷250 мм и размером получаемого сечения 4÷24 мм.

- среднесортные с диаметром валков 350÷500 мм и размером получаемого сечения 20÷80 мм.

К сортопрокатным станам также относятся проволочные прокатные станы. Они имеют диаметр валков 150÷250 мм, предназначены для прокатки катанки – заготовки для волочильного производства. Катанка может иметь диаметр от 4÷9 мм.

Листопркатный стан горячей прокатки предназначен для получения листа толщиной от 1,2÷16 мм и шириной 3000÷200 мм.

Листопркатное производство холодной прокатки предназначено для получения толщины листа 0,2÷4 мм, ширина листа – 1850 мм.

Фольгопркатный стан обеспечивает получение листового профиля толщиной 0,08÷0,1 мм.

Трубопркатный стан предназначен для холодно и горячекатаных трубных профилей с размером диаметра от 0,3÷2500 мм. Бесшовные трубы имеют диаметр 250 мм. Свыше этого значения получать бесшовную трубу не рационально в связи с ростом энергетических затрат. Поэтому все трубы больших диаметров – сварные.

Специальные прокатные станы предназначены для получения специальных профилей. Виды специальных станков: шаропркатные, колесопркатные, кольцепркатные и т.д.

8. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКИ

Рассмотрим схему простой продольной прокатки (рис.8), т.е. прокатка симметричная без натяжений и подпорков, варки цилиндрические.

Фактический очаг деформации – область деформированной заготовки, на которую распространяется пластическая деформация материала. Эта область значительно превышает объем геометрического очага деформации.

Если рассмотреть продольное сечение очага деформации, то можно определить сечение $abcdc'b'a'$. Эта линия описывает контур продольного сечения фактического очага деформации.

Геометрический очаг деформации – часть объема фактического очага деформации между двумя плоскостями, проходящими через точки c и b перпендикулярно оси заготовки.

Разница значения объема двух очагов может составлять от 20÷50%.

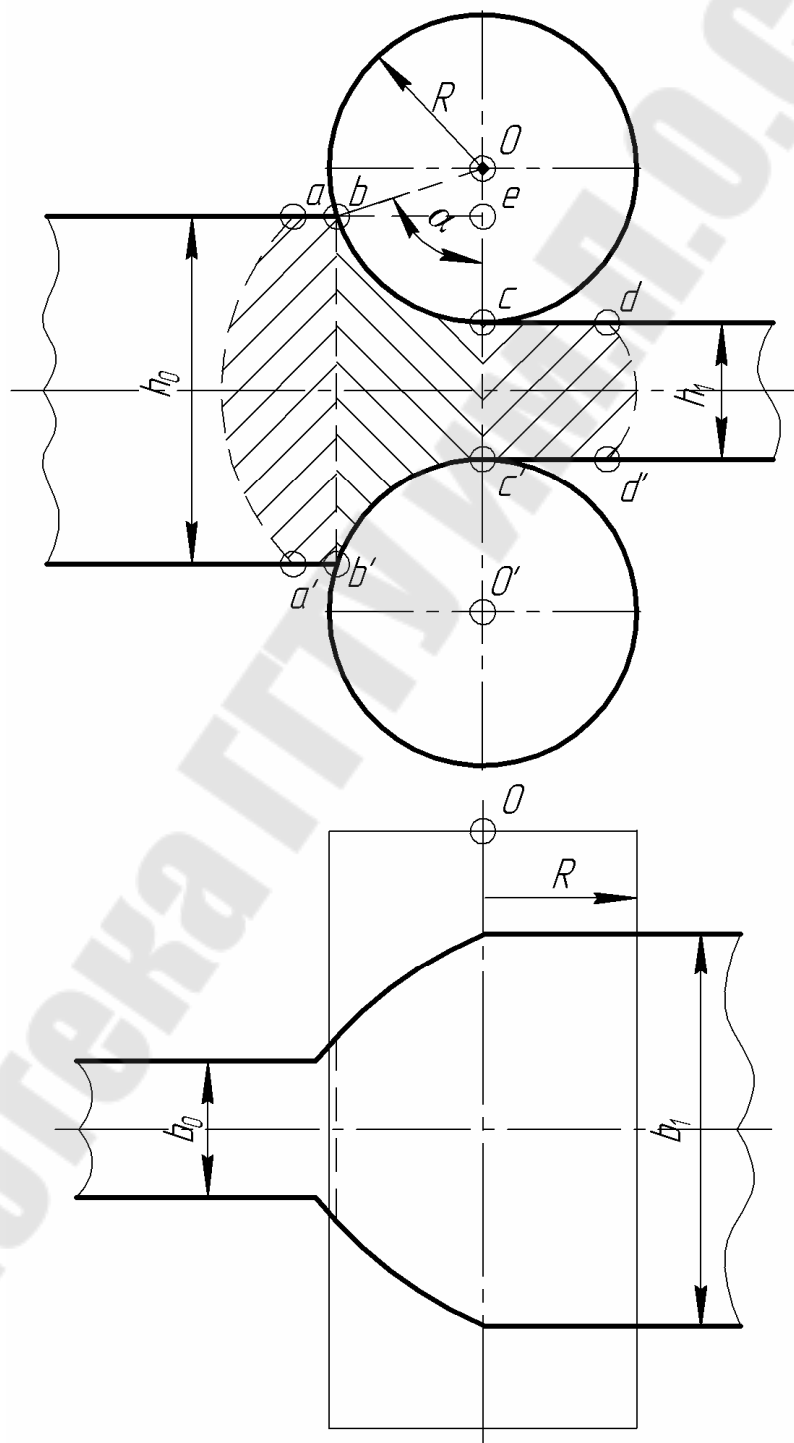


Рис. 8. Схема геометрических параметров очага деформации продольной прокатки

К геометрическим параметрам также относят:

- 1 – высоту и ширину полосы до прокатки (h_0, b_0);
- 2 – высоту и ширину полосы после прокатки (h_1, b_1);
- 3 – радиус прокатных валков (R);
- 4 – площадь поперечного сечения полосы до прокатки (F_0);
- 5 – площадь поперечного сечения полосы после прокатки (F_1);
- 6 – площадь поверхности контакта полосы с валком (F_k);
- 7 – угол прокатки (α);
- 8 – длина очага деформации (l);
- 9 – длина дуги контакта полосы с валком (l_g);
- 10 – длина хорды этого контакта (l_x).

В теории прокатки наибольший интерес представляют значения характерных длин очага деформации.

Рассмотрим вывод формулы для этих параметров:

Исходя из приведенного рисунка:

$$\frac{\Delta h}{2} = ec,$$

где: $\Delta h = h_0 - h_1$

$$\begin{aligned}\frac{\Delta h}{2} &= R - R \cos \alpha, \\ \frac{\Delta h}{2} &= R(1 - \cos \alpha).\end{aligned}$$

Исходя из того, что практические значения α не превышают 25° , можно ввести упрощение:

$$1 - \cos \alpha = 2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}.$$

Тогда:

$$\frac{\Delta h}{2} = 2R \sin^2 \frac{\alpha}{2}.$$

Или

$$\sin^2 \frac{\alpha}{2} = \frac{\Delta h}{4R}. \quad (1)$$

Исходя из практических значений α , можно ввести еще одно упрощение для острых углов:

$$\sin \alpha/2 \approx \alpha/2 \quad (2)$$

Тогда: $\frac{\alpha^2}{2} = \frac{\Delta h}{4R}$,

$$\alpha = \sqrt{\frac{\Delta h}{2R}} \quad (3)$$

Формула (3) широко используется в теории прокатки.

Несмотря на принятые упрощения, значение α полученное по (3) мало отличается от значений, полученных по точной формуле для α :

$$\alpha = 2 \arcsin \sqrt{\frac{\Delta h}{4R}}$$

Для расчета величины lg можно использовать формулу:

$$lg = \alpha \cdot R \quad (4)$$

С учетом (3) формула (4) получает вид:

$$lg = \sqrt{\frac{\Delta h}{2R}} \cdot R$$

$$lg = \sqrt{\Delta h \cdot R} \quad (5)$$

Рассмотрим формулу для длины хорды l_x :

$$l_x = 2 \cdot R \cdot \frac{\sin \alpha}{2}$$

С учетом допущения (2) получаем:

$$l_x = 2R \cdot \frac{\alpha}{2},$$

$$l_x = \alpha \cdot R$$

С учетом (3) имеем:

$$l_x = R \sqrt{\frac{\Delta h}{2R}} = \sqrt{\Delta h R} \quad (6)$$

Уравнения (5) и (6) определяют одинаковые значения lg и l_x . Таким образом в теории прокатки для малых углов α допускаются приравненные длины дуги контакта и хорды этой дуги.

Рассмотрим формулу для l :

$$l^2 = l_x^2 - \left(\frac{\Delta h}{2}\right)^2.$$

С учетом (6) получаем:

$$l = \sqrt{\Delta h R - \frac{\Delta h^2}{4}}, \quad (7)$$

В связи с тем, что $\frac{\Delta h^2}{4} \ll \Delta h R$, принимается еще одно упрощение для формулы (7):

$$\frac{\Delta h^2}{4} \approx 0.$$

Тогда формула (7) принимает вид:

$$l = \sqrt{\Delta h R}, \quad (8)$$

Таким образом, для малых значений α можно использовать упрощения: $lg \approx l_x \approx l$. Но для прокатки высокой точности иногда исключают принятые упрощения. Для большинства процессов горячей и холодной прокатки можно принять указанные допущения.

9. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ФОРМЫ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКИ

В зависимости от соотношения геометрических параметров очага деформации различают следующие основные виды (рис. 9):

1) Высокий очаг деформации: $h_{cp} > l$, $h_{cp} = \frac{h_0 + h_1}{2}$.

Характерно на блюмингах и заготовительных станах, сортовая прокатка.

2) Низкий очаг деформации: $h_{cp} < l$.

Характерно для листовой прокатки, встречается в сортовой прокатке, блюминги.

- 3) Широкий очаг деформации: $b_{cp} > l$, $b_{cp} = \frac{b_0 + b_1}{2}$.
 Встречается в прокатке широких листовых полос.
- 4) Узкий очаг деформации: $b_{cp} < l$.
 Встречается в сортовой прокатке, иногда при прокатке узких листовых полос.
- 5) Очаг деформации с высоким сечением: $h_{cp} > b_{cp}$.
 Встречается в прокатке блюмов, полос.
- 6) Очаг деформации с низким сечением: $h_{cp} < b_{cp}$.
 Встречается в листовой, сортовой прокатке.

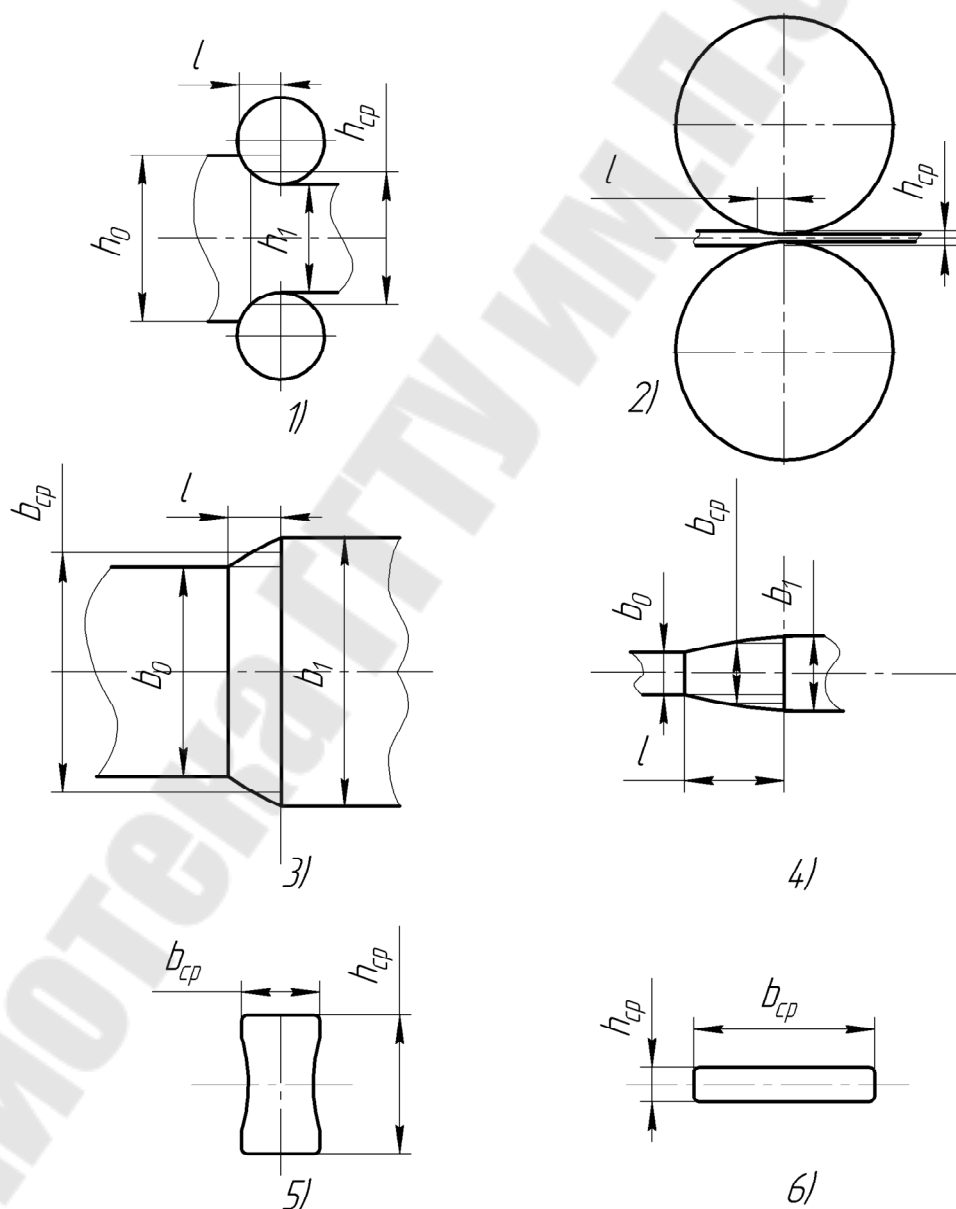


Рис. 9. Схемы очагов деформации: 1 – высокий очаг; 2 – низкий очаг;
 3 – широкий очаг; 4 – узкий очаг; 5 – очаг с высоким сечением;
 6 – очаг с низким сечением

10. ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКИ

Деформированное состояние очага деформации продольной прокатки (рис.10) соответствует схеме деформации объемного сжатия, таким образом, схема деформационного состояния прокатки следующая:

ε_h – деформация сжатия, обеспечиваемая сжимающим действием прокатных валков.

ε_b – деформация уширения металла.

ε_l – деформация удлинения.

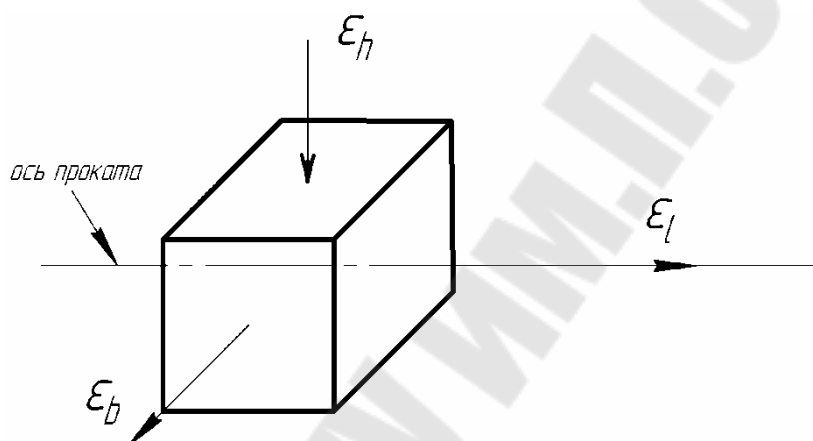


Рис. 10. Схема деформированного состояния очага деформации

Появление деформаций ε_l , ε_b , ε_h объясняет действие закона постоянства объема пластично деформируемого материала. То есть, объем сжатого материала по высоте перераспределяется в длину и ширину полосы, что вызывает рост значений длины и ширины полосы. На основании постоянства объема можно записать равенство:

$$\varepsilon_b + \varepsilon_l - \varepsilon_h = 0 .$$

Отрицательный знак величины ε_h указывает на сжимающий характер этой деформации и наоборот знак “+” указывает на растягивающий характер деформации.

Для описания трех главных деформаций прокатки используются абсолютные, относительные и истинные (логарифмические) показатели деформации.

Абсолютные показатели при прокатке:

- 1) Абсолютное обжатие Δh : $\Delta h = h_1 - h_0$.
- 2) Абсолютное удлинение (вытяжка) Δl : $\Delta l = l_1 - l_0$.
- 3) Абсолютное уширение Δb : $\Delta b = b_1 - b_0$.

Абсолютные деформации не раскрывают относительной картины, характеризующей деформации. Поэтому чаще используют для

геометрической характеристики. Более точными показателями деформации являются относительные деформации:

1) Относительное обжатие $\varepsilon_h : \varepsilon_h = \frac{\Delta h}{h_0}$.

2) Относительное уширение $\varepsilon_b : \varepsilon_b = \frac{\Delta b}{b_0}$.

3) Относительное удлинение (вытяжка) $\varepsilon_l : \varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l_0}$.

Кроме показателей относительной деформации используют коэффициенты деформации:

1) Коэффициент обжатия η :

$$\eta = \frac{h_1}{h_0}.$$

2) Коэффициент уширения ζ :

$$\zeta = \frac{b_1}{b_0}.$$

3) Коэффициент удлинения (вытяжки) $\lambda = \mu$:

$$\lambda = \mu = \frac{l_1}{l_2}.$$

Деформационные коэффициенты связаны между собой: $\eta \cdot \zeta \cdot \mu = 1$.

Это связано с действием закона постоянства объема пластичного деформируемого тела.

Из приведенных коэффициентов и параметров относительной деформации, наиболее используемые в практике ε_h и μ .

Величина ε_h принимается в расчетах по модулю, то есть положительной.

Величина μ определяется по зависимости:

$$\mu = \frac{F_0}{F_1},$$

где F_1, F_0 – площади поперечных сечений полосы до и после прокатки.

Относительные деформационные показатели и коэффициенты также имеют свои недостатки, связанные с отсутствием свойства аддитивности (сложения) частной деформации в одну суммарную, то есть если тело пластически деформируется в несколько этапов, то сумма отдельных значений относительных деформаций каждого этапа не будет равной значению одной общей относительной деформации тела. Для устранения

этого недостатки при многократной деформации используются истинные или логарифмические показатели деформации:

1) Истинное обжатие ε_h^i :

$$\varepsilon_h^i = \int \frac{dh}{h},$$

$$\varepsilon_h^i = \int \frac{dh}{h} = \ln h_1 - \ln h_0 = \frac{\ln h_1}{h_0}.$$

По аналогии с истинным обжатием получаем истинную вытяжку и истинное уширение, то есть:

2) Истинная вытяжка $\varepsilon_l^i = \frac{\ln l_1}{l_0}$,

3) Истинное уширение $\varepsilon_b^i = \frac{\ln b_1}{b_0}$.

Формула для истинного обжатия дает отрицательное значение расчетных величин, указывая на деформацию сжатия. В практических расчетах используют модуль этой величины, поэтому для вычисления степени истинной деформации можно использовать формулу:

$$\varepsilon_h^i = \frac{\ln h_0}{h_1}.$$

В современных компьютерных вычислительных системах используются логарифмические или истинные показатели деформации.

11. СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ УШИРЕНИЕМ И УДЛИНЕНИЕМ ПРИ ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКЕ

Величина деформации прокатываемой полосы в направлении ширины оказывает влияние на размер и форму получаемого сечения. Такое же влияние имеет деформация полосы на высоте, но деформация по высоте определяется размером зазора между валками, а деформация уширения зависит от большого количества факторов прокатки. Уширение – самая неконтролируемая деформация при прокатке.

Если точно определять влияние факторов прокатки на эту деформацию, то можно получать сечение полосы с высокой точностью.

Рассмотрим причины возникновения деформации уширения:

1) Узкий очаг деформации (рис 11).

В соответствии с зазором наименьшего сопротивления при пластической деформации очаг деформации разделяется на зоны 1 и 2. Направление пластического течения металла из зон 1 обеспечивает деформацию уширения, а зон 2 - деформацию удлинения полосы. Из рисунка

видно: объем зоны 1 больше, чем объем 2, поэтому для узких очагов деформация уширения больше, чем деформация удлинения. Стрелки, указывающие направление пластического течения перпендикулярны контурной линии очага деформации.

2) Широкий очаг деформации (рис. 12):

Объем зон 1 меньше объема зон 2, поэтому деформация уширения меньше деформации удлинения. Из приведенного анализа следует вывод: для точного определения деформации уширения необходимо установить соотношение между удлинением и уширением и точно рассчитать одну из деформаций. Соотношение между удлинением и уширением называется показателем уширения (каппа):

$$\chi = \frac{\Delta b}{\Delta l} \dots$$

При прокатке изменяется в пределах 0...1, то есть предельное соотношение $\frac{\Delta b}{\Delta l} = 1$, то есть $\Delta b = \Delta l$, эта предельная величина используется преимущественно теоретически. На практике такие схемы прокатки отсутствуют, но теоретически возможны. Второй предел величины является 5, то есть абсолютное уширение не может превышать абсолютное удлинение более, чем в 5 раз.

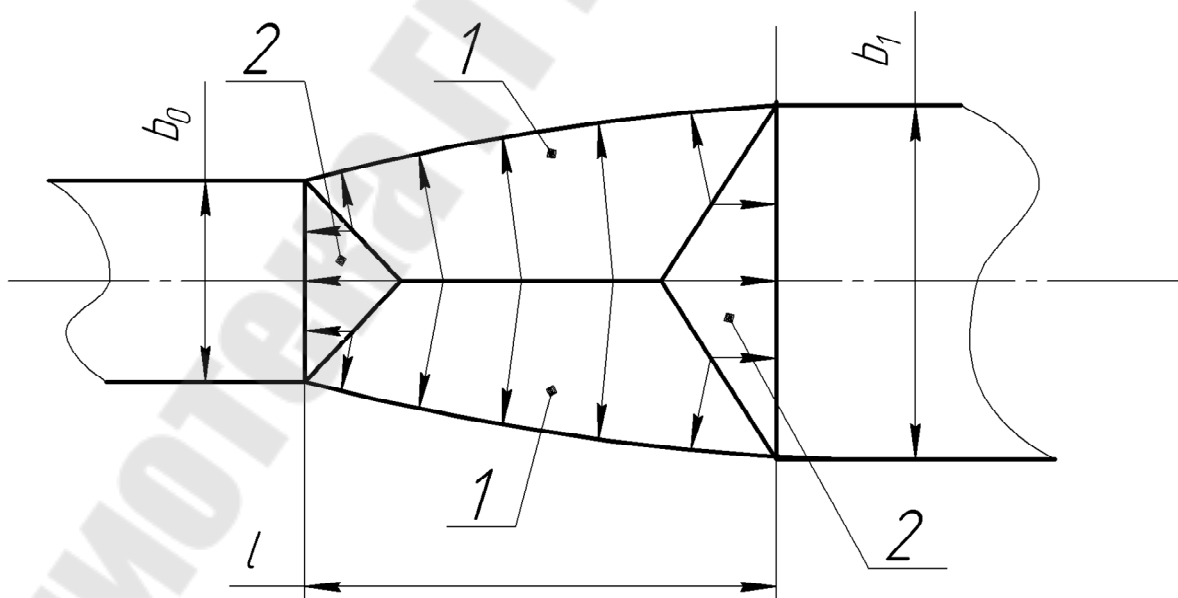


Рис. 11. Направления деформаций в узком очаге деформации

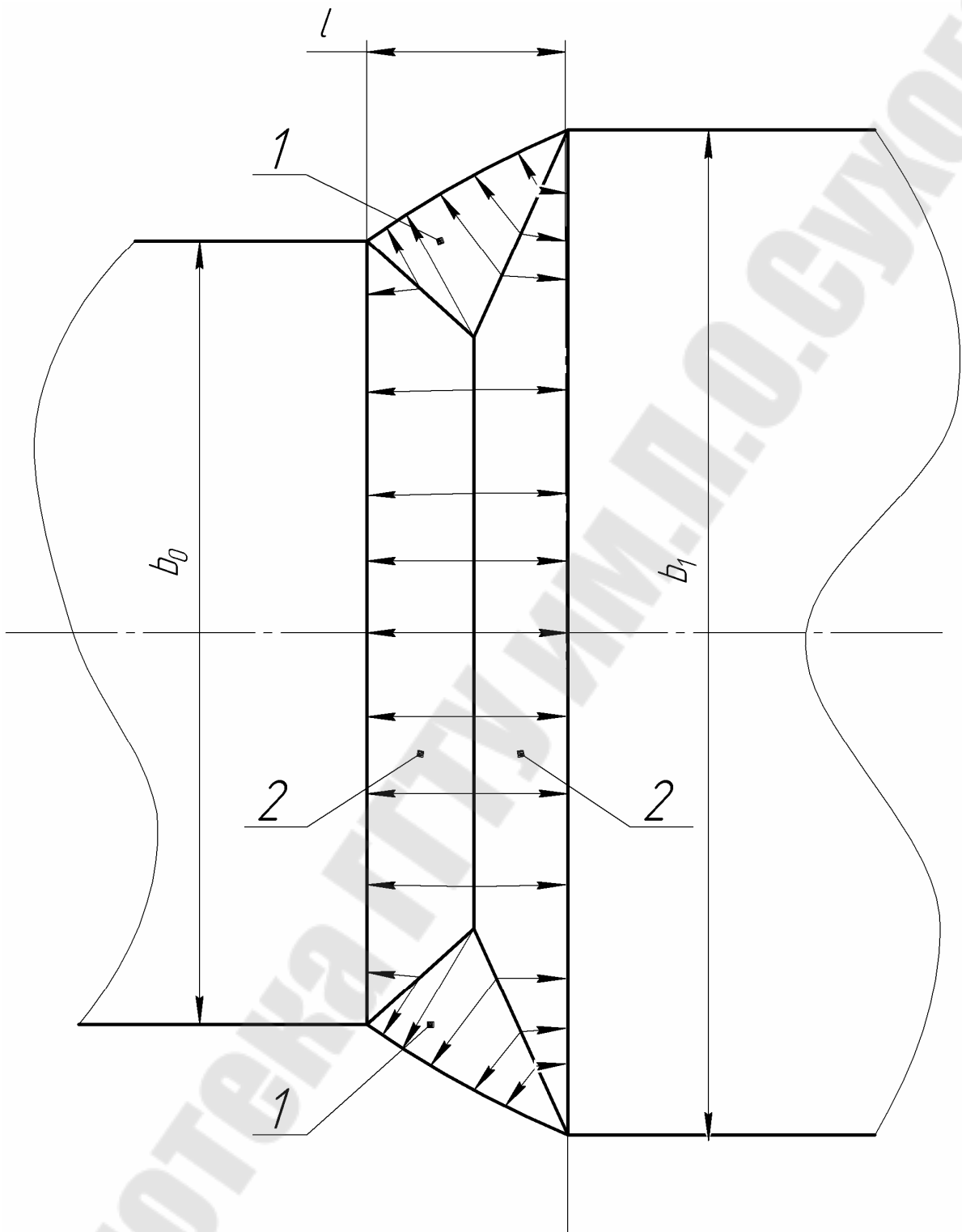


Рис.12. Направления деформаций в широком очаге деформаций

12. ВЛИЯНИЕ НА УШИРЕНИЕ ФАКТОРОВ ПРОКАТКИ

Рассмотрим график изменения параметра $\frac{b_{ср}}{l}$ от показателя ширины и показателя деформации $\frac{b_{ср}}{l}$ (рис. 13).

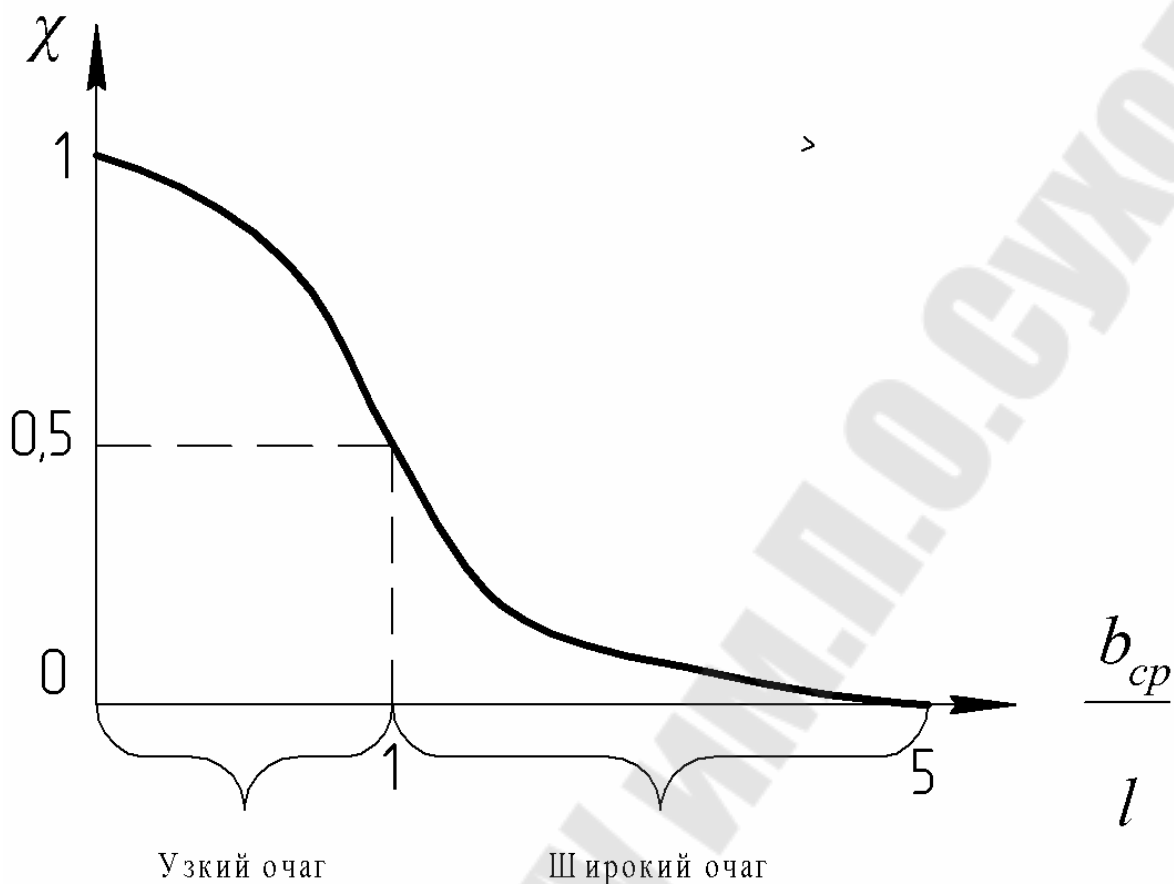


Рис. 13. Зависимость уширения от геометрии очага деформации

При $\frac{b_{cp}}{l} = 5$. уширение отсутствует, то есть вся деформация складывается из двух деформаций: обжатия и удлинения.

Из графика видно, что для узких очагов деформации $\frac{b_{cp}}{l} < 1$ значение максимальное.

Основной вывод по графику: деформация уширения зависит от соотношения размеров b_{cp} и l .

Рассмотрим график зависимости от соотношения размеров $\frac{b_{cp}}{h_{cp}}$

(рис. 14):

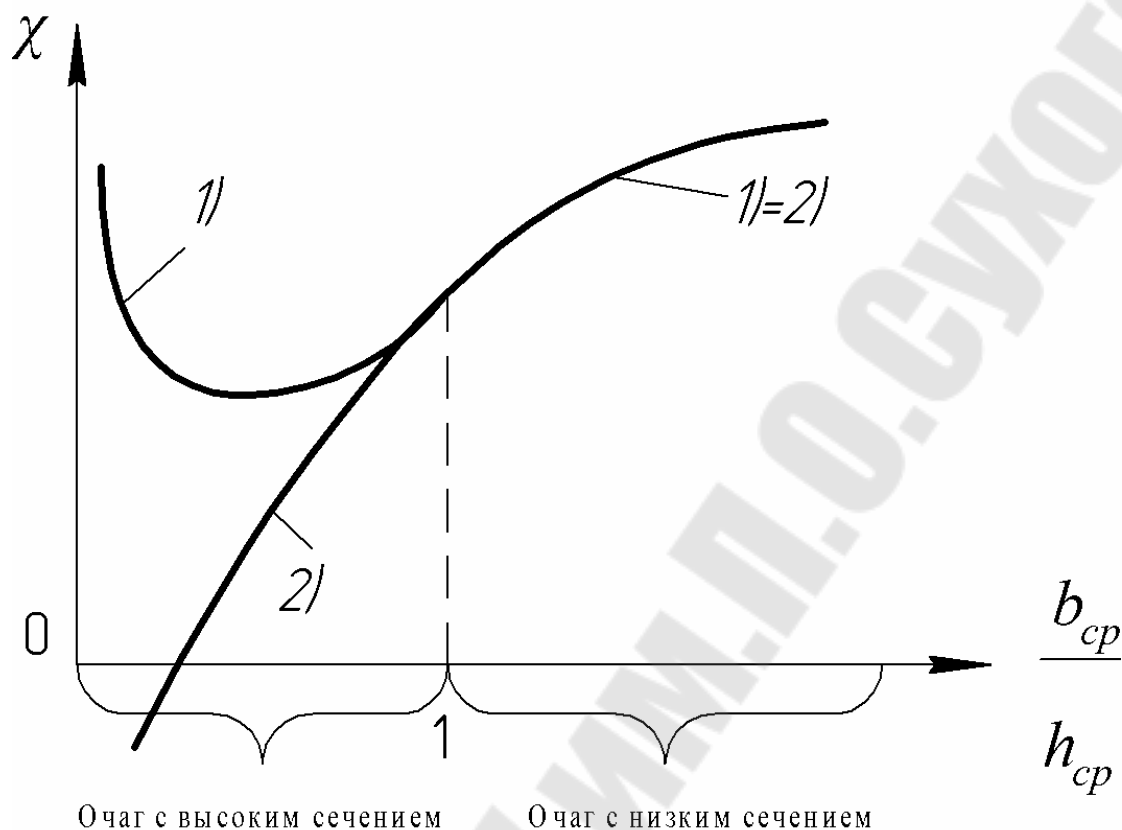


Рис. 14. Зависимость уширения от геометрии очага деформации

При $\frac{b_{cp}}{h_{cp}} < 1$ имеем высокое сечение очага деформации, а при $\frac{b_{cp}}{h_{cp}} > 1$ -

низкое сечение очага деформации.

Для высокого сечения очага деформации характерно различие в значении уширения для разных слоёв очага деформации.

1 – приконтактные слои полосы;

2 – средние слои полосы.

Для высокого сечения характерна разница в значениях уширения для разных слоёв полосы: слои 1 уширяются более интенсивно по сравнению со слоями 2. Это связано с неравномерностью деформации высоких сечений. Причем возможны схемы прокатки, когда слоёв для 2 присутствует отрицательное уширение, то есть сужение.

По мере повышения высоты сечения равномерность уширения слоёв 1 и 2 увеличивается, и $\frac{b_{cp}}{h_{cp}} > 1$ разница уширения слоев 1 и 2 отсутствует.

Вывод по графику: деформация уширения зависит от соотношения размеров b_{cp} и h_{cp} . Также обратная деформация уширения определяется преимущественно с соотношением геометрических параметров очага деформации. Если параметры прокатки изменяют эти соотношения, то они

также изменяют величину уширения. Например, увеличение радиуса валков повышает параметр l , что соответствует уменьшению $\frac{b_{\text{ср}}}{l}$, а это в свою очередь приводит к увеличению l и к росту деформации уширения.

Самым существенным фактором, влияющим на уширение, являются величины b_0 к h_0 , l . Эти величины определяют вид очага деформации и геометрию сечения очага деформации.

Для листовой прокатки $b_0 \geq h_0$, что приводит к снижению уширения.

При сортовой прокатке $b_0 \approx h_0$, что вызывает увеличение уширения.

Помимо геометрического очага деформации на уширение влияет контактное трение. Оно уменьшает наиболее интенсивную деформацию. Например, если в схеме прокатки удлинение больше уширения, то рост контактного трения уменьшит удлинение и увеличит уширение. В этой связи зависимости расчетного уширения содержат геометрические показатели очага деформации и коэффициент контактного трения.

13. ОСНОВНЫЕ КИНЕМАТИЧЕСКИЕ СТАДИИ ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКИ

Обрабатываемая полоса при продольной прокатке имеет 3 основные кинематические стадии:

1. Захват полосы (рис.15);
2. Установившееся движение полосы (рис. 2);
3. Выброс полосы (рис. 16).

Первая стадия характеризуется постепенным увеличением объема очага деформации. Непостоянство объема приводит к непостоянству напряжений и деформаций в том объеме.

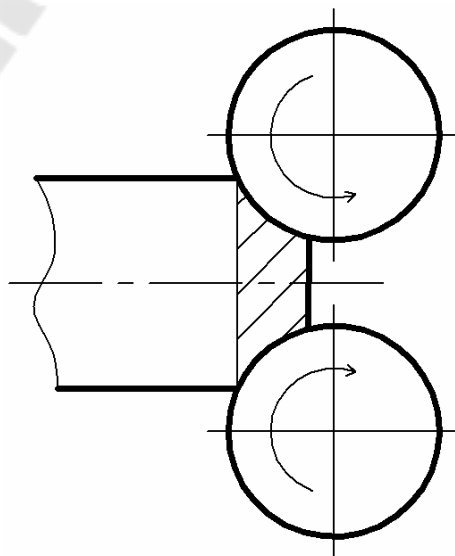


Рис. 15. Схема первой стадии захвата полосы

Вторая стадия является основной стадией, формирующей профиль полосы. Если схема контактных сил, действует при захвате и не изменяются при выполнении второй стадии, то вторая стадия всегда выполнима. Но схемы сил при движении полосы чаще изменяются.

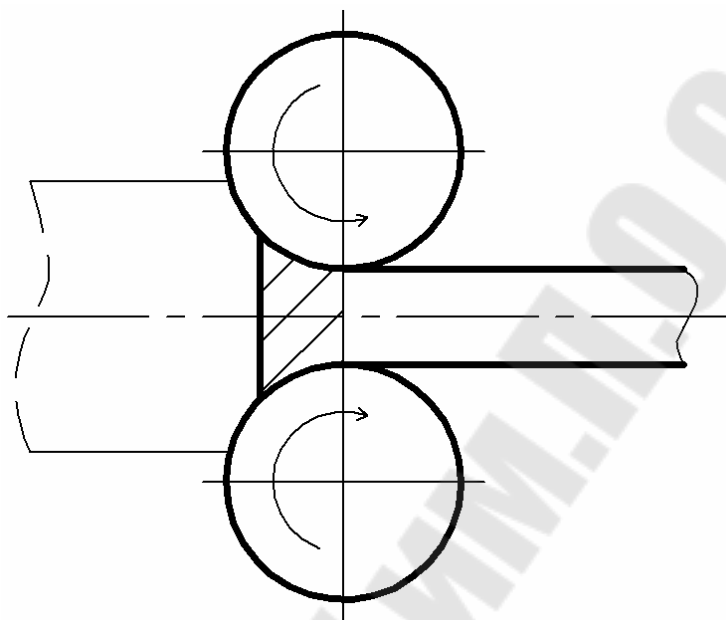


Рис. 16. Схема третьей стадии выброса полосы

Третья стадия выброса полосы характеризуется постепенным уменьшением объема очага деформации, что приводит к постепенному уменьшению величин всех параметров прокатки.

Непостоянство объема очага деформации приводит к непостоянным значениям напряжений и деформаций в этом объеме. На практике непостоянное значение напряжения и деформации на 1-ой и 3-ей стадиях вызывает геометрические изменения передних и задних краев обрабатываемой полосы. В этой связи края полосы после прокатки удаляются.

В начальный момент прокатные валки установлены с зазором h_3 . к вращающимся валкам подводится полоса, которая начинает контактировать с валком в точке a, a' (рис. 17).

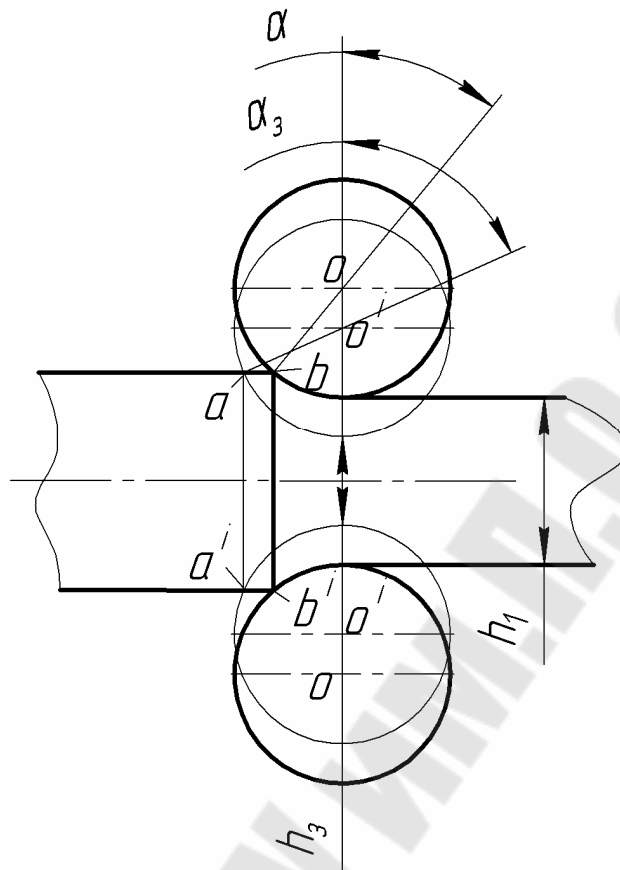


Рис. 17. Схема к определению соотношения углов прокатки и захвата

Под действием сил контактного трения полоса начинает продвигаться в направлении прокатки и деформируется. Под действием сил деформации зазор между валками увеличивается. Поэтому $h_1 > h_3$. Угол α_3 называется углом захвата, для которого выполняется неравенство $\alpha_3 > \alpha$. (α - угол прокатки). Угол α определяется положением точки b и b' , соответствующим началу контакта полосы с валком при прокатке. Стадия захвата полосы отличается постепенным увеличением объема очага деформации, поэтому на этой стадии постепенно увеличивается степень деформации и усилие деформации. В этой связи геометрия переднего края полосы после прокатки имеет геометрические отклонения от заданного профиля, но эта часть полосы после прокатки удаляется. После полного заполнения металлом очага деформации начинается вторая стадия процесса прокатки. Стадия установившегося движения характеризуется постоянством параметра прокатки и поэтому обеспечивает получение заданного профиля полосы по всей ее длине.

14. УСЛОВИЯ ЗАХВАТА ПОЛОСЫ

Для выполнения первой стадии продольной прокатки, то есть захвата, необходимо выполнение условия захвата. Для вывода условия захвата рассмотрим схему захвата (рис/ 18):

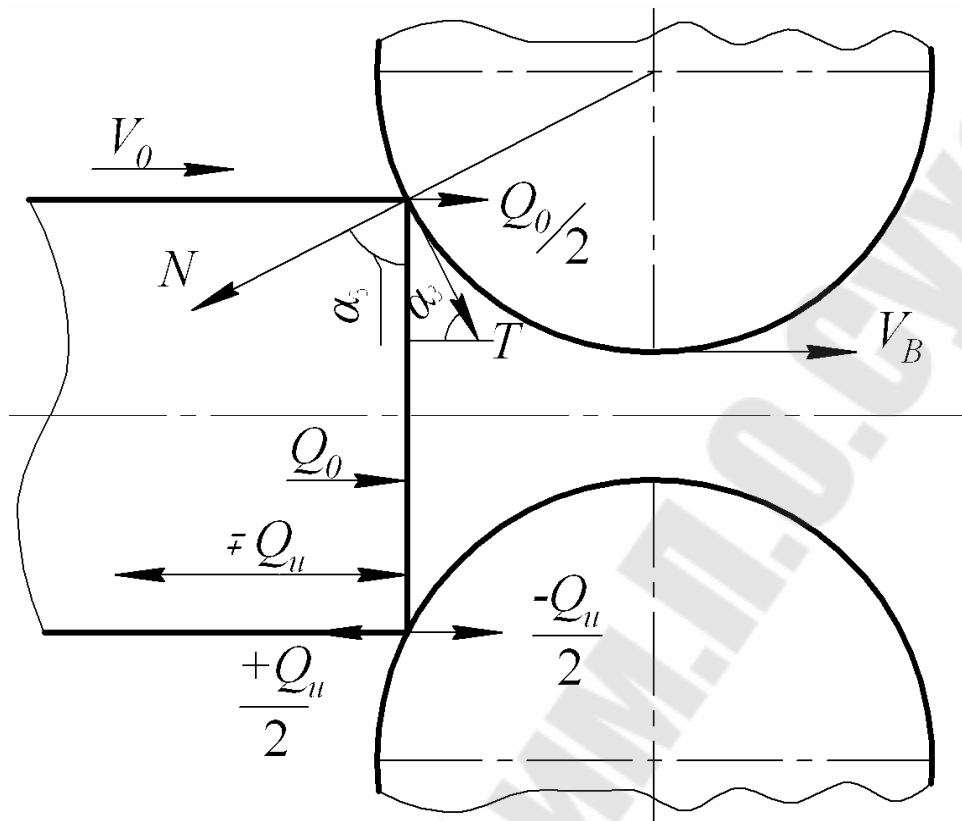


Рис. 18. Схема к определению условия захвата полосы валками

N – нормальная контактная сила, действующая со стороны валка на полосу.

T – результирующая контактная сила трения.

Q_0 – усилие подачи полосы к валкам.

Q_u – сила инерции подачи полосы, возникающая при условии: скорость подачи полосы больше скорости вращения валков.

$-Q_u$ – аналогичная сила инерции, возникающая при условии: скорость подачи полосы меньше скорости вращения валков.

V_B – скорость вращения валка.

V_0 – скорость подачи полосы.

Указанные силы действуют на верхней и нижней линиях контакта полосы с валками.

Деление сил Q_0 и Q_u на два объясняется опорой полосы на две линии.

Для того, чтобы обеспечить продвижение полосы сквозь валки необходимо выполнение следующего условия:

$$N \cdot \cos \alpha_3 - \frac{Q_u}{2} \leq T \cdot \sin \alpha_3 + \frac{Q_0}{2} + \frac{Q_u}{2} \quad (1)$$

Предположим, что на контакте действует закон трения Амонтона-Кулона:

$$T = f \cdot N,$$

f - коэффициент контактного трения.

Тогда условие (1) можно переписать в виде:

$$N \cdot \cos \alpha_3 - \frac{Q_u}{2} \leq N \cdot f \cdot \sin \alpha_3 + \frac{Q_o}{2} + \frac{Q_u}{2}.$$

Разделим обе части на $N \cdot \cos \alpha_3$:

$$1 - \left(\frac{Q_u}{2} + \frac{Q_u}{2} - \frac{Q_o}{2} \right) \cdot \frac{1}{N \cdot \cos \alpha_3} \leq f \cdot \operatorname{tg} \alpha_3.$$

Путем дальнейших преобразований можно получить следующее:

$$f \geq \operatorname{tg} \alpha_3 + \frac{\pm \frac{Q_u}{2} + \frac{Q_o}{2}}{N \cdot \cos \alpha_3}. \quad (2)$$

Условие (2) – условие вынужденного захвата полосы.

В условии (2) используется $-\frac{Q_u}{2}$, если $V_o > V_g$ и $+\frac{Q_u}{2}$, если $V_o < V_g$.

Из условия (2) видно, что условие вынужденного захвата выполняется при достаточном значении f . Причем эта величина может уменьшаться, если увеличивается Q_o и уменьшается α_3 . Если сила Q_o отсутствует, то захват называется свободным. При свободном захвате имеем следующее условие движения полосы:

$$f \geq \operatorname{tg} \alpha_3. \quad (3)$$

Из условия свободного захвата следует, что возможность захвата зависит только от контактного трения и величины α_3 . На практике обычно коэффициент трения f не регулируется, поэтому захват определяется величиной α_3 . для обеспечения захвата максимальное значение α_3 не превышает 23°-24°. Причем максимальные значения α_3 соответствуют горячей прокатке, а минимальные – холодной.

15. УСЛОВИЕ ДВИЖЕНИЯ ПОЛОСЫ

Если захват обеспечил движение полосы и далее при движении полосы силовые условия воздействия на полосы не изменились, то есть $Q_o = \text{const}$, то движение полосы будет обеспечено на протяжении второй и третьей стадии прокатки. Если же силовые условия меняются от появления действия

натяжения и подпора полосы, то необходимо выполнить анализ условия движения полосы.

Рассмотрим схему установившегося движения полосы на второй стадии прокатки (рис. 19).

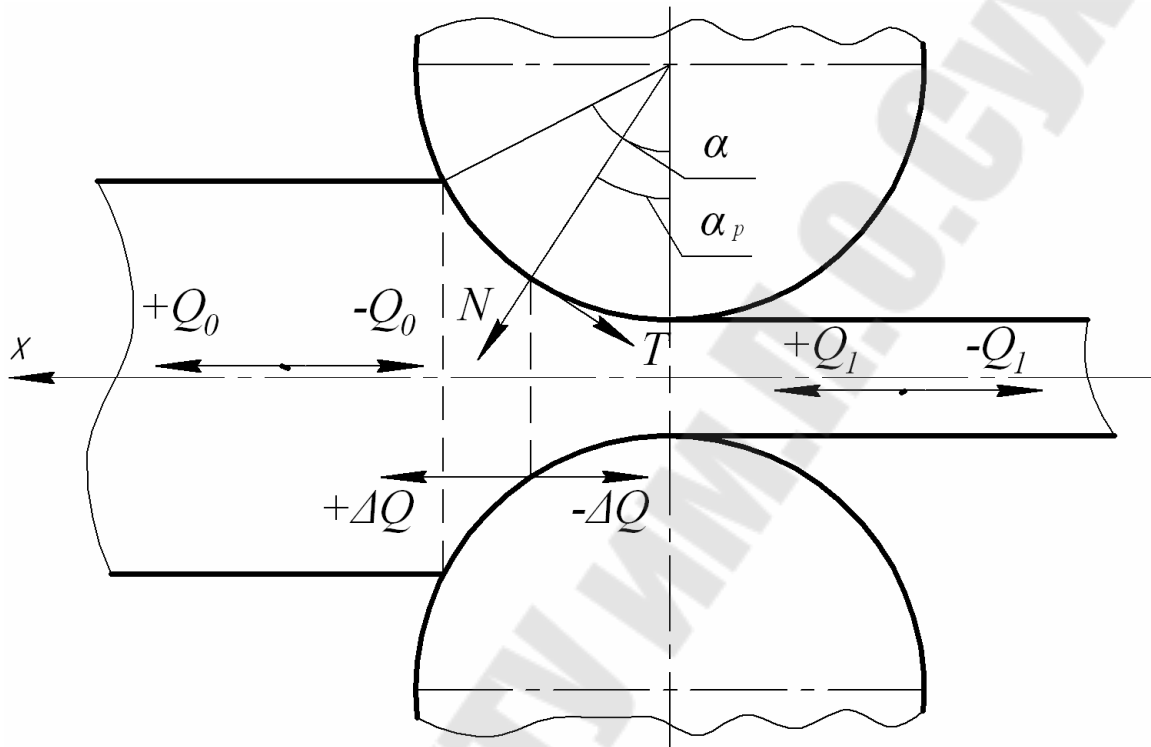


Рис. 19. Схема к определению условия движения полосы

На рис. 19 силы $-Q_0$ и $+Q_1$ – подпоры полосы, силы $+Q_0$ и $-Q_1$ – натяжения полосы. Суммарная результирующая сила, учитывающая совместную величину натяжений и подпоров, действующую на полосу:

$$\Delta Q = Q_0 + Q_1$$

N, T – результирующие силы прокатки второй стадии. При движении полосы силы N, T как результирующие силы прокатки имеют точку приложения, обозначенную углом α_p . Величина α_p для большинства схем прокатки примерно равна $\frac{\alpha}{2}$.

Условие движения полосы можно записать по аналогии с условием вынужденного захвата полосы, то есть:

$$f_y \geq \operatorname{tg} \alpha_p - \frac{\Delta Q}{2N \cos \alpha_p}.$$

где f_y – коэффициент контактного трения при движении полосы.

Величина f_y не многим отличается от величины f – коэффициента трения при захвате. Разница в значениях объясняется разными условиями контакта при захвате и движении полосы.

Если ΔQ – отрицательная, то есть внешние силы воздействия на полосу способствуют движению полосы, то условия движения полосы облегчено. Если ΔQ – положительная, движение полосы в направлении прокатки затруднено.

16. ОПЕРЕЖЕНИЕ И ОТСТАВАНИЕ

Скорость полосы на входе в валки меньше скорости полосы на выходе из валков.

Отставание – меньшее значение скорости полосы по сравнению со скоростью поверхности валков. Зона, которая соответствует этому соотношению скоростей, называется зоной отставания. Она распространяется от точки входа очага деформации до точки нейтрального сечения.

Опережение – превышение скорости движения полосы по сравнению со скоростью валков. Зона, которой соответствует это соотношение скоростей, называется зоной опережения. Она распространяется от точки нейтрального сечения до точки выхода полосы из валков.

Наличие опережения и отставания объясняется схемой деформации при прокатке.

Схему прокатки условно можно представить как совмещение двух схем (рис. 20):

- осадка полосы цилиндрическими бойками (рис. 20, а).
- подача полосы вращающимися цилиндрическими бойками совместно с осадкой этими же бойками (рис. 20, б) или схема прокатки.

На схеме осадки pn' – нейтральное сечение;

- скорость пластической деформации.

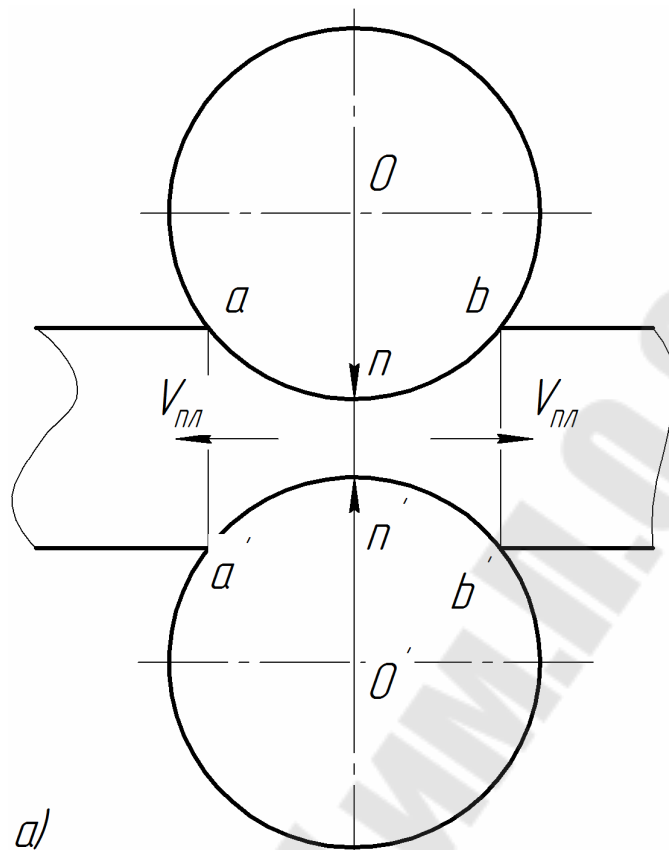
Пластическая деформация симметрична относительно плоскости pn' . На уровне сечения pn' . На уровне сечения aa' и bb' .

На схеме (рис. 20, б) вектор – скорость подачи полосы. Если приведенные две схемы наложить друг на друга, то получим схему прокатки.

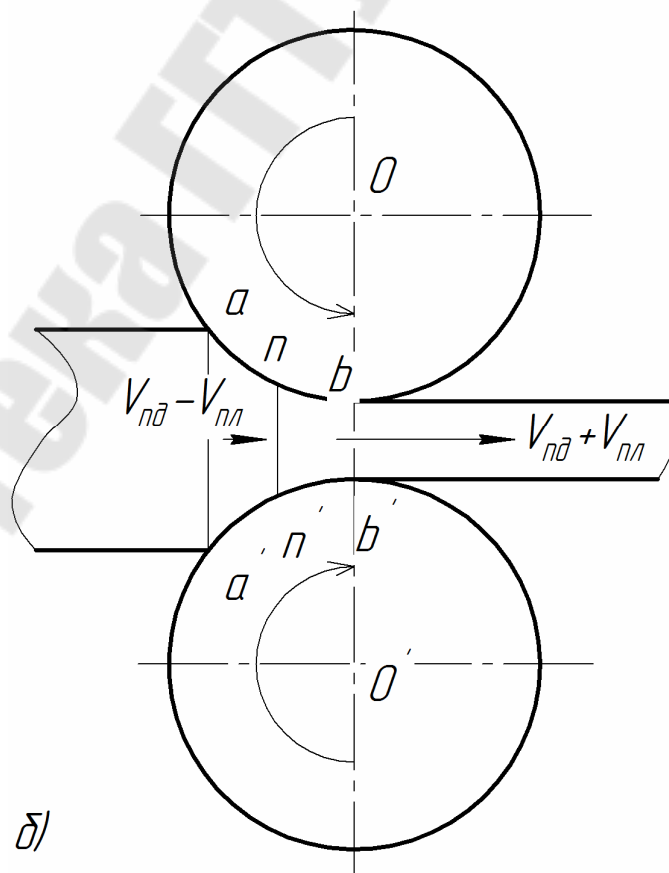
На схеме прокатки зона отставания обозначена ap' , зона опережения pb .

Для сечений зоны отставания результирующая:

Для зоны опережения поперечное сечение перемещается со скоростью. Сечение pn' перемещается со скоростью. Поэтому минимальная скорость сечения aa' , максимальная скорость сечения bb' . Таким образом, полоса движется сквозь очаг деформации с ускорением.



a)



б)

Рис. 20. Схема осадки полосы (а) и схема прокатки (б)

17. ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА ОПЕРЕЖЕНИЯ И ОТСТАВАНИЯ

Рассмотрим кинематическую схему очага деформации продольной прокатки (рис. 21).

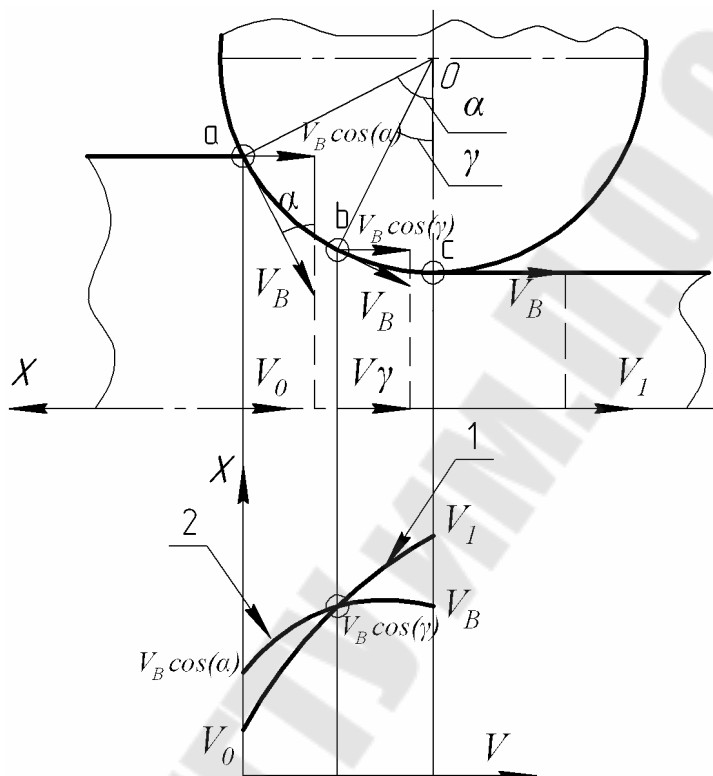


Рис. 21. Кинематическая схема очага деформации продольной прокатки:

1 – скорость полосы; 2 – горизонтальная скорость валков

Зона ab называется зоной отставания, зона bc – зона опережения. Отставанием при прокатке называется относительное уменьшение значения скорости движения сечения полосы на контакте валка с полосой по сравнению с проекцией скорости валка на ось заготовки. опережением при прокатке называется относительное увеличение значения скорости движения сечения полосы по сравнению с проекции скоростей валка на ось заготовки.

Из графика видно, max. отставание в сечении полосы, проходит через точку a и max опережение в сечении проходит через точку c . Потому на практике определяется отставание и опережение именно в этих сечениях. В точке b отсутствует опережение и отставания. Сечение, проходимости через эту точку, называется нейтральным. Угол, определения положения этого сечения, т.е. угол γ называется нейтральным углом.

Численно значение опережения определяется по формулам:

$$S_1 = \frac{V_1 - V_0}{V_0}, \quad S_1 = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_0}{\vartheta_0} \cdot 100\%$$

Численно значение отставание определяется по формуле:

$$S_0 = \frac{V_0 \cdot \cos \alpha - V_1}{V_1 \cdot \cos \alpha}, \quad S_0 = \frac{\vartheta_0 \cos \alpha - \vartheta_1}{\vartheta_1 \cos \alpha} \cdot 100\%$$

При прокатке на практике: $S_1 = 1 \dots 10\%$, $S_0 = 1 \dots 20\%$.

Опережение может рассчитываться по формуле:

$$S_1 = \gamma^2 \cdot \frac{R_1}{n_1},$$

где R – радиус валков.

Между опережением и отставанием существует взаимосвязь: чем больше 1, тем меньше др. и наоборот^

$$S_0 = 1 - \frac{1 + S_1}{\lambda \cos \alpha},$$

$$\lambda = \frac{F_0}{F_1},$$

где λ – коэффициент вытяжки.

F_1 и F_0 - площади поперечных сечений после и до прокатки.

18. НЕЙТРАЛЬНЫЙ УГОЛ ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКИ

Для расчета величин напряжения и отставания при продольной прокатке необходимо предварительно определять значение нейтрального угла. Для расчета величины γ используется следующая формула:

$$\sin \gamma = \frac{\sin \alpha}{2} - \frac{1 - \cos \alpha}{2f} + \frac{Q_1 - Q_0}{4\theta \rho R b}, \quad (9)$$

где Q_1, Q_0 - переднее и заднее натяжения полосы.

θ (тэта) – угол трения.

ρ – давление прокатки.

R – радиус валков.

b – средняя ширина очага деформации.

f – коэффициент контактного трения.

Из формулы (1) следует, что величина γ зависит от α , коэффициента контактного трения, а также переднего и заднего натяжения полосы.

Чем больше α , тем больше γ .

Чем больше f , тем больше γ .

Чем больше Q , тем больше γ .

Чем больше Q_0 , тем меньше γ .

Для упрощения формулы (1) используют следующие допущения:

$$\theta = \arctg f ; \operatorname{tg} \theta = f ; \operatorname{tg} \theta \approx \varphi$$

$$\sin \gamma \approx \gamma$$

$$\sin \alpha \approx \alpha$$

$$1 - \cos \alpha = 2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} \approx 2 \cdot \frac{\alpha^2}{4} \approx \frac{\alpha^2}{2}$$

Тогда формула (9) принимает вид:

$$\gamma = \frac{\alpha}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{2\theta} \right) + \frac{Q_1 - Q_0}{4\theta p R b} . \quad (10)$$

Если значения Q_1 и Q_0 не велики или отсутствуют или $|Q_1| \approx |Q_0|$, то уравнение (10) получает упрощенный вид:

$$\gamma = \frac{\alpha}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{2\theta} \right) \quad (11)$$

(11) – уравнение Павлова для нейтрального угла.

Это уравнение позволяет выполнить анализ по влиянию углов θ и α на γ (рис. 22, 23).

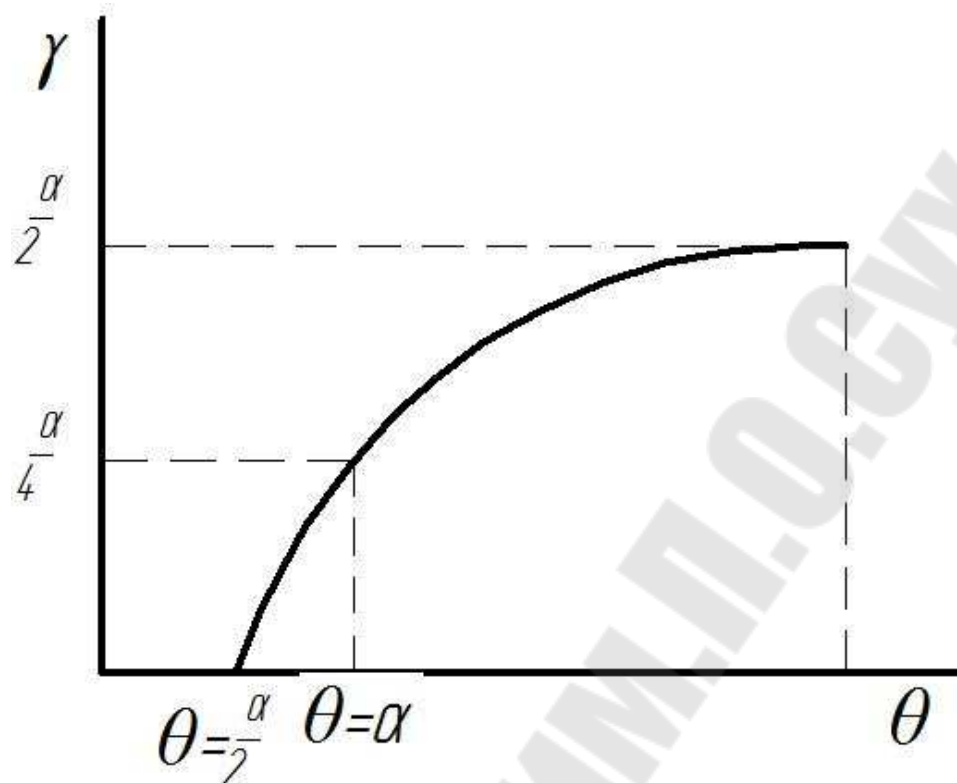


Рис. 22. Зависимость нейтрального угла от угла трения

Из графика на рис. 22 следует:

1) максимально возможное значение γ при отсутствии или нейтрализации значений Q_1, Q_0 равно $\frac{\alpha}{2}$.

2) нейтральный угол отсутствует, если $\theta = \frac{\alpha}{2}$.

3) увеличение контактного трения θ приводит к росту γ .

Рассмотрим влияние α на γ :

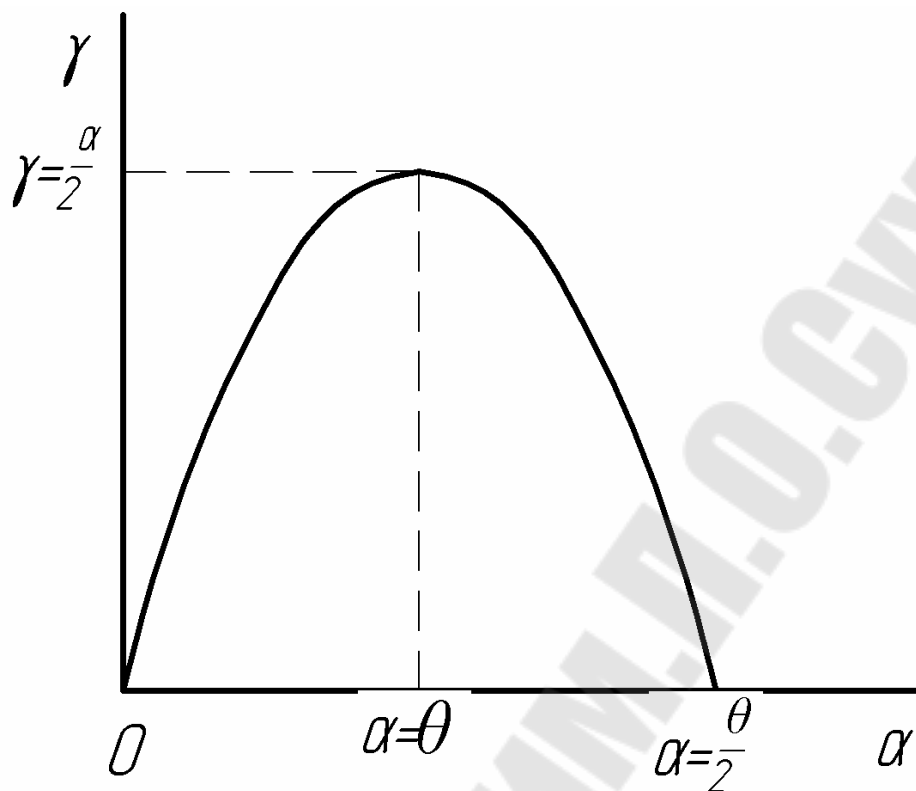


Рис. 23. Зависимость нейтрального угла от угла прокатки

Из графика на рис. 23 видно, что величина α существенно влияет на γ , максимальное значение γ принимаем при условии $\alpha = \theta$.

Величины Q_1 и Q_0 существенно изменяют вид приведенных графиков. Так значительный рост Q_1 может повысить γ до такой степени, что вся дуга контакта полосы с валков будет представлять собой зону опережения. Такую схему прокатки иначе называют процессом прокатки-волочения. Если же существенно увеличивается Q_0 , то вся зона контакта может превратиться в сплошную зону отставания. В этом случае $\gamma = 0$. Такая схема прокатки соответствует пробуксовке валков по поверхности полосы.

19. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КОНТАКТНОГО ТРЕНИЯ ПРИ ПРОКАТКЕ

Контактное трение при прокатке обеспечивает захват и движение полосы. В этом заключается положительная роль контактного трения. С другой стороны – контактное трение вызывает повышение давления прокатки и, как следствие, рост усилия момента, энергии и мощности прокатки – в этом заключается отрицательная роль контактного трения при прокатке. Поэтому прокатка – это особый процесс обработки давлением, в котором контактное трение играет двойную роль. Эту особенность используют на практике. Практическое использование трения заключается в

том, что, если необходимо увеличить угол захвата, тем самым повысить обжатие и производительность, то трение увеличивают. Для повышения контактного трения повышают шероховатость валков, увеличивают радиус валков, что повышает силы трения. Но в этом случае имеется перерасход энергии прокатки, вызванным большим трением. Такой подход применяют при прокатке блюмов, слябов, крупных заготовок.

Если же большие углы захвата и большие обжатия можно исключить, то контактное трение снижают. Для этого повышают чистоту обработки поверхности валков, применяют эффективные смазочные материалы. Такой подход прокатки используют на чистовых проходах прокатки. При прокатке мелкосортных профилей, во всех процессах холодной прокатки и т.д.

Основной количественной характеристикой, определяющей величину контактной силы трения является коэффициент контактного трения. По своей сути коэффициент контактного трения f равен соотношению величины нормальной контактной силы и силы трения:

$$f = \frac{T}{N}, \quad T = f \cdot N.$$

Величина коэффициента f зависит не от сил, действующих на контакте полосы с валком, а от определенных факторов:

-физико-механические свойств прокатных валков и прокатного материала;

- качества обработки поверхности валков;
- температуры прокатки;
- скорости прокатки;
- свойств технологических смазок;
- степени деформации прокатываемой полосы.

Существует разница между коэффициентом контактного трения при захвате и при движении полосы на основной кинематической стадии. При захвате полосы он выше, чем при прокатке вследствие различия в контактных условиях.

При горячей прокатке роль смазки играет слой окалины, имеющий повышенные пластические свойства в нагретом состоянии. При холодной прокатке в качестве смазки используются масла и эмульсии.

20. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА КОЭФФИЦИЕНТ КОНТАКТНОГО ТРЕНИЯ ПРИ ПРОКАТКЕ

Рассмотрим основные факторы прокатки, которые влияют на величину контактного трения f :

1) Физико-механические свойства прокатных валков и прокатного материала.

Если контактирующие материалы валка и полосы имеют повышенную активность к контактному схватыванию, то величина f повышается. Активное схватывание зависит от природы материалов. Если энергия контактирующих атомов высока и имеются свободные связи для их взаимодействия, то схватываемость и трение высокие. И наоборот, если энергия контактирующих атомов относительно инертна или отсутствуют свободные связи, то f небольшая. При прокатке сталей меньшую активность к схватыванию имеют марки стали с повышенным содержанием углерода. По этой причине минимальный f присутствует на чугунных прокатных валках и при прокатке высокоуглеродистых сталей.

2) Качество обработки поверхности валков (рис.24).

Шероховатость поверхности валков зависит от качества механической обработки этой поверхности, от количества мелких частиц окалины, мелких частиц металла полосы, удерживаемых на поверхности валков силами схватывания. Установлено: если шероховатость увеличивается до R_z60 , то величина f постоянно увеличивается. Но при дальнейшем росте R_z величина f почти не изменяется.

3) Определено, что максимальное значение f не превышает 0,5-0,56 для трения-скольжения, что характерно для прокатки.

Рост температуры очага деформации прокатки вызывает повышение активности атомов валка и полосы, поэтому увеличивается сила схватывания контакта поверхностей и, как следствие, рост значения f . По этой причине любое увеличение температуры сопровождается ростом f , но для горячей прокатки есть одно исключение: оно заключается в различии свойств поверхностной окалины при разности температур. Так для стали свойства окалины до уровня температуры 700-1000°C остаются хрупкими. То есть в очаге деформации окалина разрушается, позволяя контактировать чистым слоям валка и полосы, на уровне которого происходит схватывание, но при температуре выше указанного предела окалина приобретает повышенную пластичность и служит твердой пластичной смазкой между валком и полосой, и чем выше температура, тем пластичнее смазка. Поэтому при температуре больше 700-1000° наблюдается обратная зависимость: с ростом температуры f уменьшается (рис. 25).

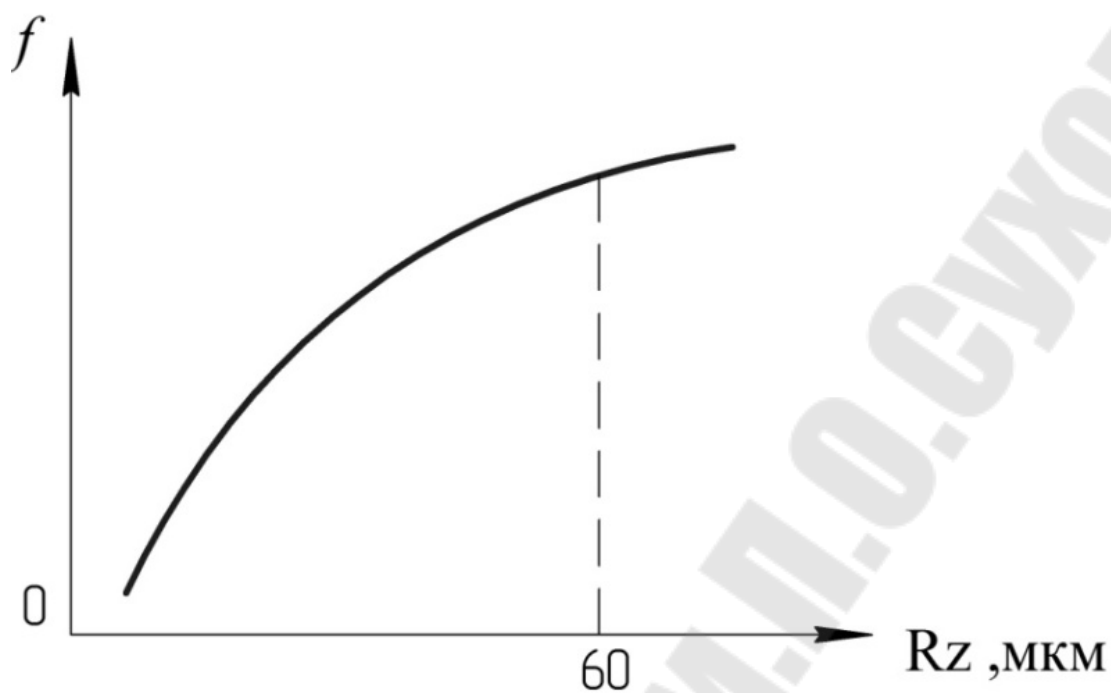


Рис. 24. Общая зависимость коэффициента контактного трения от величины шероховатости поверхности валков

4) Температура прокатки (рис. 25).

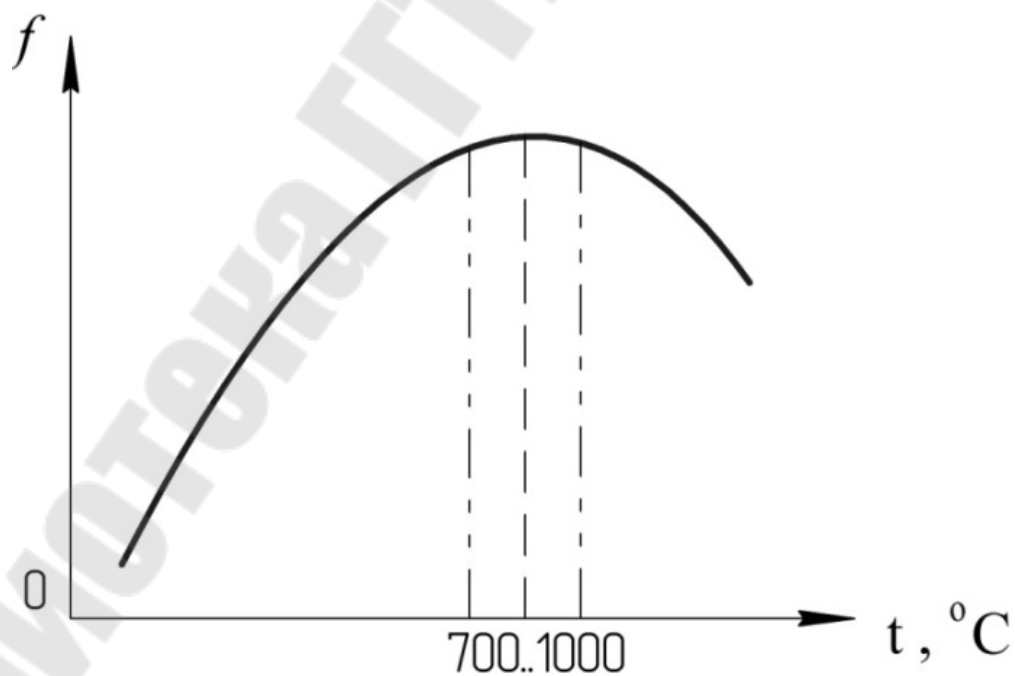


Рис. 25. Общая зависимость коэффициента контактного трения от температуры прокатки

5) Скорость прокатки (рис.26).

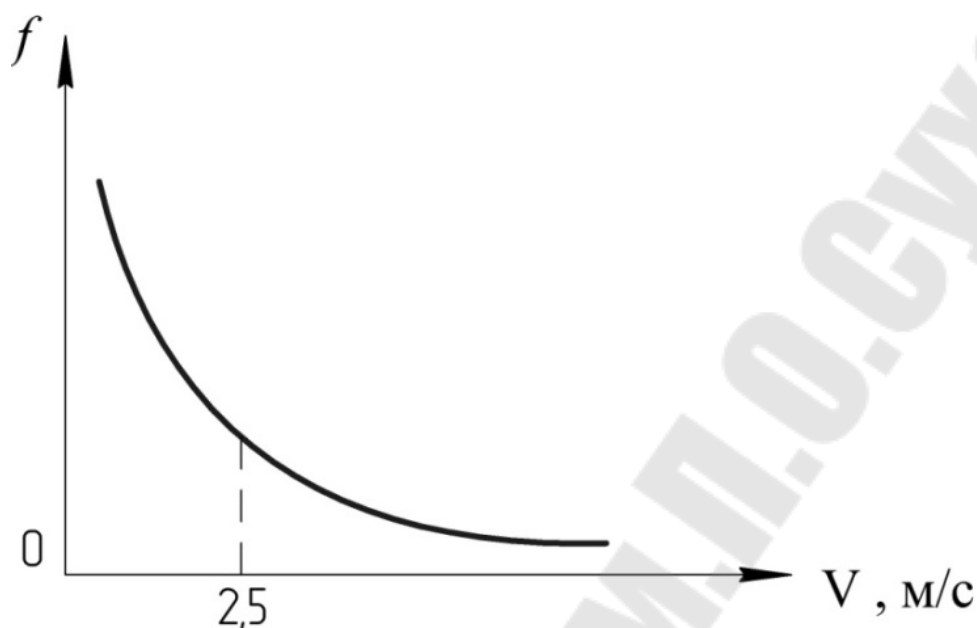


Рис. 26. Общая зависимость коэффициента контактного трения от скорости прокатки

С повышением скорости движения полосы увеличивается объем технологической смазки, подаваемый в поверхности раздела между валком и полосой. Чем более вязкая смазка, тем указанная зависимость сильнее проявляется. Это связано с противотоком смазки, то есть её выдавливанием из очага деформации. Увеличенная скорость прокатки увеличивает силы прокатки, подающие смазку в очаг деформации. Существует пороговая скорость около 2-5 м/с, выше которой приведенный эффект уже не работает и величина f остается постоянной.

6) Свойства технологических смазок.

Назначение смазок: разделение контактирующих поверхностей валка и полосы с целью уменьшения сил схватывания. Если смазка создает плотный, равномерный разделительный слой достаточной толщины, то она эффективна. Степень практической эффективности также зависит от стоимости смазки. Наиболее эффективными для прокатки являются растительные масла, и особенно касторовое масло. Более дешевыми, но менее эффективными являются минеральные масла. Эффективность определяется вязкостью и количеством поверхностно активных веществ. Чем выше эти показатели, тем смазка эффективней.

7) Степень деформации прокатываемой полосы (рис. 27).

Пластическая деформация полосы сопровождается выходом чистых поверхностей к контакту с валком, поэтому, чем больше деформация, тем выше количество контактов чистых поверхностей. На чистых (ювенильных) поверхностях увеличивается сила схватывания. Это приводит к росту значения f .

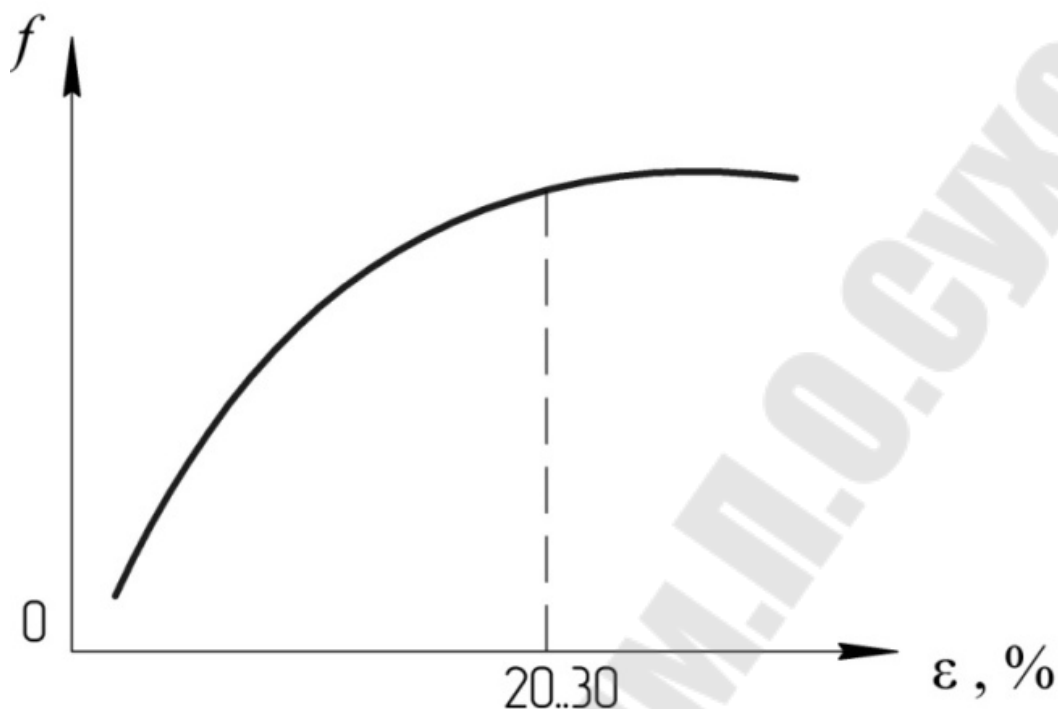


Рис. 27. Общая зависимость коэффициента контактного трения от степени деформации полосы при прокатке

21. ВЕЛИЧИНА КОНТАКТНОГО ТРЕНИЯ ПРИ ПРОКАТКЕ

Для прокатки характерно граничное контактное трение.

Граничное трение отличается наличием очень тонкого слоя смазки между полосой и валком, течение которого не соответствует законам гидродинамики.

В некоторых особых случаях возможно жидкостное трение. В этом случае смазка подчиняется законам гидродинамики и слой смазки значителен.

При прокатке также возможно сухое трение – когда смазка отсутствует. Исходя из этого, при определении величина коэффициента контактного трения ориентируется на граничное трение.

Следует различать:

- трение при захвате;
- трение при движении полосы.

Трение при захвате больше, чем при движении полосы. Это объясняется разными условиями контакта. При захвате площадь контакта полосы и валка значительно меньше, чем при движении полосы. При захвате разница в скоростях полосы и валков значительно больше, чем при движении полосы. По этим причинам при захвате меняется повышенный съем смазки и более интенсивный выход к контакту местных слоев. В результате коэффициенту трения характерна сила трения при захвате при движении до тех раз. Это связано с более интенсивным проскальзыванием контактных

поверхностей полосы и валка при захвате, что удаляет технологическую смазку, вызывает более сильные адгезионные связи между валком и полосой.

Величина коэффициента контактного трения определяется экспериментально различными методами. Основа всех этих методов измерения нормальные и касательные силы на контакте.

Коэффициент трения определяется делением величины силы трения на нормальную контактную силу. В результате измерений получаем следующие значения:

- для холодной прокатки коэффициент трения при захвате 0,12-0,2;
- для горячей захватки коэффициент трения при захвате 0,4-0,45;
- при движении 0,18-0,35.

Для расчета точного значения коэффициент контактного трения для горячей прокатки для условия полосы при температуре свыше 700°C используется следующая формула:

$$f = K_n K_m K_v (0,55 - 0,00024 \cdot t),$$

где K_n - коэффициент, учитывающий состояние поверхности контакта, величина которого зависит от шероховатости валков.

K_m - коэффициент, учитывающий содержание углерода в прокатываемой стали.

K_v - коэффициент, учитывающий скорость прокатки.

t - температура прокатки.

Для контактной холодной прокатки коэффициент трения рассчитывается по специальным формулам, которые можно представить в следующем виде:

$$f = f(K_{см}, \varepsilon, V, K_n, K_b),$$

где $K_{см}$ - коэффициент, учитывающий эффективность смазки;

ε - степень деформации полосы;

K_b - коэффициент, учитывающий вязкость смазки;

V - скорость прокатки.

Конкретные формулы приведены в справочной литературе.

22. ПЛОЩАДЬ КОНТАКТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕЖДУ ПОЛОСОЙ И ВАЛКОМ

Одним из важных геометрических параметров прокатки является величина поверхности контакта полосы и вала. Если рассмотреть прокатку на цилиндрических (бочкообразных) валах, то величина площади этой поверхности равна:

$$F_k = b_{cp} \cdot l_g,$$
$$b_{cp} = \frac{b_0 + b_1}{2}, l_g \approx l.$$

Если катают широкую полосу, то уширение отсутствует и $b_1 = b_0 = b$.

При холодной прокатке тонких профилей на геометрию очага деформации большое влияние оказывает упругая деформация прокатных валков. Поэтому в случае при расчете F_k учитывают упругие изменения размеров. Если же прокатку ведут в калибрах, то формула для F_k значительно усложняется. В этих случаях для определения F_k используют графические, графоаналитические и аналитические способы. Наиболее удобны аналитические способы. Они основаны на использовании специальных уравнений, полученных на основе геометрических построений. В современных расчетных методах начинают использоваться результаты численного моделирования, которое позволяет повысить точность вычисления.

В общем виде аналитическая формула для определения F_k имеет вид:

$$F_k = k \cdot b_{cp} \cdot l,$$
$$l = \sqrt{R_D \cdot \Delta h}, \quad \Delta h = h_0 - h_1,$$

где k – поправочный коэффициент, учитывающий форму сечения полосы на входе в калибр и на выходе из него. Например, если в калибр входит ромбическое сечение полосы, а из калибра выходит квадратное сечение, то $k = 0,67$, аналогично определяется другой коэффициент k

R_D – радиус дна калибра.

Для случаев прокатки, где k не определен, используется формула для расчета F_k основанная на методе приведенной полосы.

При расчете F_k методом приведенной полосы используется зависимость:

$$F_k = b_{cp} \sqrt{R_k \cdot \Delta h_{пр}},$$

R_b – радиус валка по дну калибра;
 R_k – катающий радиус калибра;
 Δh_{np} – приведенное обжатие полосы.

Рассмотрим схему определения F_k на примере прокатки овальной полосы из круглого сечения (рис. 28):

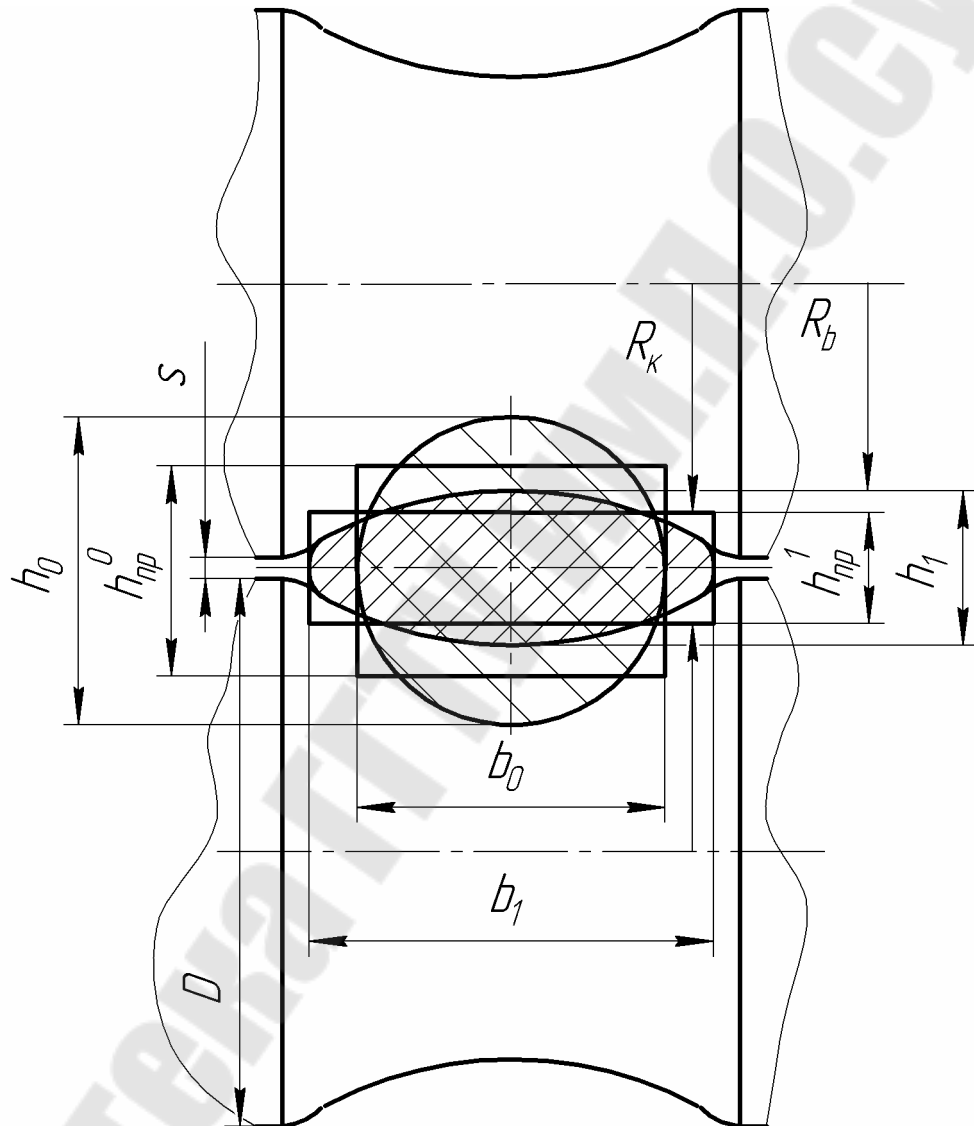


Рис. 28. Схема прокатки полосы круглого сечения в овальном калибре

$$\Delta h_{np} = h_{np}^0 - h_{np}^1.$$

Приведенная высота сечения овальной полосы:

$$h_{np}^1 = \frac{F}{b_1}.$$

Приведенная высота сечения круглой полосы:

$$h_{np}^0 = \frac{F}{b_0},$$

где h_{np}^0 – приведенная высота круглого сечения.

Величина R_k рассчитывается по формуле:

$$R_k = \frac{D - (h_{np}^2 - S)}{2},$$

где D – диаметр цилиндра валка.

23. КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ НЕПРЕРЫВНОЙ ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКИ

При непрерывной продольной прокатке прокатываемая полоса деформирующаяся одновременно в нескольких парах прокатных валков. Эта особенность требует согласования скоростей деформации на каждой паре валков.

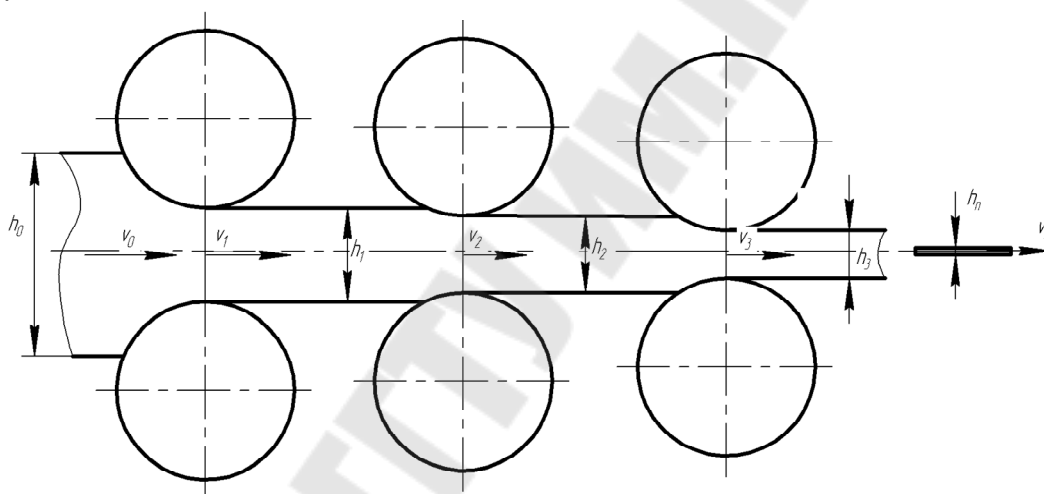


Рис. 29. Кинематическая схема непрерывной прокатки

Рассмотрим кинематическую схему непрерывной продольной прокатки (рис. 29).

Для согласования движения полосы необходимо выполнение условия:

$$F_0 v_0 = F_1 v_1 = F_2 v_2 = F_3 v_3 = F_{n-1} v_{n-1} = F_n v_n = c, \quad (12)$$

где F_0, F_1, \dots, F_n – площади поперечных сечений полосы на соответствующих переходах прокатки;

v_0, v_1, \dots, v_n – скорости движения этих сечений;

c – константа непрерывного прокатного стана.

Равенство (12) называется законом постоянства секундных (мгновенных) объемов непрерывно и многократно деформируемой полосы или заготовки. Иначе это равенство можно объяснить: если одна заготовка одновременно деформируется в нескольких ступенях (проходах, переходах), то скорость движения попеременного сечения заготовки увеличивается по

мере уменьшения его сечения. То есть если в описываемом случае сечение уменьшается, то его скорость перемещения увеличивается.

На этом принципе построены все автоматические современные средства управления непрерывной прокаткой (например: прокатные станы 150, 320 РУП «БМЗ»).

Для практического использования равенства (12) его необходимо выразить через параметры, настраиваемые и контролируемые в процессе прокатки. Для этой цели скорости полосы v_i , где $i = 0 \dots n$ выразили через число оборотов соответствующих пар прокатных валков:

$$v_i = v_i^B (1 + S_i), \quad (13)$$

где v_i^B – линейная скорость вращения i -ой пары прокатных валков;

S_i – опережение полосы на i -том проходе прокатки.

Величина v_i^B контролируется через количество оборотов валков за единицу времени n_i :

$$v_i^B = \omega_i \cdot R_i,$$

где ω_i – угловая скорость вращения валков;

R_i – катающий радиус валков.

С учетом того, что $\omega_i = 2\pi \cdot n_i$, получаем:

$$v_i^B = 2\pi \cdot n_i \cdot R_i = \pi \cdot n_i \cdot D_i. \quad (14)$$

При подстановке (14) в (13) получаем:

$$v_i = \pi \cdot n_i \cdot D_i (1 + S_i) \quad (15)$$

Выражение (15) подставляем в (12), получаем:

$$\begin{aligned} F_0 v_0 &= F_1 \pi \cdot n_1 \cdot D_1 (1 + S_1) = F_2 \pi \cdot n_2 \cdot D_2 (1 + S_2) = \\ &= \dots = F_n \pi \cdot n_n \cdot D_n (1 + S_n) = c. \end{aligned} \quad (16)$$

Если в равенстве (16) сделать допущение $S_i = const$ и исключить произведение $F_i v_i$ как не участвующие в схеме прокатки, то выражение (16) принимает вид:

$$F_i \cdot n_i \cdot D_i = c, \quad (17)$$

$$i = 1 \dots n,$$

где D_i – катающий диаметр валков.

24. НАТЯЖЕНИЕ И ПЕТЛЕОБРАЗОВАНИЕ ПОЛОСЫ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКЕ

Непрерывная продольная прокатка подчиняется закону постоянства секундных объемов, имеет планируемые и случайные отклонения от этого закона. Например, в ходе прокатки валки изнашиваются постоянно, что влечёт за собой изменение значений F_i и, как следствие, изменение $\text{const } c$. Также возможны изменения в настройках величины межвалкового зазора, возможно колебание значений F_0 , возможны отклонения в настройках количества оборотов n_i . Не исключены и другие изменения в режиме прокатки непрерывного стана. Перечисленные изменения в законе постоянства секундных объемов называются случайными.

Изменения в законе постоянства секундных объемов вызывают появление натяжения полосы между клетями или подпоры полосы, вызывают петлеобразование полосы (рис. 30).

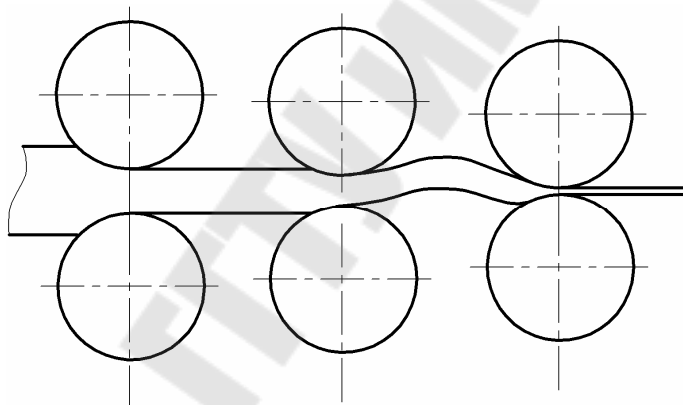


Рис. 30. Схема петлеобразования в непрерывной прокатке

Если в направлении прокатки выполняется условие:

$$F_i v_i > F_{i+1} v_{i+1}, \quad (18)$$

то между клетями появляется подпор полосы, который может сопровождаться петлеобразованием для малых сечений.

Для практической реализации петлеобразования в закон постоянства секундных объемов вносят изменения:

$$c_i = k_n \cdot c_{i+1}, \quad (19)$$

$$k_n = 1,005 \dots 1,015,$$

где k_n - коэффициент подпора полосы.

С соотношением (19) каждая последующая постоянная по ходу прокатки увеличивается от 0,5÷1,5% по сравнению с предыдущей. $c_i > c_{i+1}$ на 0,5÷1,5%.

Наличие петли позволяет получить определенный запас металла между клетями, который позволяет случайным изменениям не вносить существенные корректировки в режим прокатки. Случайные изменения прокатки могут вызывать появление случайных натяжений и подпоров полосы, а наличие планируемого подпора или петлеобразование полосы обеспечивает стабильность прокатки. Визуально случайные изменения режима прокатки наблюдают по изменению величины петли. Если между клетями имеется относительно большое сечение, то создать петлю невозможно, и в этих случаях создается натяжение полосы. Для этой цели выполняется условие:

$$F_i v_i < F_{i+1} v_{i+1}, \quad (20)$$

$$c_i < c_{i+1}.$$

Исходя из условия (20) величина каждого последующего секундного объема по ходу прокатки увеличивается. Это увеличение определяется формулой:

$$c_{i+1} = k_n \cdot c_i, \quad (21)$$

$$k_n = 1,005 \dots 1,015,$$

где k_n - коэффициент натяжения полосы.

Между выражениями (19) и (21) видна разница в индексах константы c .

Величина k_n определяет величину натяжения полосы.

Для расчета величины натяжения полосы используют формулы:

$$\sigma_n = E \cdot \frac{\Delta L}{L}, \quad (22)$$

где E – модуль упругости металла полосы;

ΔL – упругое удлинение полосы между клетями;

L – расстояние между клетями.

Для выражения σ_n через k_n воспользуемся зависимостью:

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta L}{L}, \quad (23)$$

где Δv – разница в скоростях вращения валков.

Из (23) следует:

$$\Delta L = L \frac{\Delta v}{v}. \quad (24)$$

В выражении (24) величину Δv можно выразить:

$$\Delta v = vk_{\text{н}} - v. \quad (25)$$

С учетом (24) и (25) получаем:

$$\sigma_{\text{н}} = E \cdot (k_{\text{н}} - 1). \quad (26)$$

Из (26) видно, что $\sigma_{\text{н}}$ прямопропорциональна величине коэффициента $k_{\text{н}}$. Поэтому натяжение регулирует значение $k_{\text{н}}$.

Для холодной прокатки величина $\sigma_{\text{н}}$ может достигать 0,35 $\sigma_{\text{Т}}$ ($\sigma_{\text{Т}}$ - предел текучести прокатываемого металла).

Для горячей прокатки $\sigma_{\text{н}} = 0,2\sigma_{\text{Т}}$.

Натяжение способствует выравниванию геометрии полосы, точному направлению движения полосы, равномерному распределению нагрузки на прокатные клетки, исключает влияние случайных отклонений режимов прокатки на согласованность вращения валков и движения полосы.

25. СОПРОТИВЛЕНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛА ПРИ ПРОКАТКЕ

Для горячей прокатки зависимость для сопротивления пластической деформации имеет вид:

$$\sigma_s = \sigma_0 \cdot n_{\varepsilon} \cdot n_t \cdot n_v,$$

где σ_0 – базовое значение сопротивления горячей классической деформации, определяется по стандартным методикам при определенных значениях температуры и скорости деформации, зависит от природных свойств обрабатываемого металла;

n_{ε} – коэффициент, учитывающий влияние на σ_s степени деформации;

n_t – коэффициент, учитывающий влияние на σ_s температуры обработки;

n_v – коэффициент, учитывающий влияние на σ_s скорости прокатки.

Для расчета значений $n_{\varepsilon}, n_t, n_v$ используют экспериментальные зависимости.

Рассмотрим эти зависимости в общем виде:

- $n_{\varepsilon} = A_1 \cdot \varepsilon^{n_1},$

где A_1, n_1 – эмпирические коэффициенты;

ε – степень деформации полосы по высоте.

Зависимость имеет график, приведенный на рисунке 31:

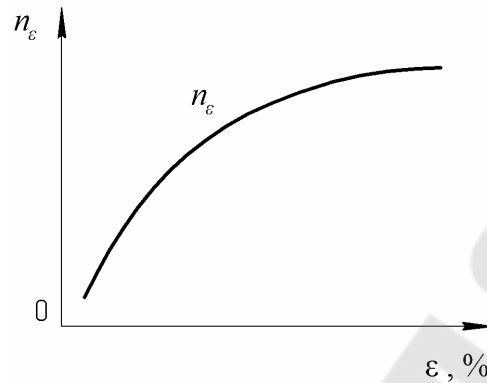


Рис. 31. График зависимости для коэффициента n_ε

Рост n_ε от ε объясняется эффектом деформации упрочнения.

$$2. n_t = A_2 \cdot e^{-n_2 t},$$

где A_2, n_2 – экспериментальные коэффициенты;

t – температура обработки полосы, °С;

e – натуральное число.

Из формулы следует обратная зависимость n_t и t . Но в этой зависимости есть исключение – оно связано с тем, что с повышением температуры обрабатываемой стали до 350-400°С наблюдается прямопропорциональная зависимость между n_t и t . Эта особенность объясняет наличием карбидообразования в стали, которое вызывает рост прочности. Зависимость имеет график, приведенный на рисунке 32:

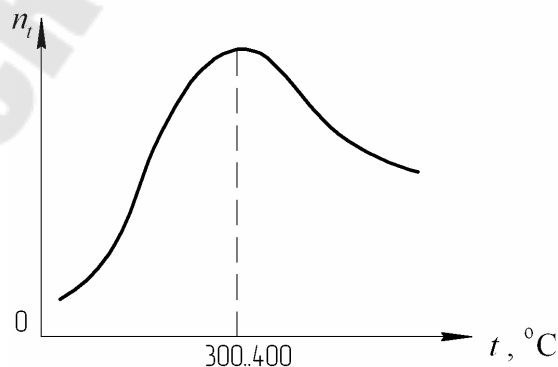


Рис. 32. График зависимости для коэффициента n_t

При нагреве выше 300-400°С наблюдается эффект разупрочнения, рассчитываемый по приведенной формуле.

Снижение прочности металла с повышением температуры объясняется повышением внутренней энергии металла, которая понижает прочность связи между атомами металла.

$$3. n_v = A_2 \cdot \dot{\epsilon}^{n_2}$$

где A_2, n_2 - экспериментальные коэффициенты;

$\dot{\epsilon}$ - скорость деформации.

Зависимость имеет график, приведенный на рисунке 33:

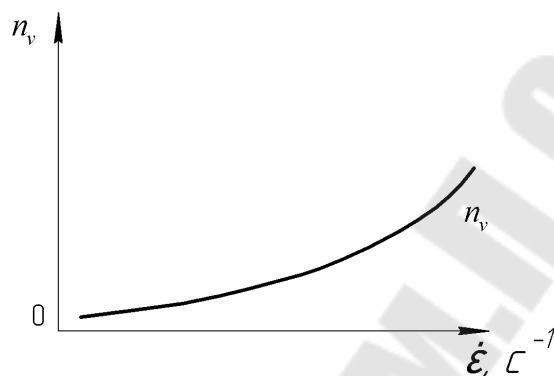


Рис. 33. График зависимости для коэффициента n_v

Прямо пропорциональная зависимость между n_v и $\dot{\epsilon}$ объясняется законным наличием релаксации или рекристаллизации при горячей деформации. Так, релаксация внутренних напряжений снижает σ_s . Релаксация имеет свою скорость протекания процесса. Если скорость прокатки повышается, то релаксация внутренних напряжений выполняется не полностью, а это влечет за собой рост σ_s . Рекристаллизация структуры горячедеформируемого металла также имеет свою скорость. Если скорость прокатки выше, то степень завершения рекристаллизации ниже, а это влечет за собой рост σ_s . Поэтому с ростом скорости горячей деформации σ_s растет.

Для холодной прокатки величина σ_s рассчитывается по формуле общего вида:

$$\sigma_s = \sigma_T \epsilon^n,$$

где σ_T - предел текучести обрабатываемого металла в полностью разупрочненном состоянии. Определяется по специальным методикам при определении значений параметров геометрии испытываемых образцов и скорость деформации.

Таким образом, σ_T учитывает влияние природы или сходных физико-механических свойств металла;

n - экспериментальный коэффициент;

ϵ - степень деформации полосы при прокатке (относительное обжатие полосы).

Зависимость не учитывает влияние температуры и скорости деформации. Это объясняется их относительно невысоким влиянием на σ_s при холодной деформации, но при повышении скорости холодной деформации, повышается температура заготовки от внутреннего трения и появляется влияние скорости. Поэтому для высокоскоростных процессов холодной прокатки необходимо дополнительно учитывать температуру и скорость деформации.

26. СРЕДНЯЯ СКОРОСТЬ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОКАТКЕ

Скорость деформации при прокатке используется для расчета сопротивления пластической деформации полосы и определяется из обобщенной формулы:

$$U = \varepsilon ,$$

$$U = \frac{d\varepsilon}{dt} \cdot c^{-1} , \quad (27)$$

где $d\varepsilon$ – элементарное изменение степени деформации ε ;
 dt – элементарное приращение продолжительности прокатки, с.

Но в очаге деформации при прокатке величина деформации ε изменяется от 0 до \max по закону отличному от прямой пропорции. Ускоряется и сама полоса. Поэтому скорость деформации U непостоянна на протяжении длины очага деформации. В этой связи необходимо получить значение средней скорости деформации $U_{ср}$.

Преобразуем параметры выражения (27):

$$d\varepsilon = \frac{dh}{h} ,$$

$$v = \frac{dh}{dt} ,$$

где dh – элементарное (мгновенное) изменение высоты полосы;
 h – текущее значение высоты полосы, относительно которого изменяется dh ;

v – текущее значение скорости полосы.

dt – элементарное превращение времени прокатки.

С учетом приведенных формул выражение (27) принимает вид:

$$U = \frac{v}{h}. \quad (28)$$

Таким образом, в формуле (28) величины v , h непостоянны, что не позволяет ей пользоваться в практических расчетах.

Среднее значение U определяется путем преобразования и решения интеграла:

$$U_{cp} = \frac{1}{l} \int_0^l U \cdot dx, \quad (29)$$

где dx – элементарное изменение длины очага деформации.

Преобразование и решение (29) позволяют получить уравнение для среднего значения скорости деформации:

$$U_{cp} = \frac{v_1}{l} \cdot \varepsilon = \frac{v_1 \cdot \alpha}{h_0}, \quad (30)$$

где v_1 – скорость полосы на выходе из валков;

l – длина очага деформации, который приравнен к длине дуги контакта.

α – угол прокатки;

ε – относительная степень деформации;

h_0 – высота полосы на входе в валки.

Уравнение (30) называется формулой А.И. Целикова для средней скорости деформации полосы при прокатке. Она может быть выражена через скорость вращения валков. В этом случае оно имеет вид:

$$U_{cp} = v_B \cdot \frac{\alpha}{h_{cp}}, \quad (31)$$

где v_B – линейная скорость вращения прокатных валков;

α – угол прокатки, рад;

h_{cp} – средняя высота полосы, рассчитываемая по формуле:

$$h_{cp} = \frac{h_0 + h_1}{2}.$$

На практике средняя скорость деформации может достигать 10^4 с^{-1} .

27. НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКЕ

Напряженное состояние твердого тела характеризуется направлениями векторов главных нормальных напряжений. Характер напряженного состояния зависит от вида схемы деформации, от схемы приложения нагрузки, от контактного трения, от свойств деформируемого материала, от разницы форм заготовки и инструмента. При прокатке напряженное состояние в деформируемом металле также зависит от приведенных параметров.

Напряженное состояние очага деформации при прокатке влияет на давление, усилие, момент, энергию и мощность прокатки, т.е. оно определяет все энергосиловые параметры прокатки. Вид напряженного состояния очага деформации соответствует главному напряжению сжатия по высоте очага и двум главным напряжениям сжатия по длине и ширине очага (рис. 34). Такой вид напряженного состояния определяется схемой нагружения очага деформации. Контактные валки принудительно сжимают полосу по ее высоте. В этой связи возникает первое главное напряжение сжатия по высоте. Если принять прокатку идеальной, без контактного трения, то это главное напряжение было бы единым. Но в реальных условиях трение существует всегда. Оно сдерживает деформацию полосы по длине и ширине очага. Это явление вызывает появление двух других главных напряжений сжатия: по ширине и длине. Напряжения в очаге деформации распределены по всему его объему. Непосредственное влияние на валки оказывают напряжения, действующее на контакте с валком, т.е. контактное напряжение. Среднее значение контактных напряжений создает давление прокатки. Сила прокатки влияет на величину момента, работы и мощности прокатки. Поэтому основным элементом приведенной цепочки параметров является контактное напряжение.

Контактное напряжение бывает нормальным и касательным по отношению к поверхности контакта полосы и валков.

Выделим в очаге деформации бесконечно малый объем металла, условно обозначенный кубом в центре очага деформации. Определим главные нормальные напряжения, которые будут действовать на выделенный объем. Для этого определим основные деформации полосы. Деформация по высоте обеспечивается сжимающим действием валков. Вследствие этого действия возникает первое главное напряжение σ_1 . Вектор σ_1 приводится на условной модели элемента объема в виде куба. Объем полосы, смещенный по полосе, перераспределяется на удлинение и уширение полосы. Если принять идеальный случай прокатки с отсутствием контактного трения, то никаких других главных напряжений больше не возникло бы, но трение присутствует всегда. Вследствие его действия появляются еще два главных напряжения σ_2 и σ_3 . Напряжение σ_3 действует в продольном направлении прокатки. В соответствии с законом наименьшего сопротивления деформация полосы в направлении длины распространяется более интенсивно по сравнению с направлением по ширине. Поэтому напряжение σ_3 меньше σ_2 .

В теории прокатки для упрощения анализа процесса объемное напряженное состояние условно принимают плоским с векторами напряжения σ_1 и σ_2 . Напряжение σ_2 и его влияние на силовой анализ прокатки учитывают посредством коэффициента Лодэ – β . Если прокатывается широкая полоса, то уширение отсутствует и сопротивление уширению максимально. В этом случае $\beta = 1,15$. Если очаг прокатки узкий, то сопротивление уширению невелико и $\beta = 1$.

Наибольшее практическое значение имеют контактные напряжения. Контактные напряжения являются разновидностью внутренних напряжений и действуют на поверхности контакта с инструментом. Различают:

- контактное касательное напряжение - τ ;
- контактное нормальное напряжение – p .

Со стороны прокатного вала на полосу действует касательное напряжение - τ_x и нормальное напряжение - p_x .

Для зон отставания и опережения τ_x направление противоположно. Это связано с направлением пластического течения металла. Пластическое течение направлено в противоположные стороны от нейтрального течения. Положение нейтрального сечения обозначают углом γ .

Со стороны полосы на валки действуют аналогичные напряжения, но противоположные по знаку, то есть:

$$\tau_B = -\tau_x,$$

$$p_B = -p_x.$$

На второй контактной поверхности второго вала действуют аналогичные напряжения.

Из схемы видно, что $\sigma_1 = p_x$. Отклонение в равенстве вызвано отклонением в направлении этих векторов:

- σ_1 - вертикально;
- p_x - вдоль радиуса вала.

28. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРОДОЛЬНОМ СЕЧЕНИИ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКИ

Помимо контактных напряжений в очаге деформации также действуют внутренние напряжения. В соответствии со схемой напряженного состояния очага деформации при прокатке внутренних напряжений должны быть сжимающими. Сжимающий характер внутренних напряжений связан с деформацией сжатия полосы валками, а также с действием контактных напряжений по длине и ширине полосы в очаге деформации. Для идеального случая прокатки (без контактного трения) внутренних напряжений сжатия должны быть распределены равномерно. Но действие контактного трения вызывает неравномерность деформации. В связи с этим возникает отклонение распределения напряжений от равномерного состояния. Характер этого отклонения зависит от высоты очага деформации:

Рассмотрим распределение внутренних напряжений σ_2 для низких очагов деформации (рис. 35), когда $l > h_{cp}$. В результате действия контактного трения возникает неравномерность деформации полосы ϵ_2 вдоль направления прокатки. Эта деформация в приконтактных слоях полосы сдерживается контактными силами трения, поэтому для внутренних областей (зон) полосы деформация ϵ_2 больше для приконтактных контуров. В соответствии с законом дополнительных напряжений Губкина в менее деформированных слоях полосы, то есть в приконтактных, возникают дополнительные растягивающие напряжения положительные - растягивающие. Именно поэтому приконтактное напряжение σ_2 может оказаться растягивающим. На практике это может привести к расслаиванию или трещинообразованию при прокатке малопластичных металлов.

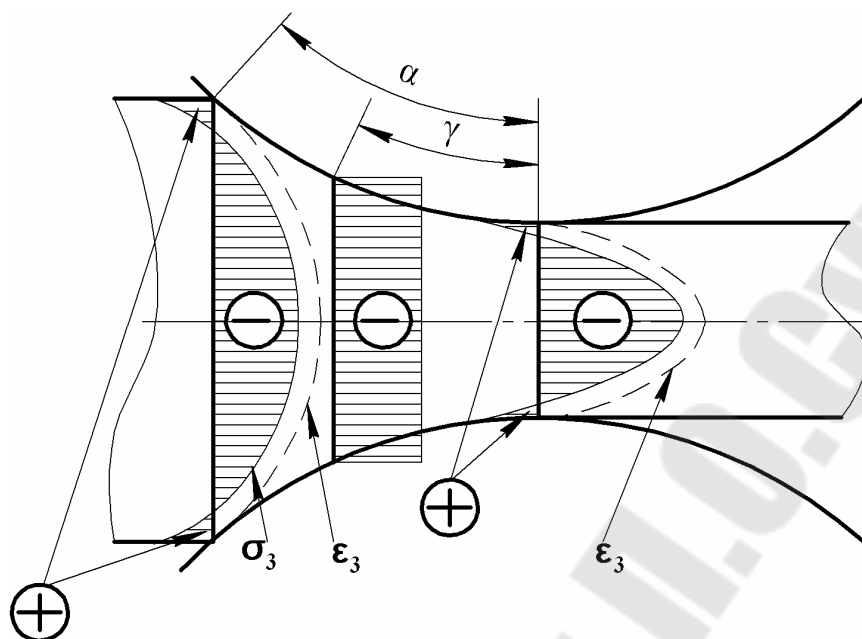


Рис. 35. Распределение внутренних напряжений в низком очаге

Рассмотрим распределение продольных напряжений ϵ_3 для высоких очагов деформации (рис.36).

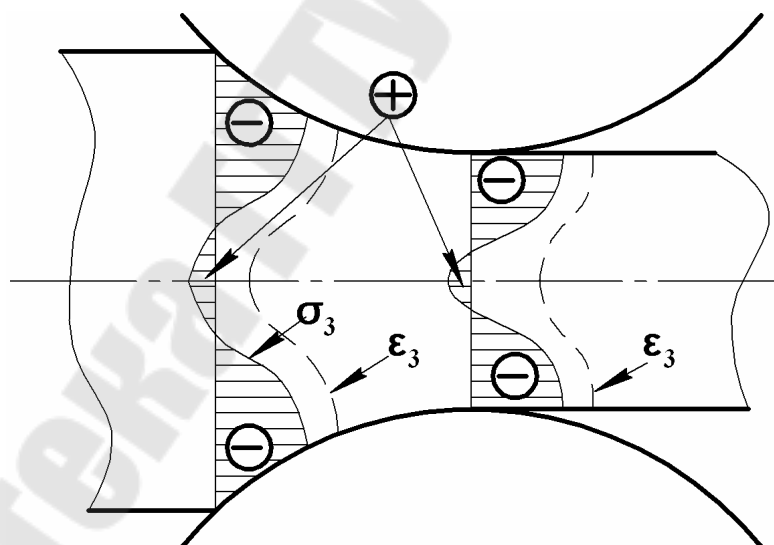


Рис. 36. Распределение внутренних напряжений в высоком очаге

Для высоких очагов деформации характерна обратная зависимость для дополнительных напряжений, действующих в продольном направлении. Так, максимальные продольные деформации ϵ_3 возникают в приконтактных слоях полосы, а срединные области очага деформации менее деформированы, поэтому по закону действия дополнительных напряжений в менее деформируемых срединных слоях действуют дополнительные растягивающие напряжения. В этой связи в особых случаях могут возникать растягивающие продольные напряжения σ_3 в середине полосы.

29. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКИ

Рассмотрим распределение внутренних напряжений в поперечном сечении полосы на выходе из прокатных валков (рис. 37, 38), индексы напряжений показывают направления действия напряжений.

1) В очаге деформации с низким сечением (рис. 37), когда $b_{cp} > h_{cp}$, можно ограничить три характерные зоны, для которых преобладающее напряженное состояние характеризуется приведенными схемами напряжений. Надпись *max* характеризует максимальную интенсивность деформации. В центре сечения напряжения соответствуют равномерному всестороннему сжатию. По краям сечения напряженное состояние близкое к плоскому. В приконтактной области наиболее стесненные слои металла.

2) В очаге деформации с высоким сечением (рис. 38), когда $h_{cp} > b_{cp}$, можно ограничить три характерные зоны, для которых преобладающее напряженное состояние характеризуется приведенными схемами напряжений. Надпись *max* характеризует максимальную интенсивность деформации. В центре сечения напряжения соответствуют равномерному

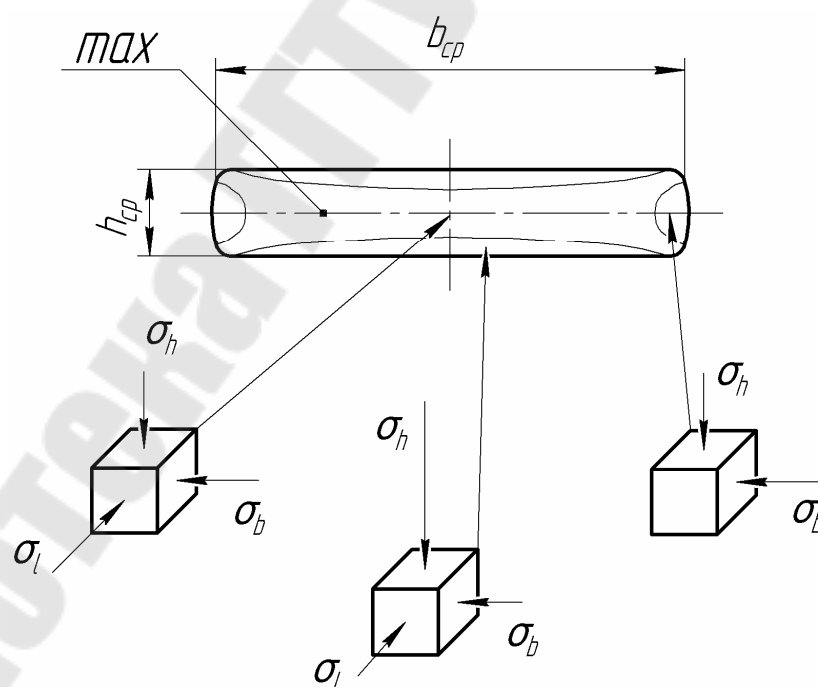


Рис. 37. Распределение внутренних напряжений в низком сечении

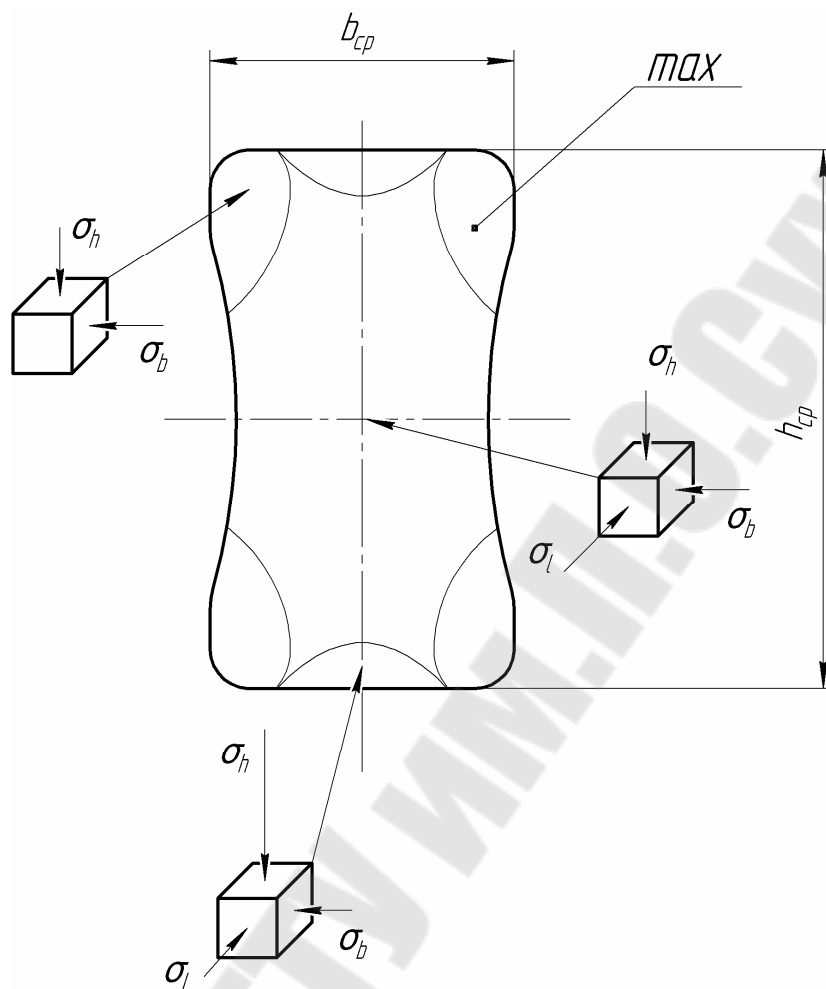


Рис. 38. Распределение внутренних напряжений в высоком сечении

всестороннему сжатию. По краям сечения напряженное состояние близкое к плоскому. В приконтактной области наиболее стесненные слои металла.

Если анализировать среднее значение σ_z , то общий знак будет отрицательный, поэтому в общем итоге напряженное состояние очага деформации при прокатке соответствует всестороннему сжатию.

30. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ДУГЕ КОНТАКТА ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКИ

Для энергосилового анализа процесса прокатки используются контактные напряжения p_x, τ_x . Распределение этих напряжений оказывает влияние на давления, усилия, энергию, момент и мощность прокатки. Поэтому весь последующий анализ напряжений в очаге деформации при прокатке будет направлен на изучение этих напряжений. Распределение этих напряжений непостоянно, они зависят от сопротивления пластической деформации обрабатываемого металла, от значения коэффициента контактного трения, от геометрии очага деформации.

Рассмотрим характерные варианты распределения этих напряжений:

1. Для низких очагов деформации (рис. 39), когда $l > 5 \cdot h_{ср}$.

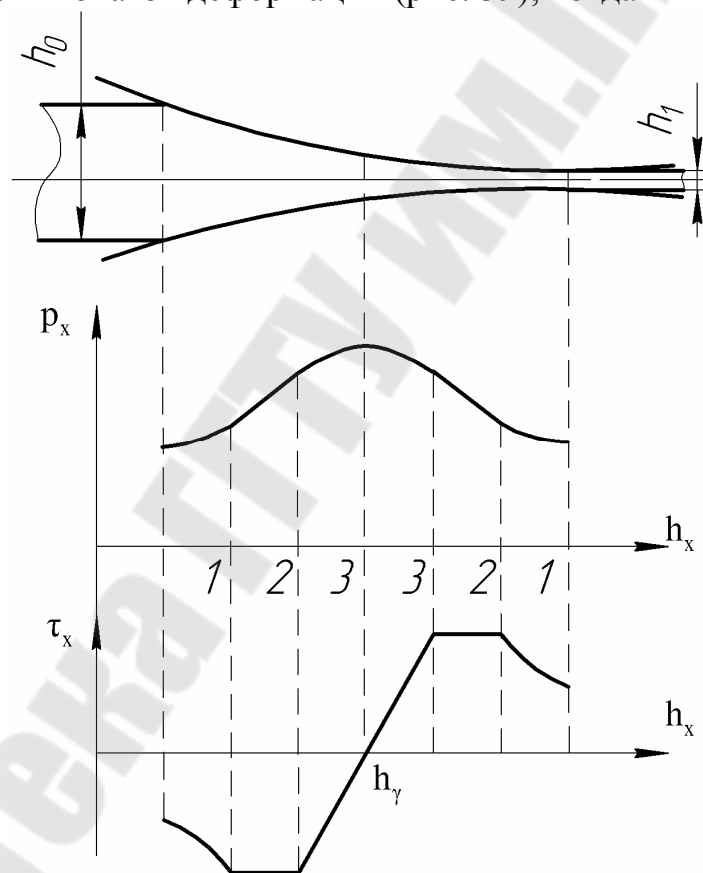


Рис. 39. Распределение контактных напряжений на самых низких очагах деформации

Значение p_x максимально на уровне неотрывного сечения полосы h_γ . Это связано с максимальным затруднением пластической деформации на уровне неотрывного сечения, а на уровне сечения h_1 и h_0 пластическая деформация максимальна и свободна. τ_x имеет противоположные знаки для зон опережения, отставания. Это связано с противоположным направлением пластического течения металла для этих зон.

Зоны 1 называются зонами скольжения, так как они характеризуются максимальным проскальзыванием между металлом и валком.

Зоны 2 называются зонами торможения. Это связано с максимальными значениями контактных сил трения τ_x . Эти значения равны $0,5\sigma_s$. Максимум τ_x не может превысить это значение.

Зоны 3 называются зонами налипания или зонами минимального скольжения между металлом валков. Это связано с расположением этих зон возле нейтрального сечения, для которого скорость полосы и валка равны. Нейтральное сечение – это условное понятие, характеризующее относительно узкий поперечный объем полосы. Величина этого объема тем больше, чем выше очаг.

2. Для низких очагов деформации (рис. 40), когда $l > (2 \dots 5) \cdot h_{cp}$

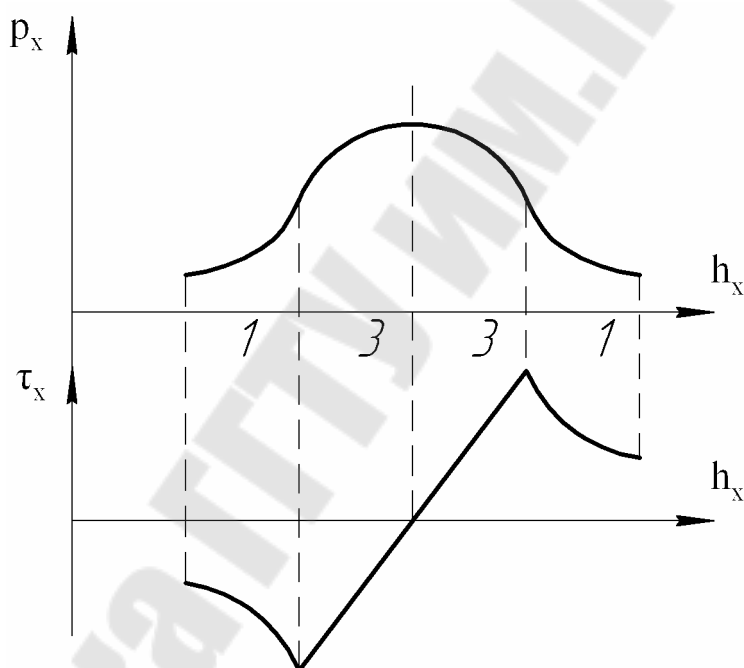


Рис. 40. Распределение нормальных контактных напряжений на низких очагах деформации

Для схемы характерно отсутствие зон торможения 2 и рассмотрение зон минимального скольжения 3. Это объясняется повышением очага деформации.

3. Для равноосных очагов деформации $l = (0,2 \dots 2) \cdot h_{cp}$, для которых длина почти приближена к высоте (рис.41).

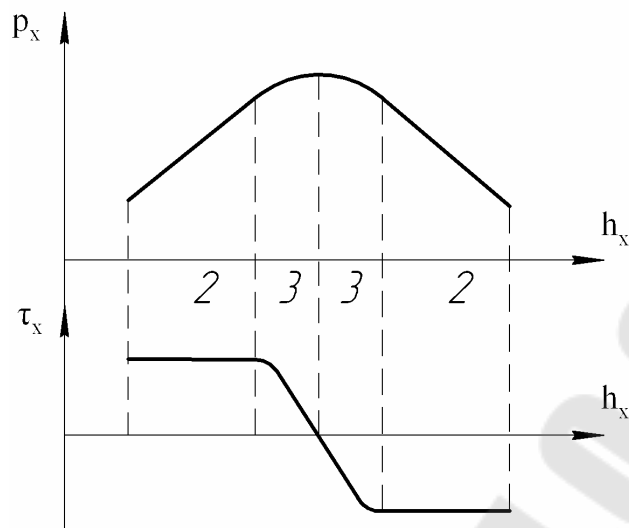


Рис. 41. Распределение нормальных контактных напряжений на равноосных очагах деформации

Для схемы характерно отсутствие зон скольжения 1. Это также объясняется увеличением высоты очага и уменьшением интенсивности контакта пластической деформации.

4. Для высоких очагов деформации $l < 0,2 \cdot h_{ср}$.

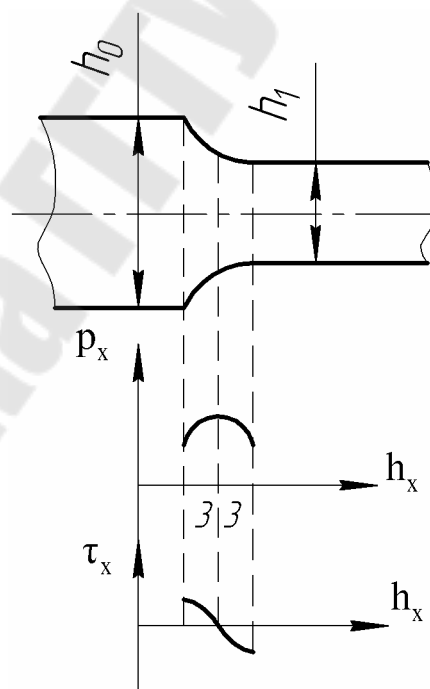


Рис. 42. Распределение нормальных контактных напряжений на высоких очагах деформации

Для данной схемы вся длина контакта металла с валком представляет собой зону минимального скольжения или налипания, для которой характерно условное обозначение участков 3.

31. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПО ШИРИНЕ ПОЛОСЫ В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКИ

Напряжения, как внутреннее, так и контактное распределяется по ширине полосы неравномерно.

Рассмотрим распределение по ширине полосы напряжения σ_z , направленного вдоль оси полосы. Для этого распределения характерны два основных случая:

1. $b_{\text{ср}} < l$ (рис. 43).

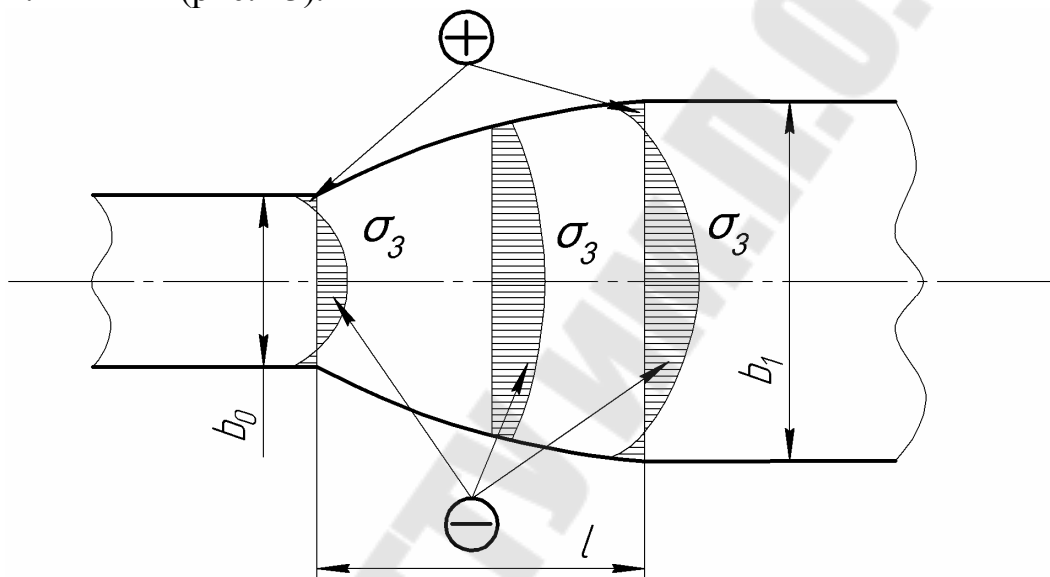


Рис. 43. Распределение по ширине полосы продольных напряжений в узком очаге деформации

Неравномерность в распределении σ_z по ширине полосы вызывается неравномерностью продольной деформации. Так в приконтактных зонах возникают растягивающие напряжения, в связи с менее интенсивной их продольной деформации.

В определенных схемах прокатки растягивающие напряжения способны вызвать трещинообразование в краях полосы.

Крайние области полосы интенсивно деформируются по ширине полосы, преимущественно обеспечивают уширение, поэтому их интенсивность течения в продольных направлениях ниже. На уровне нейтрального сечения растягивающие σ_z отсутствуют, так как в этом сечении пластическая деформация минимальна или равна 0. На уровне сечения выхода из очага картина распределения σ_z аналогична картине распределения на входе.

2. $b_{\text{ср}} > l$.

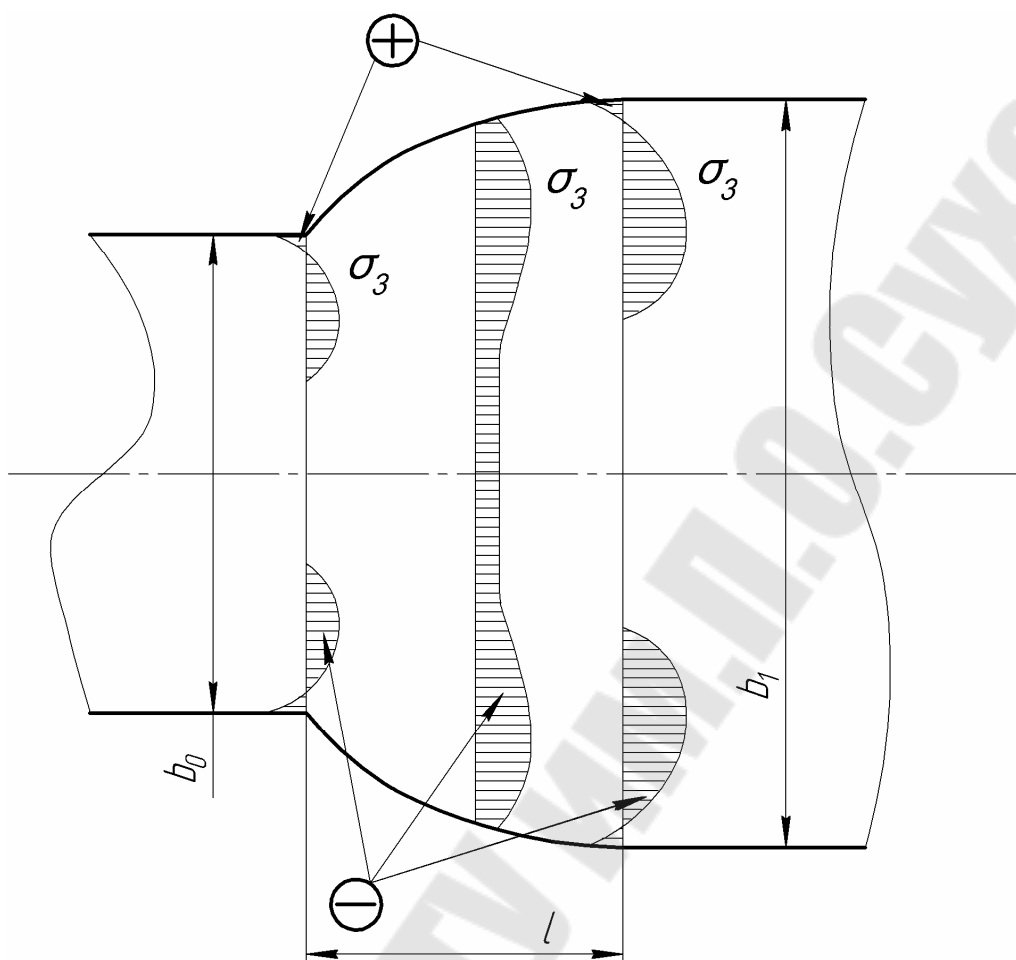


Рис. 44. Распределение по ширине полосы продольных напряжений в широком очаге деформации

На широких очагах деформации напряжения σ_3 концентрируются на краях полосы. Это также объясняется неравномерностью продольной деформации. Периферийные края полосы испытывают более интенсивные пластические деформации. В центре полосы по ширине деформация менее интенсивна. Неравномерность такого распределения учитывается при производстве широких листов и полос. При избыточном упрочнении неравномерность напряжений и деформаций по ширине способна вызвать волнообразование или коробление краев полосы.

32. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНТАКТНЫХ НОРМАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПО ШИРИНЕ ПОЛОСЫ ДЛЯ ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКИ

Рассмотрим распределение нормальных контактных напряжений p_x по ширине полосы для очагов с разным соотношением размеров поперечного сечения очага деформации:

- 1) $b_{cp} < h_{cp}$ (рис. 45).

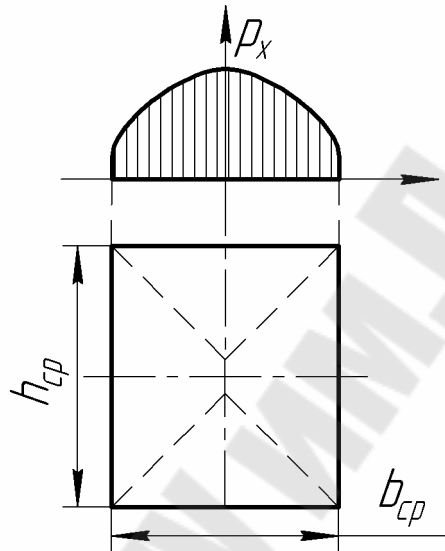


Рис. 45. Распределение по ширине полосы контактных нормальных напряжений в очаге с высоким сечением

- 2) $b_{cp} \approx h_{cp}$ (рис. 46).

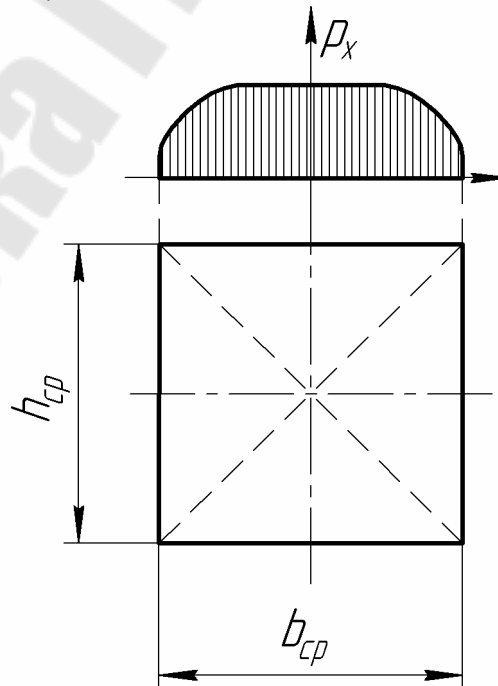


Рис. 46. Распределение по ширине полосы контактных нормальных напряжений в очаге с равноосным сечением

3) $b_{cp} > h_{cp}$ (рис. 47).

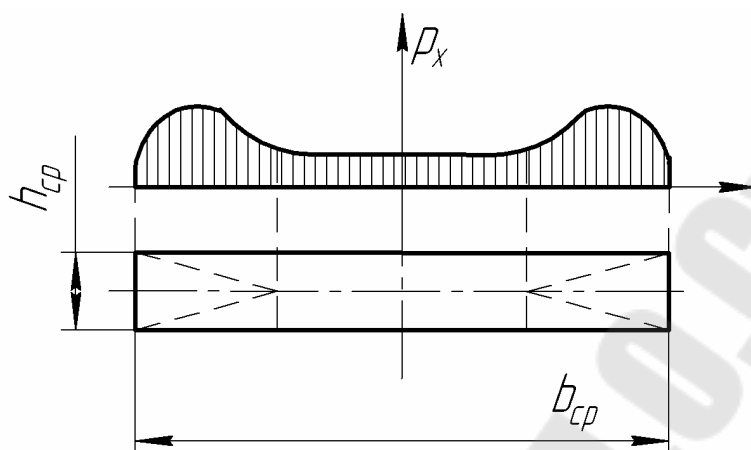


Рис. 47. Распределение по ширине полосы контактных нормальных напряжений в очаге с низким сечением

Неравномерность распределения P_x объясняется неравномерностью интенсивности деформации по ширине полосы. Так, для случая 1) центральное значение P_x превосходит периферийное в связи с более интенсивной деформацией уширения для периферийных областей. В центре ширины полосы деформация стесненная, то есть ограниченная, поэтому для ее осуществления требуется больше энергозатрат за счет роста P_x .

Схема 2) отличается от схемы 1) более широкой центральной зоной, ограниченной деформацией.

Для схемы 3) характерно более значительно неравномерная деформация. Для таких схем характерно наличие малых значений уширения. Поэтому интенсивность деформаций периферийных зон перераспределяется от ширины на длину полосы. В этой связи на краях полосы повышается значение P_x .

33. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ШИРИНЫ И ВЫСОТЫ ПОЛОСЫ НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ

Напряженное состояние очага деформации при прокатке оказывает влияние на энергосиловые режимы прокатки. Так, напряженное состояние способно существенно изменить давление прокатки: увеличить его величину до 10 раз или уменьшить на несколько процентов. Количественную оценку этого влияния связывают с коэффициентом напряженного состояния очага деформации при прокатке: $n_{\sigma} = 0,7 \dots 10$.

Величина n_{σ} зависит от геометрических размеров очага деформации: $b_{cp} \cdot h_{cp} \cdot l$, от коэффициента контактного трения f , а также от натяжений и подпоров полосы Q_0, Q_1 , действующих на полосу на входе и выходе из очага деформации. Величина n_{σ} рассчитывается по формуле:

$$n_{\sigma} = n_b \cdot n_h \cdot n_f \cdot n_q,$$

где

n_b – коэффициент, учитывающий влияние на напряженное состояние ширины полосы;

n_h – коэффициент, учитывающий влияние на напряженное состояние высоты полосы;

n_f – коэффициент, учитывающий влияние на напряженное состояние контактного трения;

n_q – коэффициент, учитывающий влияние на напряженное состояние передних и задних натяжных подпоров полосы.

Рассмотрим влияние величины ширины и высоты полосы на напряженное состояние (рис. 48, 49).

Влияние ширины полосы на напряженное состояние оценивается коэффициентом $n_b = \beta$, изменяющимся в пределах: $n_b = 1 \dots 1,15$.

Ранее отмечалось, что для узких очагов принимается $n_b = 1$, а для широких - $n_b = 1,15$. Для точных расчетов эта величина определяется по специальным формулам, выраженным через параметры очага деформации. Эти формулы экспериментальные. Существует несколько разновидностей таких зависимостей. Наиболее удобной для практического использования является следующая:

$$n_b = 1 + \frac{f}{3} + \frac{b_{cp}}{h_{cp}}.$$

Зависимость используется при условии $\frac{b_{cp}}{h_{cp}} = 1 \dots 5$.

Если $\frac{b_{cp}}{h_{cp}} < 1$, то принимаем $n_b = 1$.

Если $\frac{b_{cp}}{h_{cp}} > 1$, то принимаем $n_b = 1,15$.

График зависимости для n_b приведен на рисунке 48.

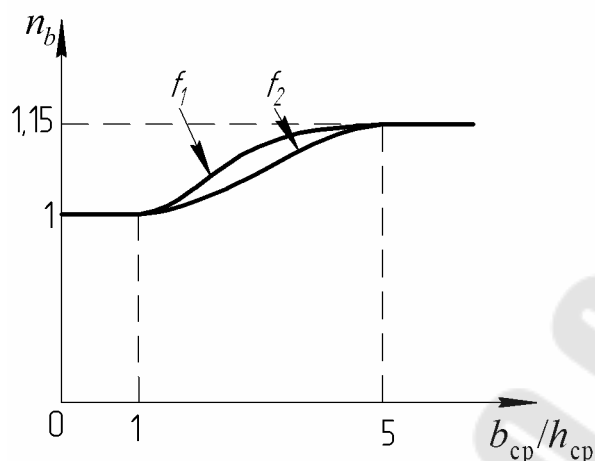


Рис. 48. Зависимость коэффициента n_b от соотношения геометрических размеров очага деформации:
 f_1 и f_2 – коэффициенты трения для разных условий прокатки

Зависимость для n_b обусловлена различием в схеме деформации уширения для разных сечений. Для высоких сечений уширение более свободно, деформация уширения не затруднена, главное напряжение σ_z минимально, поэтому влияние ширины полосы на напряженное состояние очага отсутствует. Для низких сечений очага деформации, деформация уширения затруднена, что вызывает рост σ_z и, как следствие усиливает напряженное состояние очага деформации. Максимальное значение n_b сравнительно невелико, поэтому для упрощенных расчетов используются крайние его значения.

Рассмотрим влияние высоты очага деформации на напряженное состояние. Для количественной оценки этого влияния рассчитывается коэффициент n_h . Для этого используются эмпирические формулы. Имеется большое количество разновидностей таких формул, но наиболее практичная следующая::

$$n_h = \sqrt{2 - \frac{l}{h_{cp}}}, \quad n_h = 1 \dots 8$$

Формула применяется при условии $\frac{l}{h_{cp}} \leq 1$.

Если $\frac{l}{h_{cp}} > 1$, то $n_h = 1$.

График зависимости для n_h приведен на рисунке 49.

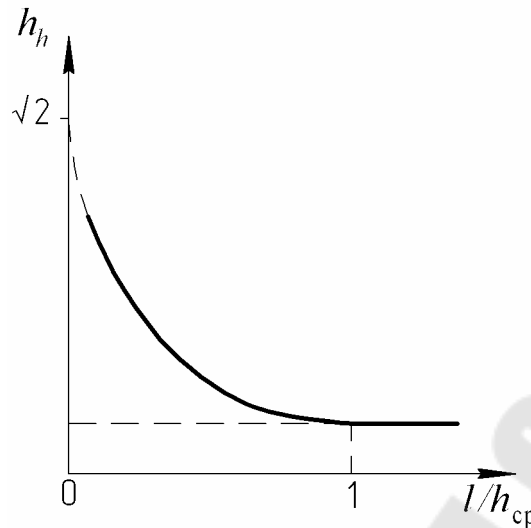


Рис. 49. Зависимость коэффициента n_h от соотношения геометрических размеров очага деформации

При прокатке на низких очагах деформации неравномерность деформации полосы по сечению не велика, то есть интенсивность деформации в направлении прокатки максимально равномерна по всей высоте сечения. Поэтому в этом случае высота полосы не окажет существенного влияния на напряженное состояние очага деформации.

При прокатке полосы на высоких очагах центральные слои полосы деформируются менее интенсивно по сравнению с периферийными. В результате деформация средних слоев затруднена. Это вызывает дополнительный рост внутренних напряжений для смещения этих слоев в направлении прокатки. В итоге напряженное состояние усиливается.

34. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА КОНТАКТНОГО ТРЕНИЯ ПОЛОСЫ, НАТЯЖЕНИЯ И ПОДПОРА ПОЛОСЫ НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ

Контактное трение повышает напряженное состояние очага деформации вследствие сдерживания пластических деформаций в приконтактных слоях полосы. Влияние трения на напряженное состояние очага деформации оценивается коэффициентом n_f . Для расчета коэффициента также используются разные экспериментальные формулы. Одной из них, наиболее распространенных является следующая формула:

$$n_f = \frac{e^a - 1}{a};$$

$$a = f \cdot \frac{l}{h_{cp}}.$$

Величина этого коэффициента изменяется в пределах:

В приведенной формуле учтена продольная пластическая деформация. Деформация на уширение также сдерживается контактным трением, но влияние контактного трения по длине очага больше чем по ширине, поэтому действие трения по ширине не учитывается. Если расчетная формула дает значение меньше 1, то принимают $n_f = 1$.

Приведенная формула используется при условии $\frac{l}{h_{cp}} = 1 \dots 5$.

При условии $\frac{l}{h_{cp}} = 5$ принимается максимальное значение n_f . Если $\frac{l}{h_{cp}} > 5$, принимается значение n_f , рассчитанное для условия .

График зависимости для n_f приведен на рисунке 50.

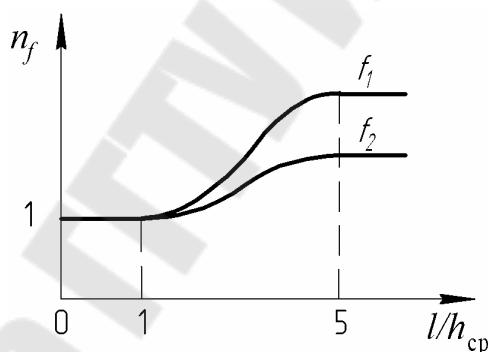


Рис. 50. Зависимость коэффициента n_f от соотношения геометрических размеров очага деформации

Количественное влияние натяжения подпора полосы на напряженное состояние очага оценивается коэффициентом n_q .

Величина $n_q = 0,7 \dots 1,0$.

Влияние натяжения подпоры полосы обусловлено дополнительным силовым воздействием на прокатные валки. Для расчета необходимо принять схему алгебраических знаков натяжения подпоры.

Подпоры полосы усиливают напряженное состояние. В современном прокатном производстве подпоры полосы обычно используются при прокатке тонких профилей для петлеобразования между клетями. А натяжение для прокатки больших сечений и для холодно-листовой прокатки. Поэтому можно принять, что на напряженное состояние в большинстве случаев оказывают влияние натяжения полосы. Для расчета количественной оценки этого влияния применяется формула:

$$n_q = 1 - \frac{q_0 + q_1}{2\sigma_s}$$

где σ_s – сопротивление пластической деформации.

График зависимости для n_q приведен на рисунке 51.

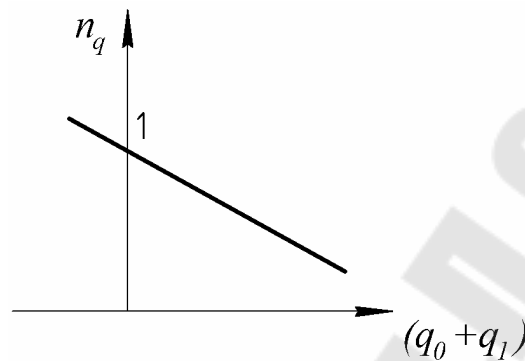


Рис. 51. Зависимость коэффициента n_q от величины натяжений и подпоров полосы

Для натяжений полосы знаки при величинах q_0 и q_1 плюс, так как в этом случае двухстороннее растяжение полосы.

Если действующая схема натяжения и подпоров полосы направлена по ходу прокатки, то в этом случае натяжение и подпоры способствуют продвижению полосы и разгружают очаг деформации, в этом случае знаки при q_0 и q_1 плюс и величина n_q снижается. Если же напряжения и подпоры направлены против хода прокатки, то они сдерживают движение полосы и этим повышают напряженное состояние очага деформации. В этом случае знаки при q_0 и q_1 минус и величина n_q повышается. Если итоговая сумма $q_0 + q_1$ с учетом знаков величин положительна, то точка на графике рисунка 51 находится ниже 1 для n_q . Если сумма отрицательна – точка на графике находится выше значения 1 для n_q .

Максимальные значения натяжений q_0, q_1 используются при холодной листовой прокатке. Они могут достигать 30 % от σ_s .

35. ДАВЛЕНИЕ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ В КАЛИБРАХ

Давление прокатки в калибрах превосходит давление прокатки на цилиндрических валках до 1,5 раз. Это связано с неравномерностью деформации сечения полосы в калибре, с повышенным значением площади контакта полосы в калибре. С ограничением уширения боковыми стенками калибра.

Давление прокатки в калибрах рассчитать аналитически с достаточной точностью не возможно. Поэтому используются экспериментальные или эмпирические формулы. Эмпирические

формулы получают не аналитическим выводом, а из серии экспериментов. Экспериментальный материал специально обрабатывают и на основе этого получают математическую запись позволяющую рассчитать давление прокатки.

Используется несколько методик расчета величины давления прокатки в калибрах. Наиболее рациональными можно признать следующие:

1. Расчет по приведенной полосе.

$$p = p^{\uparrow} \cdot n_K, \quad (32)$$

где p^{\uparrow} - давление прокатки, рассчитанное для горячей листовой прокатки приведенной полосы;

n_K - эмпирический коэффициент, учитывающий влияние калибра на давление прокатки.

Величина p^{\uparrow} рассчитывается по формуле, учитывающей наличие натяжения и подпоров полосы применительно к приведенной полосе:

$$p^{\uparrow} = \sigma_s / \alpha^{\uparrow} \left[\alpha^{\uparrow} + R / h_{cp} \left(f(\alpha^{\uparrow})^2 - 2/3 (\alpha^{\uparrow})^3 + 2f\gamma^{\uparrow} + (\alpha^{\uparrow})^2 \gamma - 2f\gamma\alpha^{\uparrow} \right) \right] n_{\uparrow} b n_{\uparrow} q, \quad (33)$$

где α^{\uparrow} - угол прокатки, отнесенный к приведенной полосе.

Величина n_K рассчитывается по формуле:

$$n_K = \frac{1 + K \frac{2}{3} f \frac{l}{h_{cp}}}{1 + \frac{1}{3} f \frac{l}{h_{cp}}}, \quad (34)$$

где K - коэффициент формы калибра, для фасонных калибров равен 1, для простых калибров равен 0,6...0,8.

2. Расчет по универсальной эмпирической формуле

Наиболее обобщенной эмпирической формулой является следующая система уравнений:

$$p = \sigma_s n_{\sigma} n_K, \quad (35)$$

$$\sigma_s = \sigma_0 n_\varepsilon n_v n_t,$$

$$n_\sigma = n_f n_k n_b n_q,$$

где

σ_s – сопротивление пластической деформации обрабатываемого металла;

n_σ – коэффициент напряжённого очага деформации;

σ_0 – базовое значение сопротивления деформации, соответственно для холодной деформации пределу текучести металла до прокатки, для горячей прокатки эта величина определяется по специальной методике при определенной температуре, скорости и степени деформации.

n_t – коэффициент учитывающий температуру обрабатываемого металла;

n_ε – коэффициент учитывающий степени деформации металла;

n_v – коэффициент учитывающий скорость прокатки;

n_f – коэффициент учитывающий влияние контактных трений;

n_b – коэффициент учитывающий влияние ширины полосы;

n_k – коэффициент учитывающий высоту полосы;

n_q – коэффициент учитывающий натяжение полосы.

Для приведенных коэффициентов используются эмпирические формулы, имеющие большое количество разновидностей, рекомендуемых для определенных случаев или схем прокатки.

Сопротивление пластической деформации зависит от механических свойств металла в исходном состоянии, от степени и скорости деформации, от температуры деформации при прокатке.

Коэффициент напряженного состояния очага деформации зависит от коэффициента контактного трения, от высоты и ширины очага деформации, от натяжений и подпоров передних и задних, действующих на полосы.

Коэффициент n_k зависит от формы калибра, от коэффициента контактного трения, от длины и высоты очага деформации.

Таким образом, формулы (35) учитывают все особенности прокатки и могут быть рекомендованы для всех схем прокатки, но для холодной листовой прокатки должна использоваться своя зависимость.

36. УСИЛИЕ И МОМЕНТ ПРОСТОЙ ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКИ

Величина усилия прокатки P зависит от давления прокатки P и площади контакта между валком и полосой F_k :

$$P = p \cdot F_k. \quad (36)$$

Зависимость (36) позволяет определять усилие прокатки расчетным способом. Для этого необходимо заранее рассчитать p и F_k . Расчеты проводят по формулам, характерным для рассматриваемого случая прокатки.

Усилие P может быть определено экспериментально. Для этой цели используются специальные силоизмерительные средства. В комплекс этих средств входят чувствительные датчики, способные изменять свое электросопротивление под воздействием внешней нагрузки. Усилие прокатки P , действующее на элемент прокатной клетки, в которой смонтирован этот датчик и изменяется электросопротивление этого датчика. В результате прибор фиксирует это изменение опосредованным способом, определяет усилие прокатки.

Экспериментальное определение возможно только на действующем процессе прокатки.

Для проектирования новых процессов прокатки используют расчетный метод определения P с помощью формулы (36).

Рассмотрим вектора основных сил прокатки (рис. 52):

T_0 – результирующая сила касательных контактных напряжений, действующих в зоне опережения.

T_1 – результирующая касательная контактная сила в зоне отставания.

T – результирующая контактная касательная сила, действующая в очаге деформации.

$$\bar{T} = \bar{T}_0 + \bar{T}_1,$$

где N – результирующая нормальная контактная сила.

α_p – угол определения точки приложения векторов \bar{N} , \bar{T} и \bar{P}

P – усилие прокатки или результирующая сила всех имеющихся контактных сил.

$$\bar{P} = \bar{N} + \bar{T}.$$

При простой прокатке, когда отсутствует натяжение, подпоры полосы и диаметр валков одинаковы и вращаются с равными скоростями, величина плеча вектора \bar{P} определяется как расстояние между прямыми, проходящими через центр валков и через вектор \bar{P} . Эти прямые параллельны, расстояние

между ними a , которое и называется плечом усилия прокатки. T_0 – результирующая сила касательных контактных напряжений, действующих в зоне опережения.

Момент прокатки равен:

$$M = P \cdot a. \quad (37)$$

Значение P можно определить как скалярную величину вектора \vec{P} :

$$P = N \cos \alpha_p + T \sin \alpha_p. \quad (38)$$

Из формулы (38) следует, что основную величину P составляет проекция вектора \vec{N} на прямую, проходящую через \vec{P} , поэтому в расчетах влиянием касательных сил на усилие прокатки пренебрегают.

Так как α_p относительно мал, то $\sin \alpha_p \approx 0$.

Величина α_p определяется по формуле:

$$\alpha_p = \frac{\alpha}{n}, \quad (39)$$

где n – коэффициент приложения вектора \vec{P} изменяется от 1÷3, для простой прокатки 2.

Для вычислений по формуле (37) используется формула (36) для P и зависимость для a :

$$a = \psi l, \quad (40)$$

где ψ – коэффициент плеча усилия прокатки;

l – длина очага деформации.

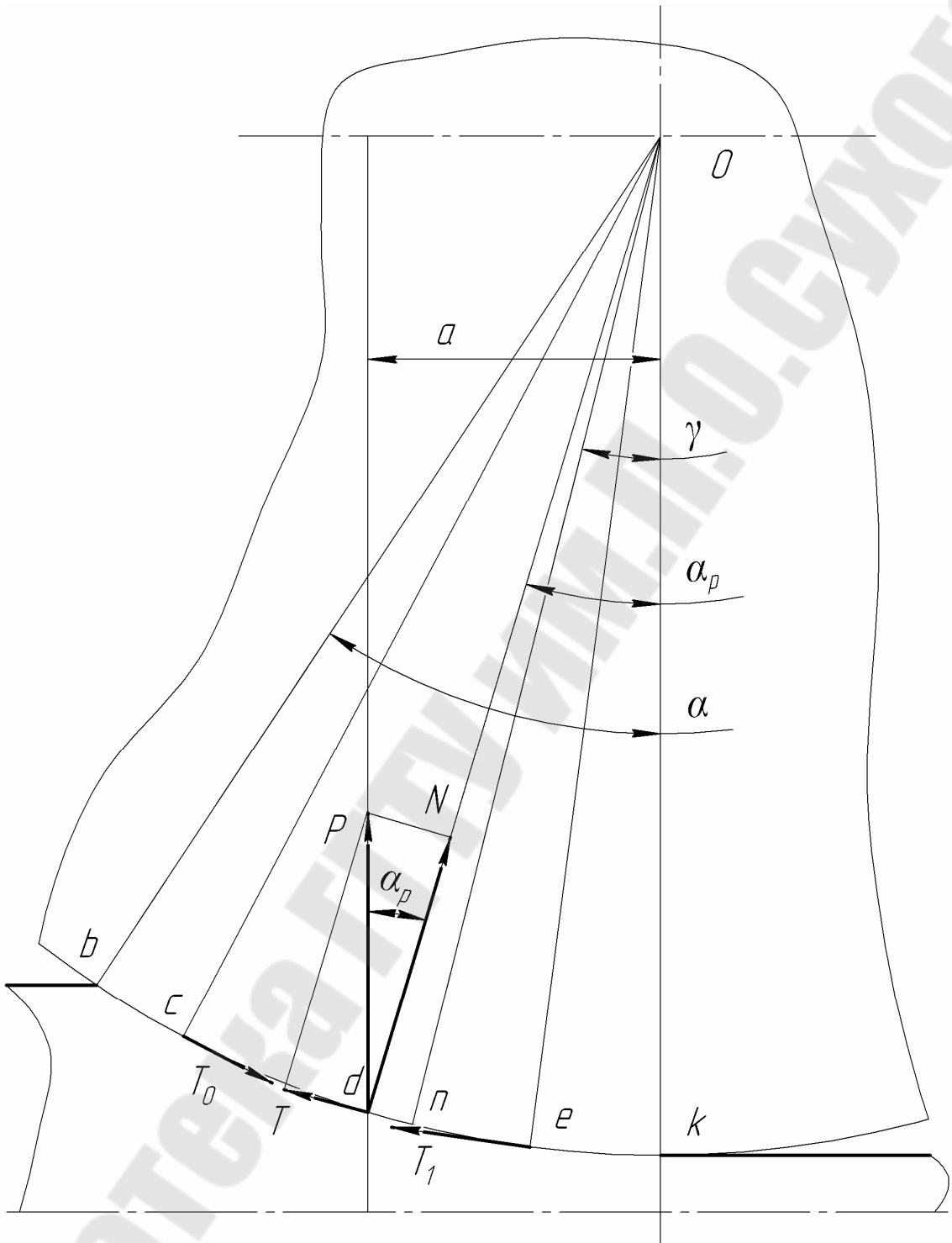


Рис. 52. Схема сил на дуге контакта

Величину ψ для предварительных расчетов можно принимать :
 Для горячей прокатки $\psi = 0,45 \dots 0,5$;
 Для холодной прокатки без смазки $\psi = 0,2 \dots 0,3$;
 Для холодной прокатки со смазкой $\psi = 0,3 \dots 0,4$.
 Для точных расчетов используются специальные формулы, одной из которых является:

$$\psi = [1 - \varepsilon]. \quad (41)$$

$$z = f \cdot \frac{l}{h_{cp}}$$

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h_1}{h_0}$$

На схеме прокатки изображены вектора усилий, действующих на валки со стороны полосы. На полосу со стороны валков действуют противоположные по направлению и равные по длине вектора силы (рис. 53).

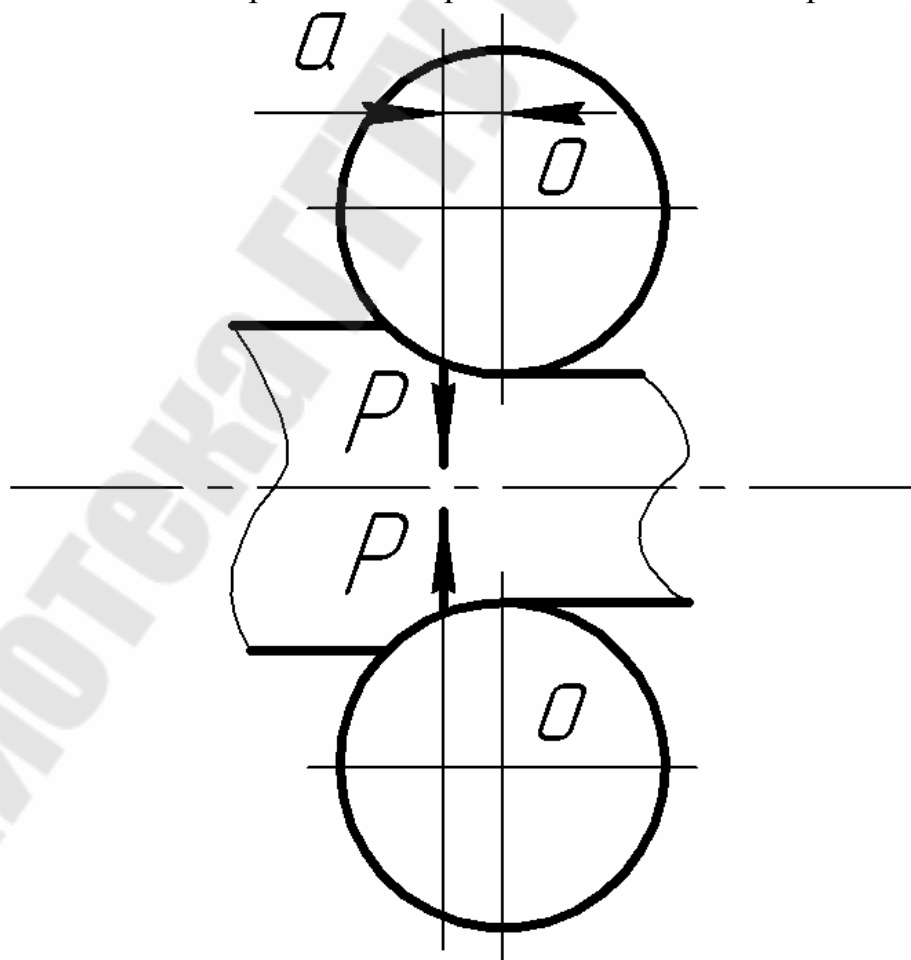


Рис. 53. Схема результирующих сил прокатки

При установившемся движении полосы сумма всех сил, действующих со стороны валков равна 0, поэтому на полосу со стороны первого валка действует сила, равная по величине и противоположная по знаку силе, действующей на полосу со стороны второго валка.

Формула (37) с учетом (40) и с учетом наличия двух валков принимает вид:

$$M = 2P \cdot \psi l. \quad (42)$$

Формула (42) позволяет рассчитывать требуемый момент прокатки для простой схемы прокатки. Расчет величины M позволяет определять силовую возможность привода прокатных валков.

37. МОМЕНТ ПРОКАТКИ ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКИ С НАТЯЖЕНИЕМ И ПОДПОРОМ ПОЛОСЫ

В связи с тем, что простая схема прокатки используется редко, а чаще только в теории, то рассмотрим схему для определения момента прокатки при наличии заднего натяжения и (или) переднего подпора полосы (рис. 54).

$$M = P \cdot a.$$

Но величина a неизвестна, следовательно, момент прокатки рассчитывается по формуле:

$$M = P_y b + P_x c,$$

где a, b, c - соответствующие плечи усилий.

Плечо c с относительно небольшой погрешностью можно принять $c = R$, где R - радиус валков, тогда:

$$M = P_y (l + (Q_0 + Q_1) / 2 R). \quad (43)$$

Величина P_y рассчитывается по формулам для простой прокатки. Формула (43) используется, если при прокатке имеется передний подпор и заднее натяжение полосы.

Из схемы видно, что проекция этих сил на ось x положительна.

Если же силы Q_0 и Q_1 будут действовать в противоположных направлениях (рис. 55), то знаки величин Q_0 и Q_1 в формуле (43) поменяются, величина плеча a уменьшится, что снизит и момент прокатки.

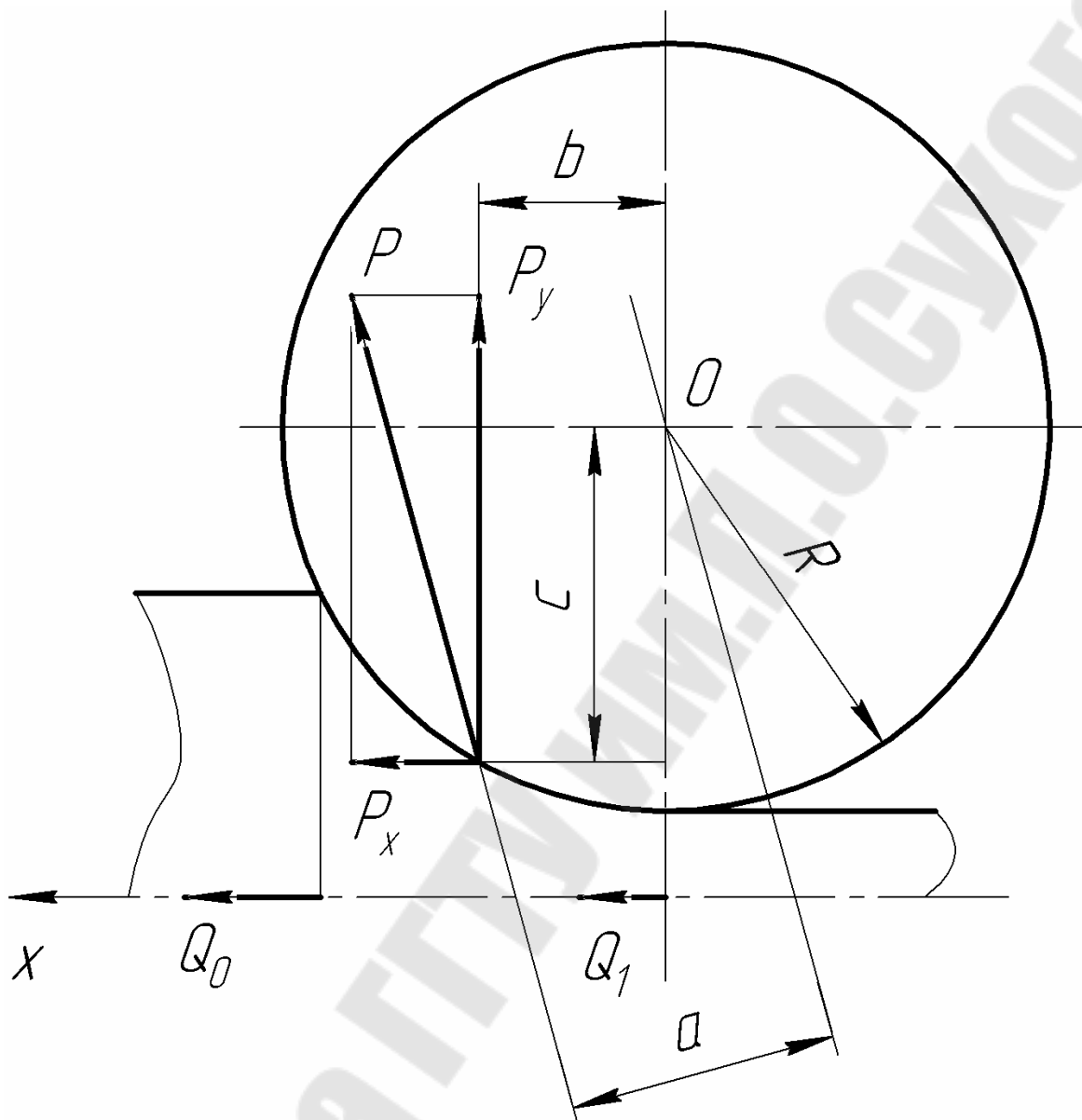


Рис. 54. Схема сил прокатки с натяжениями и подпорами полосы, препятствующими движению полосы

Проекция силы P_y соответствует усилию простой прокатки. Проекция P_x образуется от воздействия на валки Q_0 и Q_1 . Поэтому:

$$P_x = \frac{Q_0 + Q_1}{2}. \quad (44)$$

Деление на 2 обусловлено распределением воздействия на два валка. Момент прокатки может быть вычислен:

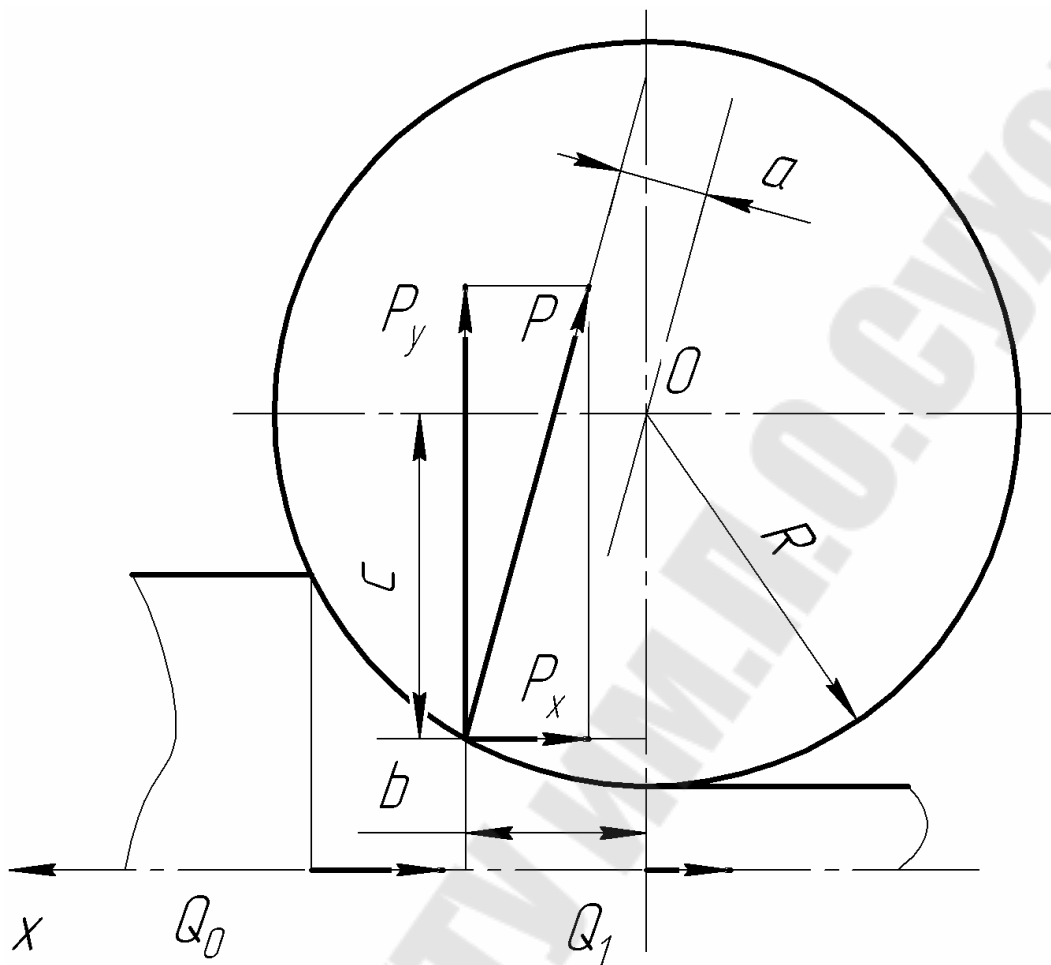


Рис. 55. Схема сил прокатки с натяжениями и подпорами полосы, способствующими движению полосы

В этой связи формулу (43) можно использовать в более универсальном виде. Для этого необходимо учитывать знак Q_0 и Q_1 . Если направление Q_0 и Q_1 соответствуют оси x (против прокатки), то в формуле учитывается «+», если против оси, то «-». Формула (43) применяется для непрерывной прокатки, для которой характерно натяжение и подпоры полосы между клетями:

$$M = P\Psi l + \frac{(\pm Q_0 \pm Q_1)}{2} R.$$

38. МОМЕНТ ПРОКАТКИ ДЛЯ АССИМЕТРИЧНЫХ СХЕМ ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКИ

Схема прокатки называется асимметричная (несимметричная), если величина напряжения и деформаций на контакте двух валков неодинаковы.

Причины асимметрии:

1. Разность диаметров прокатных валков;
2. Разность коэффициента контактного;
3. Разность свойств приконтактных поверхностей полосы;

На практике асимметрию прокатки обычно создают разностью диаметров валков. Если диаметр верхнего валка больше чем диаметр нижнего, то прокатку называют прокаткой с верхним давлением. При верхнем давлении скорость приконтактных слоев верхнего валка больше чем нижнего. При прокате с нижним давлением – наоборот. Поэтому прокатка с верхним давлением обеспечивает изгиб полосы вниз, при выходе из валков, а прокатка с нижним давлением – изгиб полосы вверх.

Асимметричная продольная прокатка возникает если появляется разница деформации и напряжения на контактных поверхностях разных валков. В большинстве случаев асимметричной причиной служит верхнее или нижнее давление. Верхнее давление прокатки – превышение линейной скорости вращения поверхности верхнего валка над нижней скоростью валка. Нижнее давление наоборот.

Рассмотрим схему прокатки с верхним давлением (рис. 56).

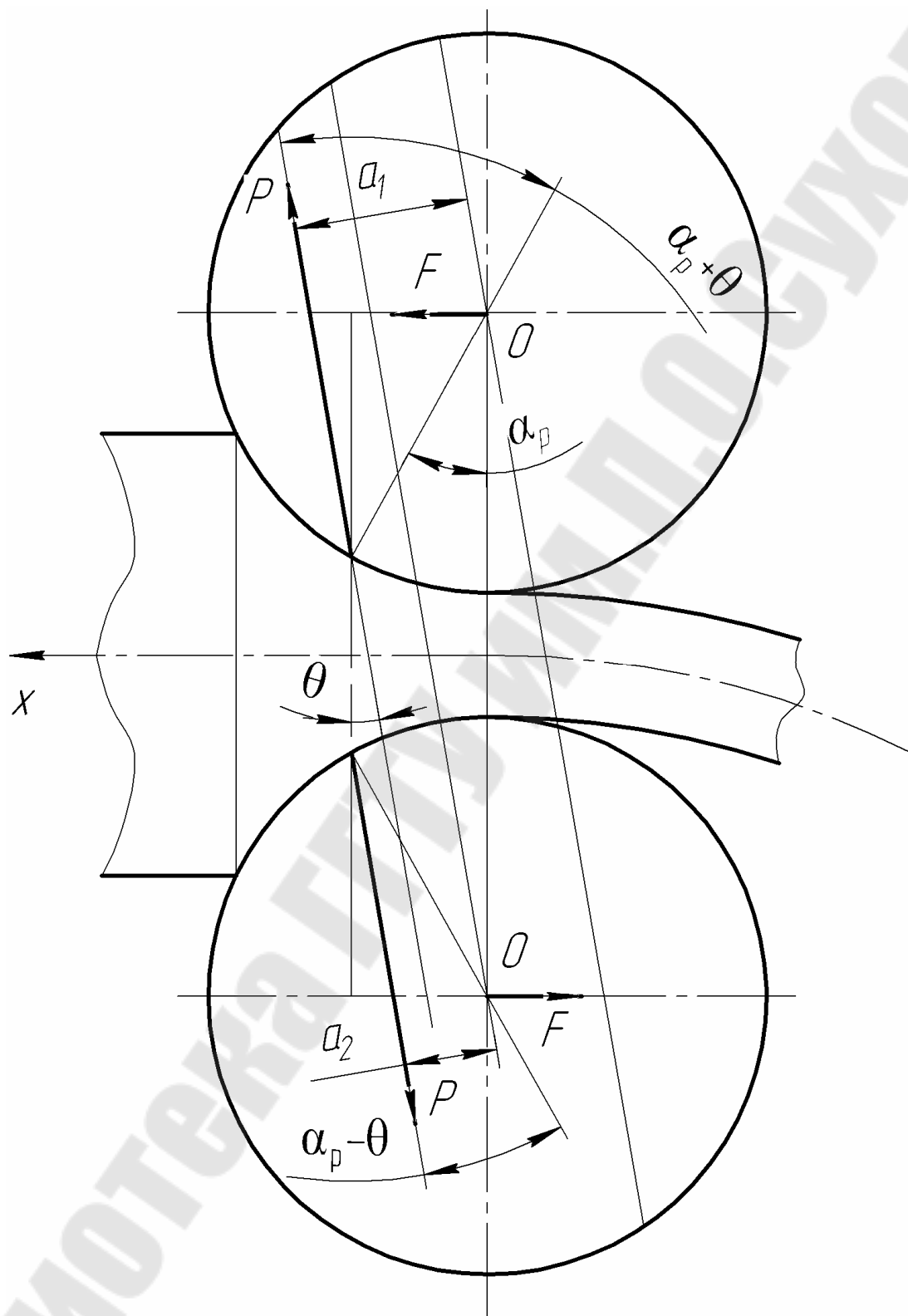


Рис. 56. Схема сил при прокатке с верхним давлением

Обычно верхнее давление или нижнее создаются разницей диаметров валков при постоянстве их угловых скоростей.

$$v_1 = v_2, \text{ так как } R_1 > R_2 \text{ и } \omega_1 = \omega_2.$$

В связи с асимметрией прокатки появляется наклон в расположении длины, вдоль которой направлено усилие прокатки P . Моменты на валках прокатки: $M_1 = p\alpha_1$; $M_2 = p\alpha_2$. Так как $\alpha_1 > \alpha_2$, то $M_1 > M_2$ и $p_1 = p_2 = p$.

Величины α_1 и α_2 рассчитываются по формулам:

$$\alpha_1 = R_1 \sin(\alpha_p + \theta),$$

$$\alpha_2 = R_2 \sin(\alpha_p + \theta),$$

где α_p – угол, определяющий местоположение приложения силы P .

θ – угол отклонения вектора P от вертикали.

Из формулы видно, чем больше θ , тем больше разница между M_1 и M_2 . Величина θ в свою очередь зависит от разницы между M_1 и M_2 и определяется по формуле:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{R_2 \sin \alpha_p - R_1 \sin \alpha_p}{h_1 + (1 - \cos \alpha_p) R_1 + (1 - \cos \alpha_p) R_2},$$

где l – расстояние векторов сил прокатки:

$$\sin \theta = \frac{l}{h_{2p}}.$$

Из формулы следует прямо пропорциональная зависимость между θ и l . В связи с возникновением l появляются дополнительные силы F , действующие на опоры валков в противоположные стороны и параллельные направлению прокатки.

В результате асимметрии в схеме появляется дополнительный изгибающий момент, действующий на полосу. Величина этого момента :

$$M_{\text{изг}} = p \frac{l}{2}.$$

Таким образом, величина изгибающего момента зависит от разницы диаметров валков. Поэтому разницу радиусов валков делают незначительной, чтобы изгиб полосы на выходе был незначителен.

Схема прокатки с нижним давлением имеет вид, представленный на рис. 57.

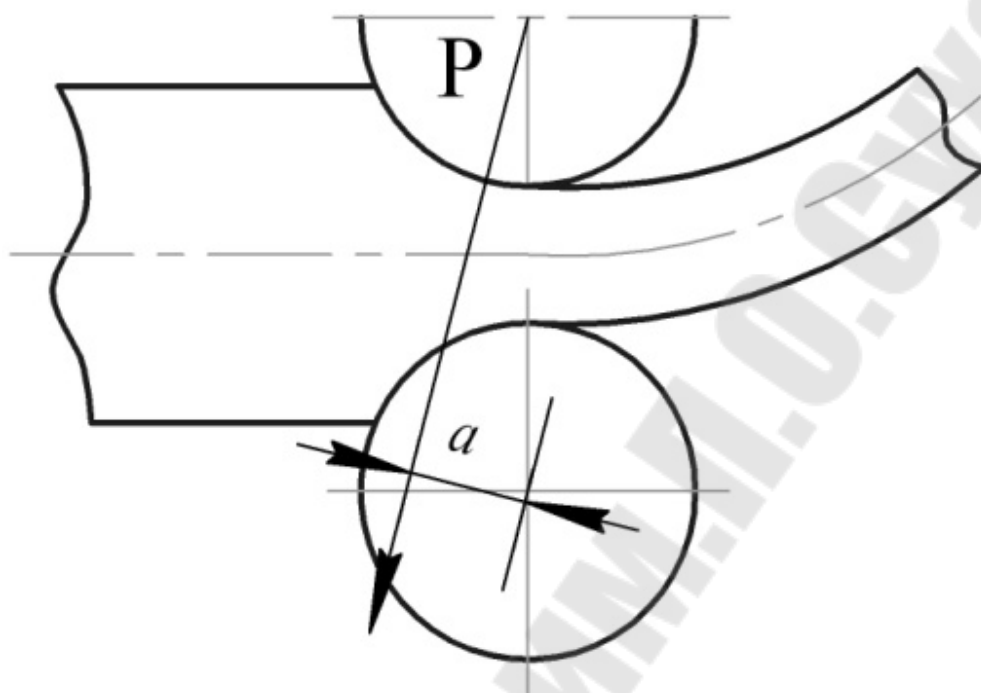


Рис. 57. Схема прокатки с нижним давлением

Из схемы (рис. 57) видно, что плечо силы прокатки нижнего вала больше, чем верхнего. Появляется дополнительный момент, изгибающий полосу вверх.

К ассиметричным схемам прокатки относят прокатку с одним приводным валком. В целях экономии энергии при прокатке точных профилей привод одного вала отключают.

Верхнее давление используется при прокате полос небольшой массы, а нижний при прокатке большой полос. Это способствует направленному движению полосы на выходе из валков и уменьшению износа устройств в направляющих полос. В некоторых случаях экономии энергии используют схему прокатки с одним холостым и одним приводным валком.

39. РАБОТА ПРОДОЛЬНОЙ ПРОКАТКИ

Работа или энергия прокатки определяет энергетические затраты на деформацию металла в прокатных валках. Работу продольной прокатки можно определить по формуле:

$$A = M \cdot \theta, \quad (45)$$

где M – момент прокатки;

θ – угол поворота валков за период прохода всей длины полосы через валки.

Величина θ может быть рассчитана по формуле:

$$\theta = 2\pi \frac{t_l}{t_b}, \quad (46)$$

где t_l - время прохода всей длины заготовки через валки;

t_b - время одного оборота валков.

Величина t_l рассчитывается по формуле:

$$t_l = \frac{l_1}{v_1} = \frac{l_1}{v_b(1 + S_1)}, \quad (47)$$

где l_1 - длина полосы на выходе из валков после полной деформации всей длины;

v_1 - скорость полосы на выходе из валков;

v_b - скорость вращения валков;

S_1 - опережение.

Величина t_b рассчитывается по формуле:

$$t_b = 2\pi \frac{R}{v_b}, \quad (48)$$

где R – радиус валков.

Подставляя (47) и (48) в (46) получаем:

$$\theta = 2\pi \frac{l_1}{v_b(1 + S_1)} \cdot \frac{v_b}{R};$$

$$\theta = \frac{l_1}{(1 + S_1)R}. \quad (49)$$

Определяем момент прокатки через давление прокатки:

$$M = 2Pl = 2pF_1k \sqrt{\Delta h}R = 2pb\sqrt{\Delta h}R \cdot \sigma \sqrt{\Delta h}R = 2pb(\Delta h)R, \quad (50)$$

где P – усилие прокатки;

l – коэффициент плеча усилия прокатки;

F_1 – длина очага деформации;

p – давление прокатки;

F_k – площадь поверхности контакта полосы с валком;

b – ширина полосы (средняя).

Подставляем (49) и (50) в (45):

$$A = 2pb(\Delta h R l_{11}/(1 + S_1) R) .$$

Для упрощения записи полученное уравнение умножим и разделим на h_1 , тогда:

$$A = 2p(\Delta h l_{11}/((1 + S_1) h_1)) bl_{11} h_1 \quad (51)$$

$$bl_{11}h_1 = V ,$$

где V – объем всей полосы.

В формуле (51) можно ввести упрощение: $\frac{2\psi}{1 + S_1} \approx 1$ и $\frac{\Delta h}{h_1} = \ln \frac{h_0}{h_1}$.

Такая замена относительной деформации на истинную повышает точность расчетов.

С учетом принятых допущений формула (51) принимает окончательный вид:

$$\frac{A = pV \ln h_0}{h_1} . \quad (52)$$

Формула (52) позволяет рассчитать работу или энергию продольной прокатки.

Основной недостаток этой формулы состоит в некоторой потере точности расчетов в связи с принятыми допущениями и упрощениями.

При относительно небольших деформациях формула позволяет вычислять энергию с достаточной точностью. При относительно больших деформациях более существенная расчетная ошибка. Поэтому для повышения точности расчетов используется эмпирическая формула для работы продольной прокатки:

$$A^0 = A^* m \left(\frac{l_1}{l_0} - 1 \right) , \quad (53)$$

где A^* – экспериментальный удельный расход энергии на прокатку (Дж/кг);

m – масса обрабатываемой заготовки;

l_0, l_1 – длина заготовки после и до прокатки.

Расчетные данные по формулам (52) и (53) почти совпадают при небольших деформациях и отличаются при больших деформациях, при которых формула (53) более точна, но она имеет существенный недостаток:

требуется предварительный эксперимент для определения A . В литературе формулу (52) называют формулой Финка, а формулу (53) – формулой Тимме.

40. МОЩНОСТЬ ПРОКАТКИ И ДВИГАТЕЛЯ ПРОКАТНОГО СТАНА

В соответствии с законами механики мощность деформации полосы в прокатных валках определяется:

$$N_{np} = \frac{A}{t_1}, \quad (54)$$

где A – работа или энергия прокатки;
 t_1 – время деформации всей длины полосы в прокатных валках.

Величина A может рассчитываться по формуле:

$$A = M\theta. \quad (55)$$

С учетом (55) получаем:

$$N_{np} = \frac{M\theta}{t_1}. \quad (56)$$

В выражении (56):

$$\frac{\theta}{t_1} = \omega,$$

где ω – угловая скорость вращения валков.

Тогда:

$$N_{np} = M\omega. \quad (57)$$

Формула (57) распространена в расчетах мощности прокатки и всегда следует после определения мощности и скорости прокатки, но мощность прокатки можно рассчитать без учета момента прокатки. Для этого необходимо использовать формулу для работы прокатки:

$$\frac{A}{h_1} = pV \ln h_0, \quad (58)$$

где P – давление прокатки;
 V – объем прокатной полосы.

Если (58) подставить в (54), то получим:

$$N_{np} = \frac{p b l_1 h_1 \ln h_0}{h_1} \quad (59)$$

В формуле (59) $\frac{l_1}{h_1} = v_1; b h_1 = F_1$.

Тогда формула (59):

$$N_{np} = \frac{p F_1 v_1 \ln h_0}{h_1} \quad (60)$$

Формула (60) позволяет рассчитать мощность прокатки без определения момента прокатки, но используется редко.

Мощность двигателя прокатного стана должна превышать N_{np} , так как существуют дополнительные потери мощности двигателя прокатного стана.

Требуемая мощность двигателя прокатного стана равна:

$$N_{дв} = N_{пр} + N_{тр} + N_{хх} \pm N_{дин}, \quad (61)$$

где - мощность, расходуемая на трение в передаточных механизмах привода прокатных валков, в подшипниках, втулках, зубчатых зацеплениях и т.д.;

- мощность, расходуемая на вращение прокатных валков перед захватом и после выброса полосы;

- расход мощности двигателя на инерционные силы при разгоне «+» и при торможении «-». Для непрерывной прокатки можно не учитывать, а для реверсивной прокатки учитывать обязательно.

Величина N_{np} рассчитывается по формуле (57) с учетом привода двух валков.

В связи с тем, что мощность рассчитывается через произведение момента на угловую скорость, то для определения момент трения можно определить:

$$M_{тр} = \frac{M_{тр}^1}{i} + \frac{M_{тр}^2}{i}, \quad (62)$$

где $M_{\text{тр}}^1$ – момент сил трения в подшипниках валков;

$M_{\text{тр}}^2$ – момент сил трения в передаточных механизмах.

$$M_{\text{тр}}^2 = (1/c-1) (M_{\text{нр}} + M_{\text{нр}}^1)/i ,$$

где i – передаточное число от двигателя к валкам;

$d_{\text{ш}}$ – диаметр шейки валков;

- КПД привода.

Для момент равен:

$$M_{\text{хх}} = \sum_{i=1}^n \frac{G_i f_i d_i}{2 j_i}.$$

где G_i – масса определенной i -й детали механизма привода, в которой установлен подшипник;

f_i – коэффициент трения в i -м подшипнике;

d_i – диаметр внутреннего i -ого подшипника;

j_i – передаточное число между двигателем и деталью.

Для соответствует момент:

$$M_{\text{дин}} = \frac{G_b D_2}{4} a, \frac{G_b D_2}{4} = J$$

G_b – вес прокатных валков;

D – катающий диаметр валков;

a – угловое ускорение (торможение) в $1/c^2$;

J – момент инерции, приведенный к валу двигателя.

41. ТЕМПЕРАТУРА ПРОКАТКИ

Прокатка полосы сопровождается пластической деформацией металла. Любая пластическая деформация в свою очередь происходит при внутреннем и внешнем трении. Внутреннее трение вызвано взаимодействием плоскостей скольжения структуры металла, межзеренным сдвигом и другими перемещениями в структуре металла. В результате внутренних контактных взаимодействий появляются силы внутреннего трения, которые сопровождаются тепловыделением. Дополнительное трение – скольжение действует на контакте между полосой и прокатным валком, что также

приводит к тепловыделению. Таким образом, прокатка полосы вызывает рост температур этой полосы.

Превращение энергии внутреннего трения в теплоту называется диссипацией энергии (диссипация - превращение). Общая тепловая энергия при прокатке равна:

$$Q = Q_{\text{деф}} + Q_{\text{тр}},$$

где $Q_{\text{деф}}$ – тепловая энергия, полученная от деформации полосы вследствие внутреннего трения;

$Q_{\text{тр}}$ – тепловая энергия полосы, полученная от контактного трения.

Величина Q может быть рассчитана исходя из энергии (работы) прокатки:

$$Q = \eta A, \quad (63)$$

где η – коэффициент выхода тепловой энергии.

При холодной прокатке $\eta = 0,8 \dots 0,9$;

при горячей прокатке $\eta = 0,95 \dots 1$.

Разница для холодной и горячей прокатки объясняется упрочнением полосы. При холодной прокатке упрочнение максимально, так как отсутствует рекристаллизация структуры. Часть работы A расходуется на повышение внутренней энергии холоднокатаной полосы после прокатки. Иначе часть энергии привода прокатного стана остается в полосе в форме ее механического упрочнения. При горячей прокатке упрочнение минимально или отсутствует, поэтому вся энергия привода прокатного стана расходуется на нагрев полосы. После горячей прокатки, вследствие рекристаллизации, полоса не упрочнена либо слабо упрочнена.

С точки зрения теплотехники величина Q может быть рассчитана по формуле:

$$Q = cm(t_1 - t_0), \quad (64)$$

где c – удельная теплоемкость металла полосы;

m – масса металла полосы;

t_1 – температура полосы после прокатки;

t_0 – температура полосы до прокатки.

Из (63) и (64) следует, что

$$t_1 - t_0 = \zeta A / cm = \Delta t \quad (65)$$

Δt – приращение температуры полосы при прокатке.

Если учесть, что на входе температура t_0 , а на выходе t_1 , то в общем случае можно допустить, что средняя температура полосы после прокатки равна:

$$t_{cp} = t_0 + \frac{\Delta t}{2}. \quad (66)$$

Однако на практике тепловой баланс значительно сложнее. Он должен быть дополнен составляющими падения температуры:

1. Падение температуры полосы вследствие теплопереноса от полосы к валкам.
2. Падение температуры вследствие теплоотдачи в окружающую среду между проходами прокатки.
3. Падение температуры от гидросбива окалины между клетями.
4. Падение температуры на участках принудительного ускоренного охлаждения полосы между клетями.

Следует учесть, что горячая прокатка всегда сопровождается обильным охлаждением прокатных валков, арматуры, что также снижает температуру полосы. Следует учесть, что интенсивная пластическая деформация без принудительного охлаждения полосы способна перегреть полосу, что понизит качество структуры вследствие пережога. Поэтому при горячей прокатке всегда используют принудительное охлаждение.

При холодной прокатке тепловыделение меньше, но тоже значительно, поэтому охлаждение также применяется, но менее интенсивно.

Вследствие большой сложности в точности теплового баланса используют множество методик расчета температуры полосы на выходе из валков при многовалковой (многократной) прокатке. Наиболее распространенной зависимостью для расчета этой величины при горячей прокатке является следующее выражение:

$$t_1 = t_0 + \frac{1000}{\sqrt{\frac{1000}{\left(\frac{t_0}{100}\right)^2 + 0,055 \frac{\tau}{h}}}} \quad (67)$$

где τ – время прохода полосы между предыдущей клетью (прохода) и рассматриваемой клетью (прохода);

h – высота полосы в рассматриваемом проходе прокатки.

t_0 – температура полосы после прохода предыдущей клетки.

Формула (67) используется для листовых, сортовых прокатных станов, для реверсивных прокатных станов.

Для более точных расчетов с учетом гидросбива, принудительного охлаждения может быть использована дополнительная зависимость из справочной литературы.

42. ВИДЫ ПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Прокатное производство классифицируется в соответствии с видами прокатной продукции. Принято следующее разделение видов прокатного производства:

1. Производство блюмов и слябов;
2. Прокатное производство заготовок;
3. Прокатное производство рельсов, балок и швеллеров;
4. Сортопрокатное производство мелко, средне и крупно-сортовых профилей;
5. Производство горячекатаных листов и полос;
6. Производство холоднокатаных листов, полос, лент и фольги;
7. Прокатное производство специальных профилей;
8. Производство бесшовных горячекатаных труб;
9. Производство бесшовных холоднокатаных труб;
10. Производство сварных (шовных) труб.

В соответствии с видами прокатных производств классифицируются и прокатные станы.

Основная задача прокатного производства: получение требуемой геометрии профиля проката, требуемых свойств металла проката, требуемого объема производства в тоннах при максимальной производительности техпроцессов и при минимальных производственных расходах с сохранением требований к охране труда и окружающей среды.

Для решения основной задачи прокатного производства требуется разработка эффективных технологических процессов прокатки, соответствующих всем требованиям прокатного производства. Под технологическим процессом прокатного производства понимается последовательность производственных этапов или операций, которые включают в себя движение обрабатываемого металла от склада заготовок до склада готовой продукции. Технологический процесс прокатки выполняется в прокатном цехе.

Основными технологическими операциями горячей прокатки являются следующие:

1. Подготовка исходных слитков или заготовок к прокатке: сортировка, резка на мерные длины, контроль свойств и химического состава металла и др.
2. Нагрев металла перед прокаткой: обеспечивает повышение пластических свойств металла для снижения сопротивления деформации металла в прокатных валках.

3. Непосредственная прокатка: обеспечивает горячую пластическую деформацию металла, формирующую сечение заготовки до требуемого прокатного профиля.

4. Охлаждение, термическая обработка и отделка готового проката: обеспечивает окончательное формирование заданных механических свойств металла проката, необходимое качество поверхности проката, требуемой геометрии всей длины проката и др.

Основные технологические операции при холодной прокатке профиля:

1. Удаление окалины с поверхности заготовки – обеспечивает нормальную чистоту поверхности проката при последующей деформации.

2. Холодная прокатка – обеспечивает пластическую деформацию металла для формоизменения сечения заготовки до требуемого готового профиля с присутствием эффекта упрочнения металла за счет механизмов упрочнения металла при холодной деформации.

3. Термообработка и отделка – обеспечивает необходимую степень разупрочнения металла после холодной деформации, обеспечивает заданные свойства металла, необходимое качество поверхности проката, требуемую прямолинейность длины проката и др.

Указанная последовательность операций может видоизменяться. Возможно появление дополнительных или исключение некоторых указанных операций. Эти изменения определяются спецификой прокатных производств, но основные указанные операции остаются.

Рассмотрим соответствие различного вида прокатных заготовок различным видам прокатной продукции.

Исходная заготовка под прокатку производится в плавильных цехах или прокатных цехах.

Заготовка под прокатку, полученная в плавильных цехах, может иметь вид:

- крупного слитка;
- мелкого слитка;
- непрерывнолитой заготовки плоского, прямоугольного, квадратного и круглого сечения;
- жидкого металла.

Заготовка в виде крупного слитка применяется для прокатки блюмов и слябов.

Заготовка в виде мелких слитков используются в прокатке заготовок, сортовых, листовых и трубных профилей.

Блюмы служат заготовкой для прокатки рельсов, балок, швеллеров, крупных сортовых профилей.

Слябы используют в горячей прокатке толстолистовых и широкополосных профилей.

Непрерывнолитые заготовки разных сечений применяют для прокатки сортовых, листовых и трубных профилей.

Заготовки под прокатку, полученные в прокатных цехах горячей прокатки, то есть катанные заготовки, используют в холодной прокатке листовых, трубных и специальных профилей, в горячей прокатке специальных профилей.

Горячекатаный листовой прокат используется как заготовка для холодной листовой прокатки.

Горячекатаная бесшовная труба используется как заготовка для холодной прокатки бесшовной трубы.

Горячекатаный круглый прокат используется как заготовка в холодной и горячей специальной прокатке.

Заготовки в виде жидкого металла используют в литейно-прокатных агрегатах или модулях.

43. НАЗНАЧЕНИЕ, СОРТАМЕНТ БЛЮМОВ И СЛЯБОВ. ХАРАКТЕРИСТИКА ИСХОДНЫХ СЛИТКОВ

Блюм – это полупродукт, полученный путем обжатия слитков на блюминге, имеет сечение квадратного профиля или профиля, близкого к квадратному с размерами стороны профиля от 140 до 450 мм.

Диаметр валков блюминга 850-1500 мм.

Основное назначение блюма – дальнейшая раскатка из него сортовых, рельсовых, балочных, швеллерных и некоторых других профилей.

Сечение блюма имеет радиусы закругления углов от 20 до 60 мм. Отклонения размеров сечения блюма $\pm 5...10$ мм. Обычно длина блюма составляет от 1 до 6 м, масса блюма 7-10 т.

Сляб – это полупродукт, полученный обжатием слитков на слябинге, всегда имеет прямоугольное сечение, толщина 100-250 мм, а ширина 300-2200 мм,

Диаметр валков слябинга около 1 м и длина бочки валков 2-2,5 м. Допуски отклонения размеров сляба: для толщины 4-5 мм, для ширины ± 10 мм. Длина сляба 1,3-5 м, масса до 25 т.

Сляб используется для дальнейшей раскатки из него листов и полос.

Слитки, предназначены для прокатки блюмов, имеют прямоугольное поперечное сечение с соотношением сторон 1,1...1,15. Слитки для производства слябов имеют соотношение сторон 2,5...3. После полной кристаллизации у слитка удаляют донную и головную части. Суммарная величина такой обрезки составляет до 9 %. Для спокойной стали обрезь может достигать 18 % в связи со значительными усадочными дефектами.

На крупных металлургических производствах полного цикла (подготовка исходного сырья из руды, плавильное, прокатное, метизное производства) исходной заготовкой для прокатки блюмов и слябов чаще

является слиток. Но все современные металлургические производства, а также вновь строящиеся уже не имеют в своем составе отдельного производства слитков разливкой в изложницы. Наиболее перспективным и развивающимся направлением является производство блюмов и слябов на МНЛЗ непосредственно из жидкого расплава. Особенно актуально это направление для металлургических предприятий неполного цикла, когда отсутствует один или несколько видов металлургических производств. Например, на ОАО «БМЗ - УХ «БМК» отсутствует первый вид металлургического производства - подготовка исходного сырья из руды.

44. ОБЩАЯ СХЕМА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА БЛЮМОВ И СЛЯБОВ

Рассмотрим основные этапы техпроцесса производства блюмов и слябов.

Исходные слитки или литые заготовки перед прокаткой нагревают до $t = 1200-1300$ °С. В связи со значительной массой слитка или заготовки используется двухстадийный нагрев. При двухстадийном нагреве предварительный нагрев составляет 400-700 °С, а загрузка горячих слитков в печь окончательного нагрева называется горячим посадом. Для нагрева слитков обычно применяют рекуперативные нагревательные колодцы. Загрузка слитков в колодцы производится кранами с помощью клещевых захватов. Слитки располагаются вертикально. Нагрев газовый. Для нагрева литых заготовок, полученных на МНЛЗ, применяют двухстадийный нагрев в газовых печах непрерывного действия. Температурный режим нагрева регулируется по определенным закономерностям, зависящим от размеров слитка, марки металла и др.

Нагретые слитки извлекаются из колодцев, и доставляются кранами к приёмным рольгангам, которые обеспечивают подачу слитков к прокатным валкам. Иногда вместо кранов для подачи слитков к рольгангам используются слитковозы. Они применяются при значительных удалениях нагревательных колодцев и прокатных клетей.

Нагретые заготовки непрерывно подаются на рольганг из печи с помощью специального механизма.

После подачи слитка или литой заготовки к прокатным валкам блюминга или слябинга выполняется раскатка слитка или заготовки до требуемого размера сечения блюма или сляба.

Рассмотрим схему реверсивной прокатки блюмов (рис. 58).

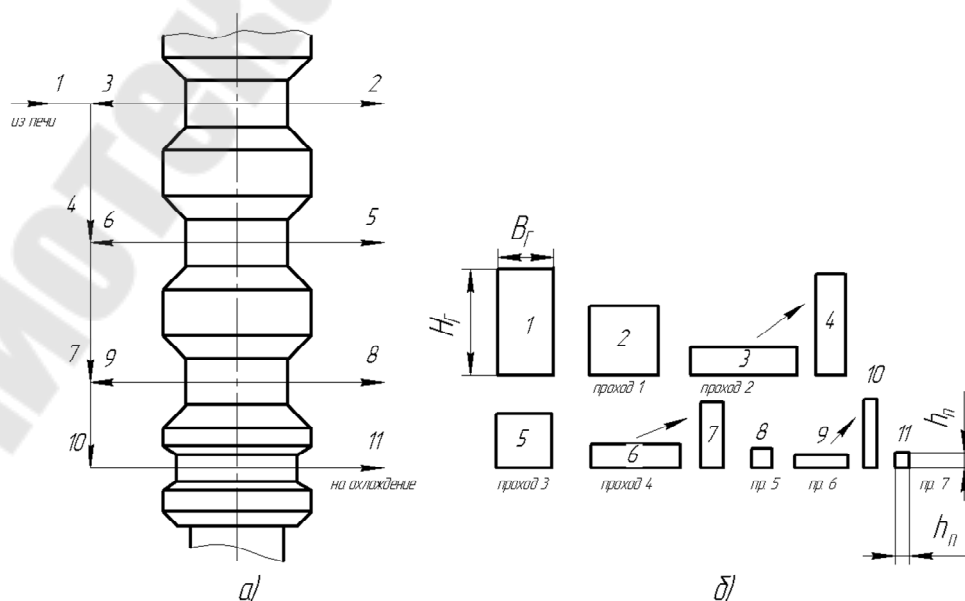
Нагретые в нагревательной печи заготовки поступают с помощью рольганга к прокатной клетке и останавливаются в положении 1 (рис. 58, а). В положении 1 заготовка кантуется на 90° вдоль своей оси. Далее заготовка поступает непосредственно к прокатным валкам, деформируется в первом калибре валков и поступает в положение 2, где останавливается. Сечение заготовки из формы 1 превращается в форму 2, но с меньшей площадью

(рис.58, б). Зазор между валками уменьшается на значение второго прохода. Далее включается реверс вращения валков и заготовку подают к прокатным валкам в обратном направлении. После деформации заготовка останавливается в положении 3 и приобретает форму 3 (рис. 58, б). Далее заготовку с сечением 3 перемещают в положение 4. Перемещение заготовки из положение 3 в 4 осуществляется специальным механизмом при сохранении перпендикулярности оси заготовки к осям валков. В положении 4 заготовка останавливается и кантуется поворотом вокруг собственной оси, переходя в сечение 4. Вращение валков опять изменяется, и заготовка прокатывается в положение 5. Из положения 5 в положение 6 и т.д. На последнем проходе заготовка после прокатки не останавливается и выбрасывается в сторону холодильника. Всего проходов используют обычно от 5 до 11. На приведенной схеме 7 проходов и 11 положений заготовки.

Возможны другие варианты схем прокатки. Например, сечение 6 можно сформировать из сечения 1 за четыре прохода в первом калибре с кантовками по обе стороны от валков. Можно располагать калибры не последовательно, как на схеме, а в другом порядке: первый самый нагруженный калибр расположен по центру валка, а менее нагруженные калибры расположены ближе к краям валка. Такой подход увеличивает стойкость опор валка, но снижает производительность прокатки.

После прокатки выполняется обрезка концов и резка проката на мерные длины. Обрезка выполняется с помощью ножниц или дисковых пил. Также выполняется огневая зачистка полученных блюмов или слябов для повышения качества поверхности. Огневая зачистка поддерживает высокую температуру поверхности блюмов или слябов и обеспечивает качественную дальнейшую прокатку с целью повышения качества поверхности готового проката.

Полученные блюмы или слябы далее разрезают и охлаждают.



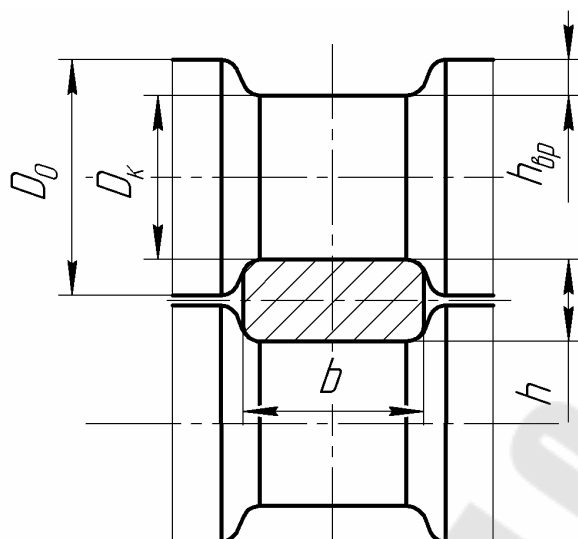


Рис. 58. Схема прокатки на блюминге:

- D_0 – номинальный диаметр прокатных валков, мм;
 $h_{гр}$ – средняя высота глубины прокатного калибра, мм;
 h – высота полосы, мм; b – ширина полосы, мм;
 $D_k = D_0 - 2h_{гр}$ – катающий диаметр

Перед холодильником заготовкурезают на мерные длины, с поверхности сбивают окалину, после этого заготовку охлаждают в специальных условиях. Способ охлаждения естественный или закономерный с целью специальной термообработки. Заготовки обычных сталей охлаждаются на открытой атмосфере. Заготовки легированных сталей можно охлаждать в специальных термических колодцах с соблюдением специальных закономерностей охлаждения. На всех этапах производства блюмов и слябов, начиная от склада заготовки, до склада готовой продукции, осуществляется контроль качества проката.

45. СОРТАМЕНТ СОРТОВЫХ ПРОФИЛЕЙ

Сортовой профиль относится к конечному или готовому виду прокатной продукции. Это наиболее распространенный вид прокатной продукции. Он широко используется в строительстве, машиностроении, химической промышленности и так далее. В зависимости от геометрии сортовые профили разделены на:

- простые;
- фасонные;
- периодические.

К простым сортовым профилям общего назначения относятся:

1. Круглый с диаметром 5÷200 мм.
2. Квадратный с размер стороны 5÷200 мм.

3. Шестигранный, с диаметром вписанного круга 8÷100 мм.
4. Полосовой шириной 11÷200 мм, толщиной 4÷60 мм.
5. Сталь полосовая, инструментальная шириной 0÷30 мм, толщиной 3÷40 мм.
6. Штрипс сортовой, шириной 63÷415 мм, толщиной 2,5÷8 мм. Служит заготовкой для получения сварной трубы.
7. Катанка (полученная прокаткой проволоочная заготовка) диаметром 4,5÷12 мм. Отличается от обычного круглого профиля подготовкой к последующему волочению.

Основные виды фасонных профилей общего назначения:

1. Все угловые профили из стали и цветного металла.
2. Рельсы, двутавровые балки, швеллеры (рельсобалочная продукция).

Фасонные профили отраслевого и специального назначения могут иметь специальную форму сечения, например, зетовая сталь с сечением \int .

К периодическим сортовым профилям относят прокат с непостоянной формой поперечного сечения по длине проката. Самый распространенный сортовой периодический профиль – железная арматура для железобетонных конструкций. К данному виду проката также относятся полосы с переменным сечением, используемые в качестве рессор в транспорте.

В зависимости от размера сортовые профили разделяются на:

- мелкосортные;
- среднесортные;
- крупносортные.

Если приведенные размеры, характеризующие сортамент простого сортового профиля условно разделить на 3 диапазона, то диапазон с меньшими размерами относится к мелкому сорту, средние размеры - к среднему сорту, крупные - к крупному. В соответствии с размерами профиля разделяют виды сортовых станов, таким образом, сортовые станы бывают:

- мелкосортные;
- среднесортные;
- крупносортные.

Мелкосортные станы имеют прокатные валки в последней клети диаметром 200÷350 мм, среднесортные – диаметром 400÷550 мм, крупносортные – диаметром 450÷850 мм.

Разделение условное, так как технология прокатного производства и указанные диапазоны изменяются.

Для сортовой прокатки можно использовать любые типы прокатных станов, но наиболее перспективные непрерывные станы. Так на ОАО «БМЗ» используются: непрерывный проволоочный прокатный стан 150, непрерывный мелкосортный прокатный стан 320 и реверсивный крупносортный прокатный стан 850, работающий по принципу блюминга.

46. ОБЩАЯ СХЕМА СОРТОПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Сортопрокатное производство размещается в цехе прокатного стана, например на ОАО «БМЗ» существует СПЦ (сортопрокатный цех). Прокатных цехов может быть несколько. Цех имеет следующие основные участки:

1. Участок исходных заготовок.
2. Участок нагрева заготовок.
3. Участок прокатки.
4. Участок термической обработки проката.
5. Участок охлаждения проката.
6. Участок упаковки и хранения готовой прокатки.

На участке исходных заготовок на специальных стеллажах хранятся исходные заготовки. Заготовки поступают на этот участок из сталеплавильных цехов или из цехов прокатки заготовок. Например, на участке хранения заготовок станов 150 и 320 заготовки поступают из сталеплавильных цехов и от прокатного стана 850. Размеры заготовок 125×125 или 140×140.

В сталеплавильных цехах заготовки получают на МНЗЛ из металлорома, а на стане 850 заготовки получают прокаткой из литых заготовок сечением 300×400 или 250×300 мм. Прокатная заготовка применяется для легированных и высокоуглеродистых сталей. Литая заготовка используется для сталей обычного качества. Использование прокатки для получения заготовки способствует повышению качества металла. Далее заготовки поступают на участок нагрева.

Для нагрева заготовок перед прокаткой применяют газовые печи непрерывного действия, позволяющие нагреть металл выше температуры рекристаллизации, обеспечив температурный запас для исключения чрезмерного охлаждения заготовки при ее транспортировке от печи к участку прокатных клетей.

На участке прокатных клетей выполняются основные операции прокатного производства – формоизменение сечения заготовки. Транспортировка заготовки между участками обеспечивается рольгангами, магнитными кранами, реже другими видами подъемно-транспортного оборудования. Транспортирование заготовки между прокатными клетями обеспечивается устройствами валковой подачи (трайб-аппаратами).

После прокатки прокат поступает на линию термической обработки. Линия представляет собой охлаждающее устройство непрерывного действия, использующее воду как теплоноситель. Режимы термообработки регулируются интенсивностью теплоотвода от проката.

После термообработки прокат нарезается на мерные длины и далее охлаждается. Охлаждение на открытом воздухе. После охлаждения прокат упаковывается в бухты, либо стопы.

Для проволоки, свернутой в бухты применяются специальные вязальные машины, скрепляющие бухты. Прокат в виде прутков пакуется и обвязывается в стопы. Упакованный прокат хранится на складе готовой продукции.

Все основные операции контролируются. Ведется постоянный периодический контроль качества и геометрии получаемого проката.

47. ОСОБЕННОСТИ СОРТОВОЙ ПРОКАТКИ

После нагрева прокатных заготовок и их транспортировки к прокатным клетям выполняется непосредственно прокатка заготовки.

Процесс деформации заготовки заранее проектируется. Разрабатывается схема калибровки прокатных валков, которая предусматривает форму и размеры калибров для каждого прохода прокатки, последовательность деформации полосы и скоростной режим прокатки.

Калибровка и скоростной режим обеспечивают точность формы и размеров готового профиля. Точность профиля зависит также от других технологических факторов и особенностей оборудования. Значительный вклад в степень точности имеет привалковая арматура, жесткость и точность элементов прокатной клетки. В этой связи современный прокатный стан имеет клетки повышенной жесткости.

Большую роль в сортовой прокатке играют:

- натяжение полосы между клетями;
- петлеобразование полосы между клетями;
- скорость и температура прокатки.

Они формируют не только точность профиля, но и механические свойства прокатки.

Для сортовой прокатки используются преимущественно непрерывные прокатные станы. Современные сортовые прокатные станы только непрерывные.

Некоторые современные крупносортовые станы работают по реверсивному принципу.

Прокатные валки сортовых станов изготавливаются из чугуна с пластинчатым или шаровидным графитом, из высокоуглеродистой легированной стали и из твердого вольфрамокобальтового сплава. Валки больших диаметров начальных переходов обычно чугунные.

В середине прокатки обычно стальные валки. И на последних клетях часто используются твердосплавные валки.

Прокатка сопровождается постоянным охлаждением водой валков и валковой арматуры.

В соответствии с конструктивными особенностями прокатные клетки разделяются на:

- черновые;
- промежуточные;

- чистовые.

Деление условное, количество клетей в группах может быть разным. Максимальное количество прокатных клетей в стане до 40.

В сортовой прокатке часто используется процесс разделения прокатываемой заготовки на несколько полос. Образно разделение можно представить веером. Основа этого воображаемого веера – подаваемая заготовка, которая по ходу прокатки разделяется на множество лучей (линий прокатки), максимум до 6. После разделения каждая заготовка обрабатывается отдельно параллельно с другими заготовками. Процесс разделения проката позволяет значительно повысить производительность прокатки.

Скоростной режим непрерывного стана определяется законом постоянства секундных объемов полосы.

В черновых и промежуточных клетях обеспечивается натяжение полосы между клетями, а в чистовых и предчистовых клетях обычно устанавливаются петлеобразование. Геометрия петли поддерживается специальными петлеобразующими устройствами.

Современные сортовые станы в качестве последних чистовых прокатных клетей содержат редуционно-калибровочные блоки. Особенности деформации в редуционно-калибровочных блоках – минимальное обжатие и высокие растягивающие нагрузки, обеспечивающие повышенную точность готового профиля.

Все прокатываемые профили имеют отрицательный допуск размера. Это обеспечивает резерв размерного износа валков чистовой группы, а также экономию металла готовой продукции.

Непрерывная сортовая прокатка автоматизирована. Современная компьютеризованная система автоматизации обеспечивает высокую производительность процесса, его автоматическую подстройку и контроль.

Непрерывная прокатка сопровождается большим количеством вспомогательных операций, например:

- обрезь передних и задних краев прокатной полосы с помощью ножниц непрерывного действия (летучих);
- кантовка (поворот) сечения на нужный угол;
- охлаждение проката в линии прокатки до нужной температуры.

Поточность производства на прокатных станах создает благоприятные условия для автоматизации производственного процесса. На станах автоматизированы тепловые режимы нагрева заготовок, выдача заготовок из печи и задача их в стан, кантовка раскатов и передача их из одной линии в другую, охлаждение готового проката на холодильнике и передача на агрегаты правки и порезки металла. На станах автоматизирована загрузка заготовок в печь, тепловой режим нагрева заготовок, обрезка переднего конца раската на ножницах после черновой группы клетей, раскрой прокатанной полосы на летучих ножницах, охлаждение на холодильнике и т.д. На новых прокатных станах вводятся в эксплуатацию комплексные

автоматические системы управления технологическим процессом (АСУТИ), оснащенные ЭВМ. Эти системы обеспечивают стабильность параметров технологического процесса прокатки, повышается точность размеров проката, качество поверхности, улучшаются механические свойства готовой продукции. На современных прокатных станах задачи управления технологическими процессами решаются с учетом планирования, контроля за прохождением металла по переделам, с использованием данных о параметрах технологических процессов, для чего используются мощные ЭВМ. В настоящее время все строящиеся и реконструируемые сортопрокатные станы оборудуются АСУТИ на базе микро- и мини ЭВМ.

48. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ КАЛИБРОВКИ ВАЛКОВ ДЛЯ СОРТОВОЙ ПРОКАТКИ

Формирование конечного сечения прокатной заготовки обеспечивается калибрами прокатных валков. Последовательное уменьшение площади сечения заготовки и формирование требуемых размеров сечения обеспечивает геометрия калибров валков.

Форма и размеры калибров определяет качество структуры проката, расход энергии на прокатку, производительность прокатки, интенсивность износа прокатных валков, поэтому оптимально построенные калибры позволяют достичь оптимальное соотношение выше приведенных факторов.

Калибровкой прокатных валков называют расчет всех исполнительных размеров калибров прокатных валков для каждого прохода прокатки. Результаты калибровки представляют собой масштабные схемы калибров прокатных валков и таблицы калибровки, содержащие все основные расчетные параметры прокатки для каждого прохода прокатки.

Полученную геометрию калибров проверяют по нескольким критериям:

- по допустимому углу захвата;
- по допустимым вытяжкам;
- по допустимому усилию прокатки на валках;
- по допустимому моменту прокатки на валках;
- по допустимой мощности прокатки.

В этой связи калибровка охватывает все основные деформационно-кинематические и энергосиловые параметры прокатки. В литературе используют два понятия: калибровка валков и калибровка профиля.

Под калибровкой валков понимается не только определение размеров калибров, но и порядок их размещения на цилиндре прокатного валка. В большинстве случаев количество калибров на одном валке от двух и более.

Цель калибровки валков: расчет оптимального режима обжатий заготовки в каждом проходе и получение оптимальной формы и размеров рабочей поверхности прокатных валков для достижения максимальной производительности и качества сортового проката.

Калибровка прокатных валков включает следующие основные задачи:

1. Разработка схемы или системы калибровки, представляющей собой последовательный ряд разных сечений полосы от исходного до готового профиля;
2. Расчет вытяжек полосы для каждого калибра;
3. Расчет размеров калибра;
4. Размещение калибров на прокатном валке;
5. Расчет скорости, давления, усилия, момента и мощности прокатки для каждого прохода прокатки;
6. Анализ полученных результатов с целью сравнения полученных результатов с допустимыми значениями; если проектные режимы превышают допустимый уровень, то это говорит о чрезмерной перегрузке режимов прокатки; или наоборот, излишне низкие расчетные режимы указывают на недогрузку прокатного оборудования. В обоих случаях расчеты корректируются для достижения оптимального результата.

Правильно выполненная калибровка валков обеспечивает:

- 1) надежный захват и движение заготовки через калибр;
- 2) получение требуемого размера готового профиля с допустимыми отклонениями размеров;
- 3) удовлетворительное качество поверхности прокатки;
- 4) равномерную загрузку привода прокатных валков по проходам прокатки;
- 5) минимальный расход энергии;
- 6) максимальную производительность прокатки;
- 7) минимальный расход или износ прокатных валков;
- 8) возможность прокатки максимального количества разных профилей с минимальными затратами на настройку валков.

Таким образом, калибровка прокатных валков – основной расчетный этап сортопрокатного производства.

49. ЭЛЕМЕНТЫ КАЛИБРА

Рассмотрим схему прямоугольного калибра для изучения основных элементов калибра (рис. 59).

Элементы калибра:

1. $D_{\text{в}}$, $D_{\text{н}}$ – диаметры верхнего и нижнего валков; обычно $D_{\text{в}} \neq D_{\text{н}}$, если $D_{\text{в}} > D_{\text{н}}$, то прокатка имеет верхнее давление, $D_{\text{н}} > D_{\text{в}}$, то прокатка имеет нижнее давление.
2. $D_{\text{ср}}$ – средний диаметр валков

$$D_{\text{ср}} = \frac{D_{\text{в}} + D_{\text{н}}}{2}.$$

3. $D_{\text{бв}}, D_{\text{бн}}$ – диаметры бочки (цилиндра) верхнего и нижнего валков.
4. $D_{\text{кв}}, D_{\text{кн}}$ – диаметры глубины калибра верхнего и нижнего валков; если ширина полосы расположена на уровне дна калибра, то эти диаметры равны катающим диаметрам валков.

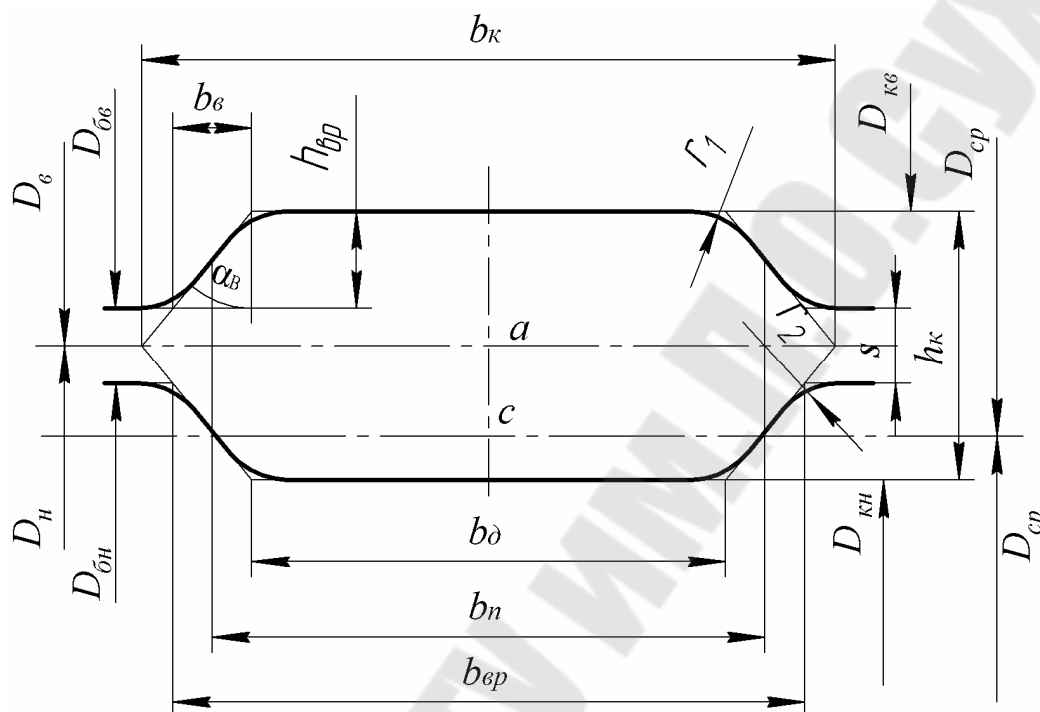


Рис. 59. Основные элементы калибра

5. s – зазор между валками.
6. $h_{\text{вп}}$ – высота вреза калибра, всегда равна:
7. $h_{\text{к}} = h_{\text{н}}$ – высота калибра равная высоте полосы.
8. $b_{\text{к}}$ – ширина калибра.
9. $b_{\text{в}}$ – ширина выпуска калибра.
10. $b_{\text{д}}$ – ширина дна калибра (может отсутствовать, например, в круглых калибрах).
11. c – средняя линия валков, определяемая диаметром $D_{\text{ср}}$.
12. a – линия разреза калибра, определяемая диаметрами $D_{\text{в}}, D_{\text{н}}$.
13. Нейтральная линия калибра – это условная линия калибра, относительно которой моменты сил, действующие на полосу со стороны валков, равны. Обычно проходит через геометрический центр тяжести сечения калибра. Поэтому для приведенной схемы прямоугольного калибра нейтральная линия совпадает с линией a . Но такое совпадение не обязательно. Оно отсутствует, например, в большинстве фасонных калибров.
14. Катающий диаметр калибра опирается на приведенную высоту полосы калибра: для данной схемы соответствует $D_{\text{кв}}$ и $D_{\text{кн}}$.
15. $\alpha_{\text{в}}$ – угол выпуска калибра.
16. $b_{\text{н}}$ – ширина полосы.

17. r_1 – радиус дна калибра.
18. r_2 – радиус бурта калибра.

50. ВИДЫ КАЛИБРОВ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ

Калибры валков классифицируются по назначению, форме и конструкции.

По назначению:

- отделочные;
- вытяжные.

Отделочные предназначены для уменьшения площади поперечного сечения полосы и для одновременного приближения формы сечения к окончательной геометрии профиля после прокатки. Отделочные калибры разделяются на чистовые и предчистовые. Чистовой калибр всегда один устанавливается на последней прокатной клетке. Предчистовых – несколько калибров. Их назначение: постепенное приближение форм профиля полосы к готовому профилю. Для простых профилей количество отделочных калибров около двух, для фасонных – до десяти.

Вытяжные предназначены только для уменьшения площади сечения полосы, а также для формирования структуры металла. Количество вытяжных калибров всегда четное, они всегда разделяются на пары калибров. Первый калибр пары неравноосный, а второй – равноосный. По сути первый калибр плющит полосу, создавая неравноосное сечение, а второй калибр пары возвращает равноосное сечение полосы, но с меньшей площадью сечений. В каждой паре калибров имеются определенные размеры и формы. Каждая последующая пара имеет повторяющиеся формы с уменьшением размеров. В результате деформации полосы в паре калибров сечение уменьшается, а длина увеличивается.

В зависимости от формы калибров в паре получила название система калибровки натяжных калибров. Например, система овал-круг (неравноосный овал – равноосный круг), овал-квадрат (неравноосный овал – равноосный квадрат) и т.д.

В зависимости от формы калибры могут быть (рис. 60):

- 1) круглыми;
- 2) квадратными;
- 3) овальными;
- 4) ребровыми (вертикально-овальными) – овальными;
- 5) шестиугольными;
- 6) прямоугольными;
- 7) ребровыми.

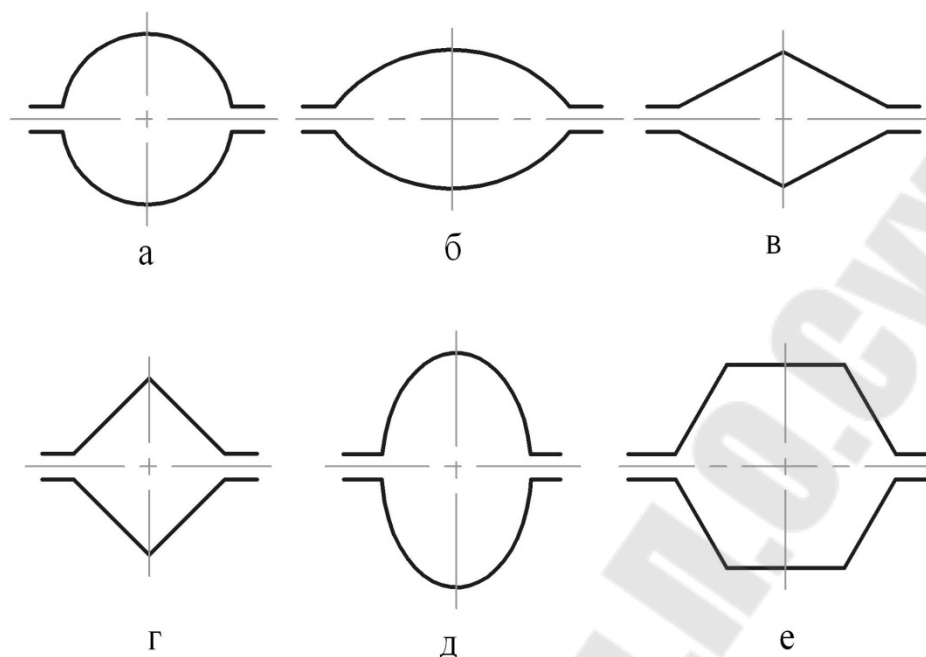


Рис. 60. Схемы простых калибров:
a – круглый; *б* – овальный; *в* – ромбический; *г* – квадратный;
д – ребровой овальный; *е* – шестигранный

Приведенные схемы относятся к простым калибрам. Для прокатки сложных фасонных профилей используются фасонные калибры.

В зависимости от конструкции:

- закрытые (рис. 61);
- открытые.

В открытом линия разъема валков или линеек проходит по середине зазора пересекающего контур калибра. В закрытом эта линия не пересекает контур калибра. Приведенные на схеме калибры – открытые. Пример закрытого калибра (чистовой калибр для прокатки углового профиля):

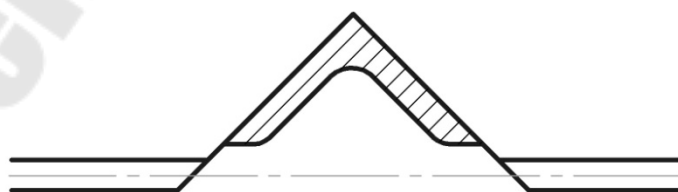


Рис. 61. Закрытый калибр

51. ВИДЫ СИСТЕМ ВЫТЯЖНЫХ КАЛИБРОВ

Название системы вытяжных калибров формируется исходя из видов форм калибров, входящих в систему.

Система вытяжных калибров – это название двух калибров, образующих пару вытяжных калибров: первый калибр неравноосный, второй – равноосный.

Наиболее распространенные системы вытяжных калибров:

- прямоугольные (ящичные), ромб-ромб, ромб-квадрат, овал-квадрат, овал-ребровый (вертикальный) овал, овал-круг.

Указанные системы вытяжных калибров используются в сортопрокатном производстве, а также в производстве блюмов, фасонных профилей, рельсобалочной продукции и другой продукции.

Рассмотрим схемы систем вытяжных калибров.

1. Система вытяжных калибров прямоугольная (ящичная) (рис. 62).

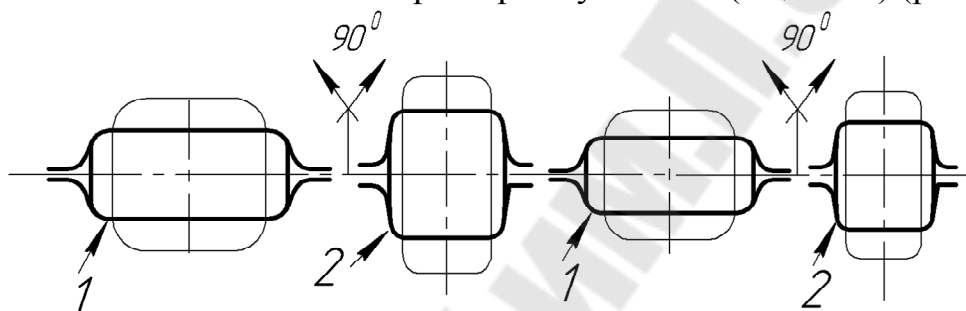


Рис. 62. Прямоугольная система вытяжных калибров:

1 – неравноосный прямоугольный калибр;

2 – равноосный прямоугольный калибр

Первый калибр осаживает сечение до прямоугольного профиля;

Второй осаживает прямоугольный профиль до квадратного.

Далее прямоугольник и квадрат чередуются попарно с уменьшением площади сечения.

Преимущества данной системы:

1) возможность использования одного калибра для нескольких проходов. Например, для блюминга калибры 1 и 2 совпадают.

2) относительно небольшая глубина вреза калибра, что незначительно снижает жесткость и прочность валка.

3) обеспечивается высокая равномерность деформации сечения, что повышает качество проката.

4) создаются благоприятные условия для удаления окалины в процессе прокатки.

5) высокая деформирующая способность.

Недостатки:

- возможность появления перекоса сечения вследствие отсутствия возможности формирования правильного прямоугольника и квадрата.

- невозможность использования систем для формирования правильного готового квадратного профиля.

Используется система при прокатке блюмов и в черновых клетях сортовой прокатки.

2. Система вытяжных калибров ромб-квадрат (рис. 63).

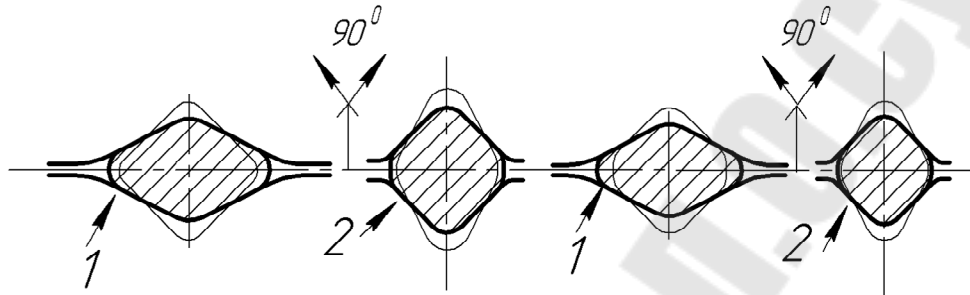


Рис. 63. Система Ромб-квадрат:

1 – неравноосный ромбический калибр; 2 – равноосный квадратный калибр

Преимущества:

- 1) хорошая устойчивость полосы в калибре;
- 2) высокие деформационная и вытяжная способности;
- 3) возможность формирования правильного квадратного профиля.

Недостатки:

- относительно затрудненное удаление окалины, вызванное наличием прямых и острых углов в калибре.

- высокая неравномерность деформации полосы, что снижает качество структуры прокатки, поэтому система не используется для прокатки высококачественных металлов и сплавов.

Основное применение: в чистовой и отделочной группе калибров для формирования точных квадратных профилей.

Система ромб-ромб аналогична и отличается использованием ромбического калибра с малой разностью осей вместо квадратного.

1. Система вытяжных калибров овал-квадрат (рис.64).

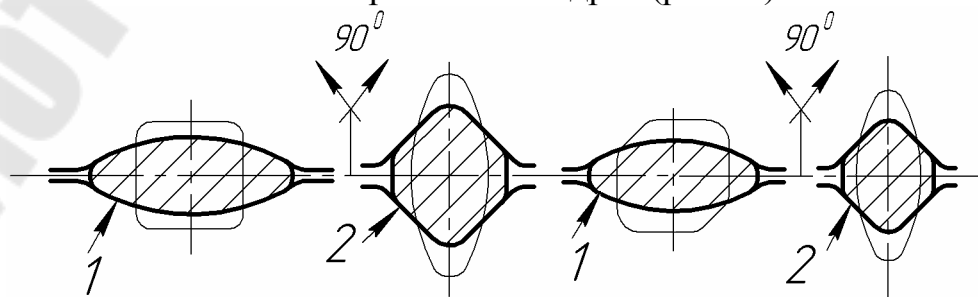


Рис. 64. Система Овал-квадрат

В неравноосном овальном калибре 1 входящее квадратное сечение самопроизвольно кантуется на 45° , деформируясь, превращается в овал. На

выходе из калибра принудительно кантуется на 90° и вводится в квадратный калибр. Далее цикл прокатки повторяется с уменьшением размеров сечений. В отличие от системы ромб-квадрат, имеет более высокую равномерность деформации, что способствует получению более качественной структуры проката, но имеет меньшую деформирующую или вытяжную способность, что снижает производительность прокатки. Система используется в сортопрокатном производстве.

4. Система вытяжных калибров Овал-круг (рис. 65, а).

1 – неравноосный овальный калибр

2 – равноосный круглый калибр.

В отличие от предыдущей системы имеет высокую равномерность деформации и соответственно высокое качество структуры проката, но обладает минимальными деформацией или вытяжной способностью, что снижает производительность прокатки или требует установки максимального количества прокатных клетей. Такую систему имеют сортопрокатные станы ОАО «БМЗ». Они специализируются на разных марках стали, в том числе на высококачественных, поэтому количество клетей не является ограничивающим фактором.

2. Система вытяжных калибров овал - ребровый (вертикальный) овал (рис. 65, б).

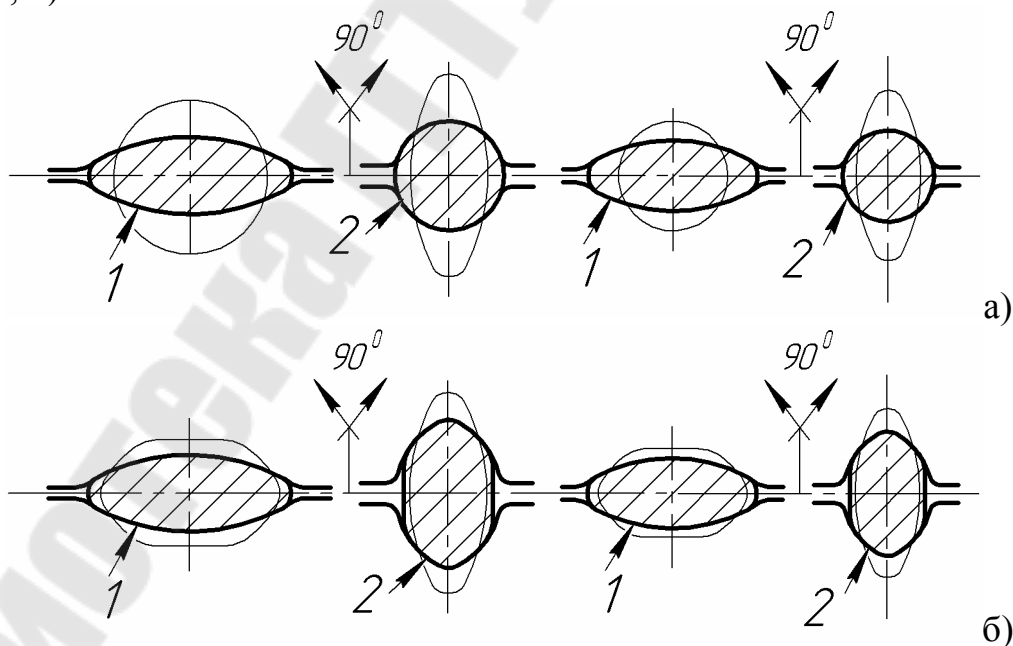


Рис. 65. Система: а – Овал-круг; б – Овал-ребровый овал:

1 – неравноосный овальный калибр;

2 – равноосный круглый или ребровый овальный калибр

Первый калибр из более равноосного овала формирует менее равноосный овал сечения полосы; второй – из более неравноосного овала формирует менее неравноосный овал сечения полосы.

Преимущества:

1) максимальная равномерность деформации и максимальное качество прокатки;

2) более высокая деформационная способность по сравнению с системой овал-круг.

Кантовка после овального калибра принудительная, а в овальных калибрах выполняется самокантовка полосы, вышедшей из ребрового овального калибра.

52. ОСОБЕННОСТИ ПРОКАТКИ КАТАНКИ

Катанка или проволока-катанка – основная продукция проволочных прокатных станов, поставляемая в мотках. Предназначена для производства проволоки различного назначения: канатной, сварочной, пружинной, электротехнической, для производства метизов и др.

В общей классификации принято называть катанкой круглый, квадратный и периодический профиль с размером от 5 до 12 мм. Но современные проволочные прокатные станы способны получать размеры этих профилей до 24 мм. Поэтому в современных проволочных станах есть размерный диапазон готового профиля от 4,5 до 24 мм.

В связи с относительно небольшими размерами катаемых профилей, существуют некоторые особенности прокатки данных профилей.

Основная особенность – высокие и сверхвысокие скорости прокатки катанки на последних клетях (до 140 м/сек). В этих условиях кантовка сечения на уровне последних клетей невозможна, поэтому используются специальные расположения прокатных валков, имитирующие поворот сечения или кантовки (рис. 66).

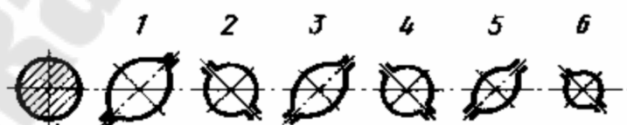


Рис. 66. Схема расположения калибров для прокатки мелких профилей

В проволочном стане каждая последующая пара валков поворачивается на угол 90° относительно предыдущей. На первых проходах при больших площадях сечений применяют обычную кантовку полосы, с помощью кантовочных устройств. Таким образом, черновые и предчистовые группы клетей – горизонтальные. В горизонтальных черновых и предчистовых клетях используют натяжение полосы между клетями, а в чистовой группе клетей в поворотном расположении валков применяют подпоры или петлеобразование. Это связано с низкой прочностью тонких горячих сечений.

Система калибровки проволочных станов овал-круг, овал-ребровый овал, овал-квадрат. В чистовой группе клетей всегда овал-круг.

Для повышения точности размеров профиля в проволочных станах после чистового калибра применяют редуционные калибровочные блоки. Они предназначены для повышения точности размера профиля путем прокатки в системе калибров круг-круг. Работая на минимальных вытяжках, выполняют калибрующую функцию.

Одним из эффективных направлений получения профилей высокой точности, экономии металла при его производстве и потреблении является использование технологии горячего калибрования подката в технологическом потоке станов горячей прокатки. Для получения горячекалиброванной стали за чистовой клетью дополнительно устанавливают двух- или трехклетевой блок трехвалковых клетей. Раскат, поступающий в калибрующий блок из чистовой клетки, получает малые обжаты в системе калибров круг-круг, что обеспечивает получение профиля высокой точности. Окалину с поверхности горячекалиброванного проката удаляют пескоструйной обработкой, иглофрезерованием, на правильно-полировальных машинах и др.

В линии прокатки катанки устанавливаются охлаждающие устройства, снижающие температуру деформационно нагреваемой катанки. После выхода из блока прокатных клетей, катанка, охлаждающаяся в водоохлаждаемых секциях, попадает в виткообразователь, сворачивается в спираль и укладывается в вертикальный виткосборник (рис. 67).

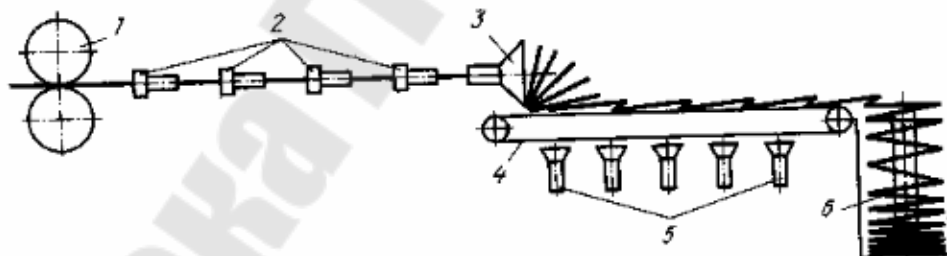


Рис. 67. Схема виткообразования катанки

Катанка выходит из отделочных калибров 1. Охлажденная в водоохлаждающих секциях 2 катанка попадает в виткообразователь 3, витки катанки укладываются на транспортер 4, на котором с помощью вентиляторов 5 охлаждаются воздухом. Далее витки попадают в вертикальный виткосборник 6. Водяное охлаждение – это первая стадия охлаждения до температуры 750-850°С для стали. Вентиляторами температура снижается ниже 720 °С. Двухстадийное охлаждение уменьшает окалинообразование, способствует получению более однородной структуры, улучшает травимость окалины на последующих операциях. Получаемая структура имеет повышенную деформируемость в холодном состоянии без разрушения.

53. ОСОБЕННОСТИ ПРОКАТКИ УГЛОВОГО ПРОФИЛЯ

Прокатка углового профиля отличается отделочной группой калибров; вытяжные калибры существенно не отличаются от калибров при прокатке другого сортамента. Таким образом, основной особенностью прокатки углового профиля является калибровка отделочных калибров. Всего известно около пяти способов калибровки отделочных угловых калибров. Каждый способ применяется для станов определенной конструкции. Угловой профиль получают в линейных (реверсивных) и непрерывных станах. Все способы калибровки углового профиля условно разделяют на две группы:

- 1) с развернутыми полками;
- 2) с прямыми полками.

Преимущества прямых полок: простота изготовления калибров.

Недостаток: глубокий врез калибра.

Преимущества развернутых полок: малый врез калибра.

Недостаток: сложность изготовления.

На современных непрерывных станах угловой профиль катают в угловых калибрах с развернутыми полками.

Рассмотрим схему отделочных калибров для этой прокатки (рис. 68).



Рис. 68. Схема отделочных калибров с развернутыми полками для прокатки углового профиля (ход прокатки на схеме сверху вниз)

В предчистовых калибрах используется свободное уширение. Это дает возможность применять одни и те же вытяжные калибры для разных размеров углового профиля.

Ребровые угловые калибры контролируют ширину полок калибров, уголка, повышают точность размеров профиля.

Исходная заготовка для отделочных калибров имеет прямоугольное сечение и формируется на гладких валках.

54. ОСОБЕННОСТИ ПРОКАТКИ ПОЛОСОВЫХ ПРОФИЛЕЙ

Прокатка в полосовом стане осуществляется на линейных непрерывных мелкосортных полосовых и штрипсовых станах.

Полосовой профиль также формируют перед продольным разделением проката на несколько полос.

Прокатка полосового профиля на непрерывных станах осуществляется в вытяжных и отделочных калибрах.

Вытяжные калибры универсальные, используются для всего сортамента стана.

Отделочные калибры состоят из чередующихся калибров гладкая бочка – ребровой прямоугольный калибр (рис. 69).

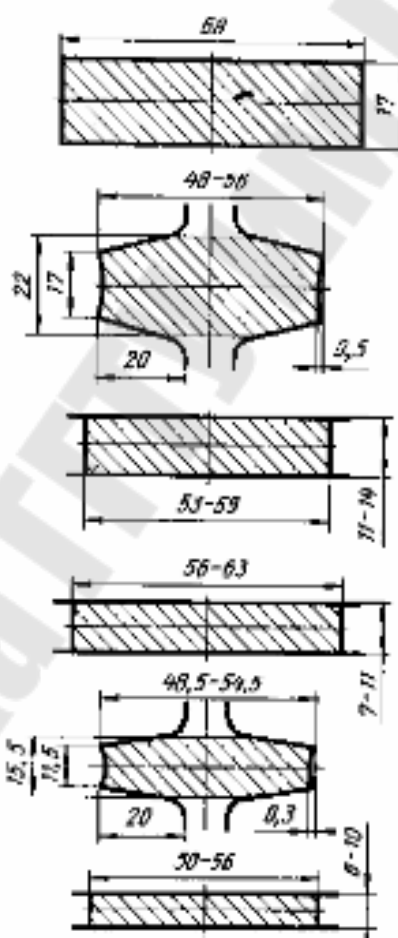


Рис. 69. Схема отделочных калибров для полосового профиля (ход прокатки на схеме сверху вниз):

калибры 1, 3 и 5 – гладкая бочка; 2, 4 – ребровые прямоугольные калибры

В ребровых прямоугольных калибрах повышается точность ширины полосы и исключается раскатка профиля в листовую профиль. Пример калибровки полосовой стали шириной полосы 50-56 мм и толщиной 5-10 мм на рис. 69.

55. СОРТАМЕНТ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА

Листовой прокат широко используется в различных отраслях машиностроения, электротехники и в металлургии в производстве сварных труб и гнутых профилей.

В общем объеме прокатной продукции листовой прокат занимает большую половину. Листовой прокат - основная заготовка в листоштамповочном производстве. В связи с большим многообразием видов листовых профилей используются несколько классификационных признаков:

1. По температурному режиму листовой прокатки:

- горячая листовая прокатка;
- холодная листовая прокатка.

Если температура прокатки выше температуры рекристаллизации, то прокатка горячая, если ниже - холодная.

Преимущества горячей прокатки: высокая производительность при больших обжатиях, возможность получения больших значений толщины проката, широкая номенклатура сортамента.

Недостаток горячей прокатки: окисление металлов; затраты на нагрев металлов; физическое отсутствие возможности получения тонких листов (это связано с термическими напряжениями, возникающими в тонком горячем листе при его неравномерном охлаждении).

Преимущества холодной прокатки: получение тонких и тончайших листов, получение упрочненных листов.

Недостатки холодной листовой прокатки: необходимость травления поверхности исходной заготовки, низкие обжатия полосы, упрочнение при прокатке вызывает необходимость выполнения разупрочняющей термообработки.

2. По геометрическим размерам:

- толстый лист (толщиной свыше 4 мм.);
- тонкий лист (толщиной менее 4 мм.).

Толстые листы имеют диапазон толщины 4-160 мм, ширины 600-5300 мм. Длина толстого листа до 50 м, обычно 2-12 м. Толстый лист выпускают в виде плоских плит (толщина свыше 60 мм), полос. Полосы толщиной 4-16 мм и шириной до 2300 мм могут сворачиваться в рулоны.

Тонколистовой профиль сворачивается в рулоны.

Тонколистовой профиль шириной свыше 600-700 мм называется широкополосным.

Полосы толщиной менее 2 мм и шириной менее 300 мм называются лентами.

Тонкий лист толщиной 0,08-0,5 мм называется жостью. Обычно она имеет антикоррозийное покрытие: цинк, олово.

Если тонкий лист имеет толщину менее 0,08 мм, то его называют фольгой. Минимальная толщина фольги 1 мкм.

3. По химическому составу:
- стальной;
 - цветной.

В стальном листовом прокате около 80% занимает углеродистые стали, около 18% низкоуглеродистые стали и около 2% легированные стали. Легированный листовой прокат - преимущественно нержавеющий и электротехнический.

Листовой прокат из цветных металлов занимает в объеме всего листового проката чуть более 2%. Наиболее распространенные цветные металлы в листовом прокатном производстве:

- алюминий и его сплавы;
- медь;
- латунь;
- бронза.

Встречаются листовые профили почти всех существующих металлов, только в меньшем количестве.

4. По назначению:
- универсальный стальной листовой профиль;
 - конструкционный;
 - кровельный;
 - нержавеющий;
 - электротехнический;
 - слойные листы, сочетающие в себе слой основного относительно

недорогого металла и слой специального металла или сплава, выполняющий эксплуатационную функцию. Например, основной слой – обычная сталь, а 2-ой – антикоррозийный, износостойкий, электротехнический. Основной слой несет основную механическую нагрузку и заполняет основной объем листа, а тонкий дорогостоящий слой выполняет рабочую функцию. Если использовать 2 слоя, то листовой прокат называется биметаллом. Может быть 3-х, 4-х и более слойные листовые конструкции.

В настоящее время широко производятся стальной листовой прокат с пластмассовыми покрытиями и другими полимерными составами.

56. ВИДЫ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ ДЛЯ ГОРЯЧЕЙ ЛИСТОВОЙ ПРОКАТКИ

Горячая листовая прокатка занимает 90% от всего сортамента листового проката, обрабатываемого в горячем состоянии, т.е. только около 10% горячекатаного листа не относится к указанному виду продукции.

Горячекатаный листовой прокат разделяется на 2 вида:

- толстолистовой профиль;
- широкополосный профиль.

Толстолистовой сортамент получают на прокатных толстолистовых станах.

Толстолистовые станы бывают:

- одноклетьевые;
- двухклетьевые (черновая и чистовая).

Они обрабатывают прокаткой черные и цветные металлы. Клеть может иметь 2, 3, и 4 прокатных валка. Принципы прокатки заключаются в деформации литых заготовок в реверсивно вращающихся прокатных валках. Чем большее количество валков, тем тоньше листовой профиль. Толстолистовой профиль обрабатывается без сматывания полосы в рулоны.

В двух клетьевых толстолистовых станах клетки могут иметь разное количество валков. В некоторых случаях применяется дополнительная вертикальная клеть для устранения разнотолщинности подаваемого сляба.

Широкополосные станы разделяются на:

- непрерывные;
- полунепрерывные;
- реверсивные.

Листовая продукция этих станов сворачивается в рулоны.

Непрерывный широкополосный стан (рис. 70) имеет 10–15 прокатных клетей, расположенных последовательно.

Реверсивные широкополосные станы (рис. 71) имеют одну или две реверсивные клетки. В случае наличия двух прокатных клетей чаще используются четырех валковые клетки, с рабочими неприводными валками 1 и опорными приводными валками 2. Реверсивный стан оборудован моталками барабанной конструкции 3, расположенными в нагревательных печах 3:

После каждого реверсивного движения зазор между валками автоматически изменяется. Печи поддерживают требуемую температуру прокатки.

Полунепрерывные широкополосные станы имеют первые одну или две реверсивные прокатные клетки, а вторая часть клетей выполнена в виде непрерывного широкополосного стана.

Широкополосные листовые профили производятся также на планетарных листовых прокатных станах, на листовых литейно-прокатных агрегатах.

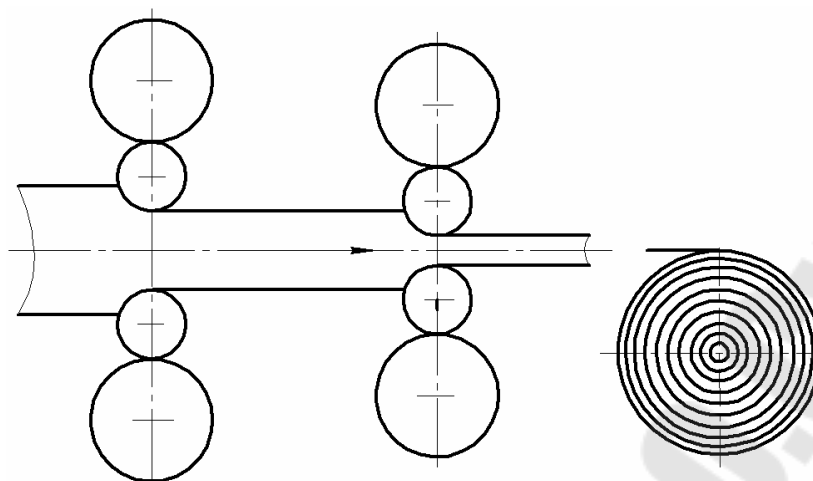


Рис. 70. Схема непрерывного широкополосного прокатного стана

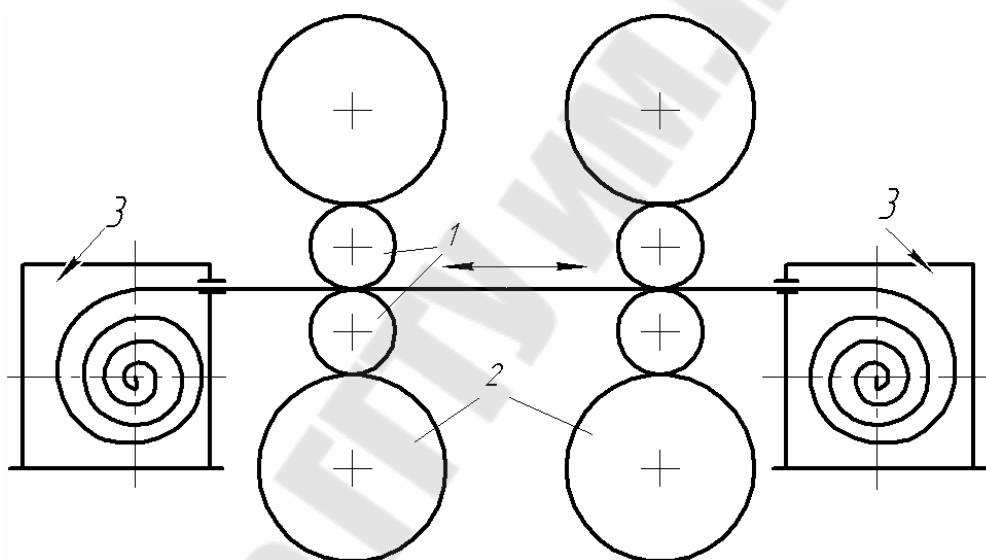


Рис. 71. Схема реверсивного широкополосного прокатного стана

57. СХЕМЫ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ЛИСТОВОГО ПРОФИЛЯ

Все прокатные станы холодной листовой прокатки разделяются на два основных вида:

- прокатные;
- дрессировочные.

Прокатные станы для получения холодного листового проката разделяются на:

- непрерывные;
- бесконечные;
- реверсивные;
- полистные.

Рассмотрим схемы этих прокатных станов.

1) *Непрерывные холоднолистовые станы (рис. 72).*

Имеют 2...6 прокатных клеток преимущественно с 4-мя валками:

Скорость прокатки = 20 – 40 м/с, толщина полос 0,1 – 3 мм, ширина полос 500 – 2500 мм. Имеет максимальную производительность и широко распространен.

2) *Листовые станы бесконечной прокатки.*

Принцип бесконечной листовой прокатки основан на непрерывной прокатке со сваркой стыков листов последующих рулонов без остановки процесса прокатки. Процесс прокатки не прекращается и при снятии готовых рулонов с намотки.

Организован процесс с помощью накопительных устройств на размотке и намотке. Производительность стана бесконечной прокатки повышается до 70% по сравнению с обычными непрерывными станами. Основной недостаток, сдерживающий развитие процесса – усложнение конструкции стана, т.к. появляется необходимость в использовании сложного накопительного устройства и согласованного непрерывного приема готового проката.

Непрерывный и бесконечный листовые прокатные станы эффективны при больших программах выпуска проката. Для прокатки малых партий более эффективна реверсивная прокатка.

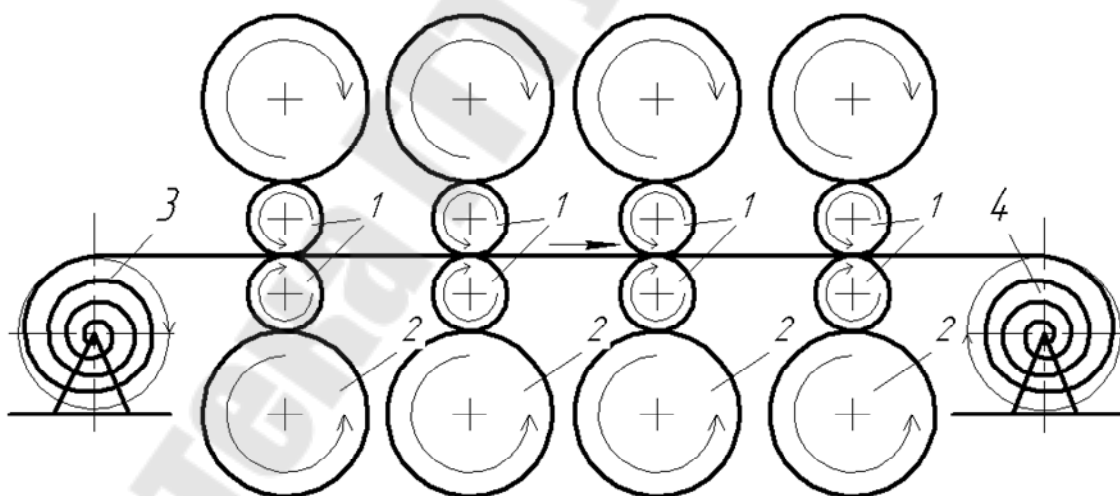


Рис. 72. Схема непрерывного холоднолистового стана:

1 – рабочие валки; 2 – опорные валки; 3 – размотка с рулоном прокатной заготовки; 4 – намотка с рулоном готового проката

3) *Холоднолистовые одноклетьевые станы реверсивной прокатки (рис. 73).*

Количество валков в одной клетке такого может быть разным: от 4 до 36. Чем большее количество валков, тем тоньше листовой профиль. Толщина полос может быть уменьшена до нескольких микрон.

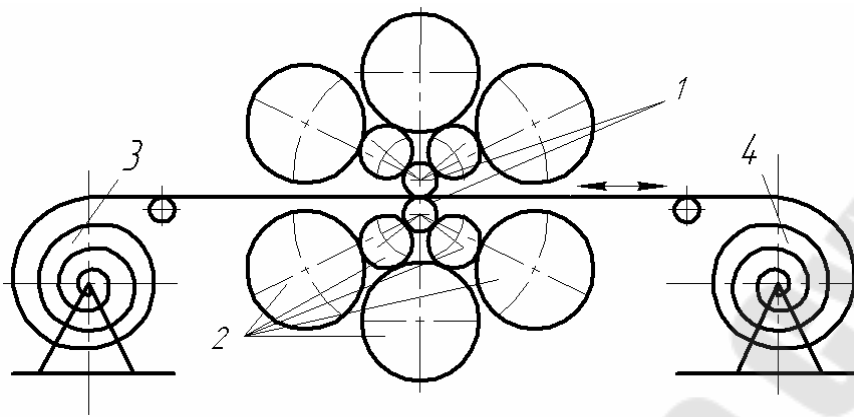


Рис. 73. Схема реверсивного многовалкового холоднолистового стана:
 1 – рабочие валки; 2 – опорные валки; 3 – намоточно-размоточное устройство; 4 – намоточно-размоточное устройство

Для 4-валковой прокатки минимальная толщина листа 0,2 мм, а для 20-ти валковой – 0,002 мм. Теоретическое объяснение такой взаимосвязи находится в зависимости усилия прокатки от радиуса прокатных валков: чем меньше диаметр рабочего вала, тем меньше длина дуги контакта и тем меньше усилие прокатки. Уменьшение усилия прокатки снижает распирающее действие сил между прокатными валками. Это в свою очередь снижает упругую деформации валков и клетки в целом. Снижение величины упругой деформации между валками позволяет получить более тонкий профиль, толщиной в пределах величины упругой деформации клетки между валками.

Деформирующие пососу валки называются *рабочими*, остальные валки – *опорные*. Привод подключается к опорным валкам. Опорные валки повышают жесткость рабочих и передают момент вращения от электромотора.

Многовалковые схемы прокатки преимущественно распространены в цветной металлургии. Основной недостаток реверсивной одноклетьевого прокатки: сложность конструкции клетки.

4) Станы полистной холодной прокатки.

Прокатные станы выше приведенных схем производят листовую продукцию в рулонах, но существует необходимость в производстве плоского листового проката. Для этих целей используют станы полистной холодной прокатки. Принцип этой прокатки аналогичен схеме реверсивного одноклетьевого 4-валкового прокатного стана с принципиальной разницей, заключающейся в отсутствии сворачивания полосы в рулон. Станы этого типа обладают низкой производительностью, относительно невысоким качеством продукции (т.к. отсутствует натяжение полосы при прокатке), поэтому используются для производства толстых плоских листов.

Дрессировочные станы предназначены для прокатки отожженных листов с обжатием около 1%, но не более 5 %. Дрессировка используется для полос толщиной 0,2 ÷ 3 мм. Прокатка с относительно малой деформацией

позволяет исключить последующее образование на поверхности листа дефектов от линии скольжения при листовой штамповке деталей из этого листа. Дрессировка устраняет площадку текучести на кривой растяжения этого металла и как следствие устраняет линии скольжения на поверхности листа при его дальнейшей пластической деформации, например, листовой штамповкой. Дрессировочный стан имеет 1 или 2 клетки с 4-мя валками. Схема прокатки аналогична непрерывной прокатки рулонных полос. Основные отличия: повышенная жесткость клетки, повышенное натяжение полосы при прокатке для ее выравнивания растяжением. Скорость прокатки на этом стане достигает 30 м/с. Иногда совмещают прокатку и дрессировку в одном стане. Такое совмещение эффективно для прокатки жести.

58. ПРОИЗВОДСТВО ГНУТЫХ ЛИСТОВЫХ ПРОФИЛЕЙ

Операция профилирования позволяет с помощью пластического изгиба изменить форму поперечного сечения исходного листового проката (рис. 74).

По сути профилировка – это прокатка без деформации толщины листа (полосы). Пластическая деформация присутствует в изгибе, что позволяет сохранить профилированную форму с остаточной деформацией. Деформация холодная. Профилирование осуществляется преимущественно в непрерывных профилегибочных станах, иногда профилируют в прессах.

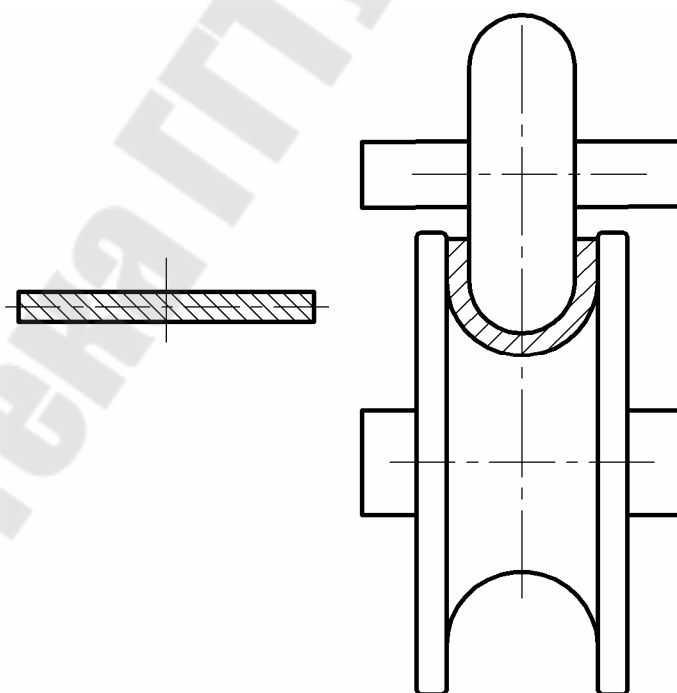


Рис. 74. Схема профилировки листа

Непрерывный профилированный стан имеет ряд прокатных клеток с приводными валками. Калибровка валков обеспечивает постепенный изгиб профиля до необходимой конечной формы. Между прокатными клетями

могут устанавливаться неприводные ролики, сжимающие профиль в направлении 90° от направления деформации в приводных валках. Неприводные ролики препятствуют упругому пружинению профиля, могут дополнительно пластически его изгибать. Для изготовления гофрированных листов с ограничением длины применение профилировки на непрерывных станах нерационально. Поэтому в этих случаях используется крупногабаритная пресса. Изгиб штамповкой профилирует лист одновременно по всей длине. Штамповка рациональна при опытном и единичном производстве.

Гнутые изделия производят из углеродистых, легированных сталей, цветных металлов и сплавов.

Исходной заготовкой для профилировки служит горячекатаный или холоднокатаный лист. Исходная толщина листов заготовки 0,3–12 мм, ширина 7 мм – 2 м. Сортамент гнутых профилей обширен. Профилированием можно получить формы сечений высокой сложности. Преимущество гнутых профилей по сравнению с сортовыми профилями: снижение объема механической обработки и объема операций соединения в связи с возможностью получения полос изделий без винтовой прокатки; высокая равномерность профиля; высокое соотношение величины жесткости к массе изделия.

Недостатки: часто необходима операция сварки продольного шва (например: сварная труба с прямым или спиральным швом); узкая область использования, так как сортовой профиль применяется гораздо шире.

59. ВИНТОВАЯ ПРОКАТКА ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПРОФИЛЕЙ

Периодический профиль может формироваться не только продольной прокаткой, но и винтовой прокаткой. Винтовой прокатки позволяет получить такие тела вращения, как валы и оси с периодическим профилем.

Винтовая прокатка также позволяет получить полые профили с примененным диаметром и стенкой по длине заготовки, позволяет нанести винтовую поверхность на тело вращения. Этот процесс реализуется двумя способами:

1. Прокаткой в круглых валках с регулируемым расстоянием между осями валков;
2. Прокатка в валках с винтовыми калибрами.

Рассмотрим схему винтовой прокатки периодических профилей в круглых валках с регулируемым расстоянием между осями валков (рис. 75).

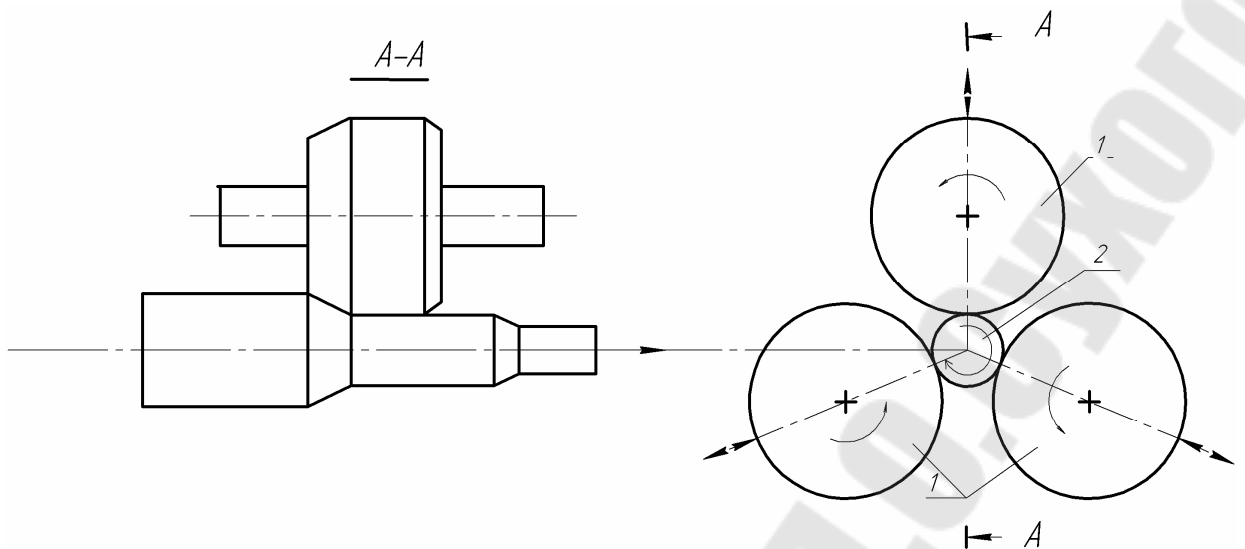


Рис. 75. Схема винтовой прокатки периодического профиля:
1 – прокатные валки; 2 – заготовка

Валки могут иметь дисковую, коническую форму, но в поперечном сечении они круглые. Использование 3-х валков исключает необходимость дополнительной установки устройств, удерживающую заготовку степень деформации 40 – 60%. Для создания винтового движения заготовки используют специальное устройство, перемещающие заготовку вдоль оси через очага. Диаметр исходных заготовок 10 – 220 мм. Прокатка горячая. Вместо стержней заготовки могут применяться полая заготовка или труба.

Винтовая прокатка с винтовыми калибрами применяется для изготовления коротких тел вращения шариков, роликов, коротких цилиндров, полых заготовок. Винтовые калибры также позволяют создать винтовую поверхность на длинных винтовых и ребристых трубах.

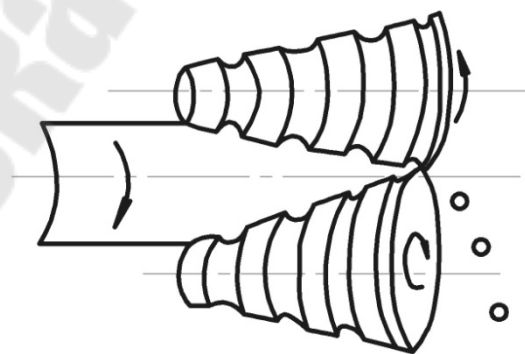


Рис. 76. Схема прокатки шаров

В схеме винтовой периодической прокатки на валках с винтовыми калибрами может присутствовать 2 или 3 валка. Схема с 2-мя валками обеспечивает возможность максимального сближения валков и деления проката. По таким схемам изготавливают шары, короткие цилиндры, конические заготовки (ролики). Трех валковые схемы применяются для

изготовления профилей без разделения. Например, сплошные стержни с резьбовой поверхностью, гофрированные металлические трубы. При использовании двух валковых схем обязательное присутствие линеек, удерживающих заготовку. Для исключения смещения заготовки схема деформации в трех валках более благоприятна. Шаропрокатные 2-валковые станы обеспечивают получение заготовок для шаров диаметром 25-50 мм. Прокатка горячая. После прокатки ускоренное охлаждение, далее обработка шаров во вращающихся барабанах, где удаляют перемычки. Затем разупрочняющий отжиг, шлифовка и окончательная термообработка. Так получают шарикоподшипниковые изделия из стали ШХ-15. Мелющие шары или шары для мельниц получают аналогично, но в очаге деформации перемычки вдавливаются в тело шаров. Это связано с их низкой точностью в размере. Далее следует термическая обработка для упрочнения шаров. Для повышения производительности прокатки применяются многозаходные винтовые калибры. Средняя производительность шаропрокатных станов составляет 1... 6 шаров в секунду.

60. ПРОКАТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО КОЛЕЦ И КОЛЕС

Процесс прокатки в технологии изготовления железнодорожных колес и крупногабаритных колец занимает финишную стадию технологии. Исходная заготовка под прокатку изготавливается горячей штамповкой. Исходной заготовкой для штамповки служит крупногабаритный стальной цилиндр. С помощью прессы заготовка осаживается и после последующих операций горячей штамповки и прошивки формируется заготовка под прокатку. Для прокатки применяются специальные колесопрокатные станы. Прокатка формирует контурную часть колеса или обод, который является контактным элементом с рельсами или другими конструкциями (рис. 77).

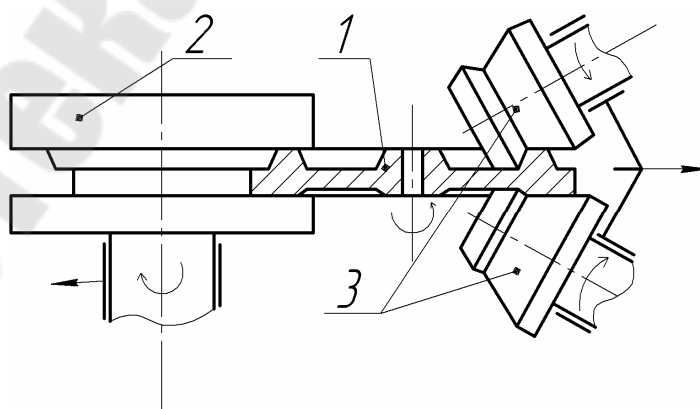


Рис. 77. Схема прокатки колеса:

- 1 – прокатное кольцо; 2 – коренные прокатные валки (первый – приводной (виден на схеме), второй – не приводной (не виден на схеме, расположен сзади по схеме));
- 3 – нажимные наклонные приводные валки

Верхний валок может регулироваться изменением угла к горизонту. Валки 2 перемещаются в радиальном направлении относительно колеса, радиус которого увеличивается по мере его раскатки.

Для создания деформации сечения колеса валки 2 перемещаются в радиальном направлении от оси заготовки.

Для этого используется автоматическая система позиционирования всех прокатных валков во время прокатки. Прокатка горячая. Ведется в три этапа: 1 этап – обжатие ободов наклонными валками, коренные валки только поддерживают заготовку; 2 этап – раскатка обода по диаметру, осуществляется также наклонными валками, коренные валки при этом поддерживают обод и отводятся от центра заготовки по мере вытяжки; 3 этап – калибровка и полировка поверхности обода при фиксировании положения всех валков.

Кольцепрокатные станы имеют аналогичную схему деформации. Основное различие: наличие дополнительного валка, расположенное внутри колеса и работающего в паре с коренными валками. Диаметр колес 850 – 1250 мм.; диаметр колец 100 – 3800 мм. В некоторых случаях раскатка колец проводится в холодном состоянии, для повышения точности профиля кольца.

61. СПОСОБЫ ПРОКАТКИ ШЕСТЕРЕН

Поперечная прокатка позволяет формировать зубья цилиндрических шестерен пластической деформацией. В отличие от шестерен, получаемых резанием, пластическая деформация обеспечивает структуру металла, оптимизированную к пониженному износу зубьев в период эксплуатации. Производительность прокатки выше производительности резания.

Недостатком прокатки шестерен является более низкая точность размеров зубьев. Поэтому поперечная прокатка позволяет получать готовые шестерни пониженной точности или шестерни заготовки, которые предназначены для дальнейшей механической обработки.

Диаметр получаемых шестерен до 600 мм.

Модуль шестерен 1,5–8 мм.

Прокатка горячая, осуществляется двумя способами:

- 1) с радиальной подачей валков (изменение расстояния между валками).
- 2) с осевой подачей заготовок при постоянном зазоре между валками.

Нагрев перед прокаткой индукционный и поверхностный, т.е. разогревается только область формирования зуба ($t = 1100\text{--}1200^\circ\text{C}$).

Диаметр исходной заготовки почти равен диаметру начальной окружности прокатываемой шестерни.

Формирование зуба обеспечивается вдавливанием зубчатого профиля валков в заготовку. Используются два способа прокатки шестерен.

- 1) Прокатка с радиальной подачей валков (рис. 78, 79).

Центрирующий приводной зажим заготовки согласован с приводом валков. Пластическая деформация заготовки осуществляется за счет сокращения расстояния между осями валков-шестерен.

Для повышения производительности прокатки шестерен используется вторая схема прокатки с осевой подачей заготовок (рис. 79).

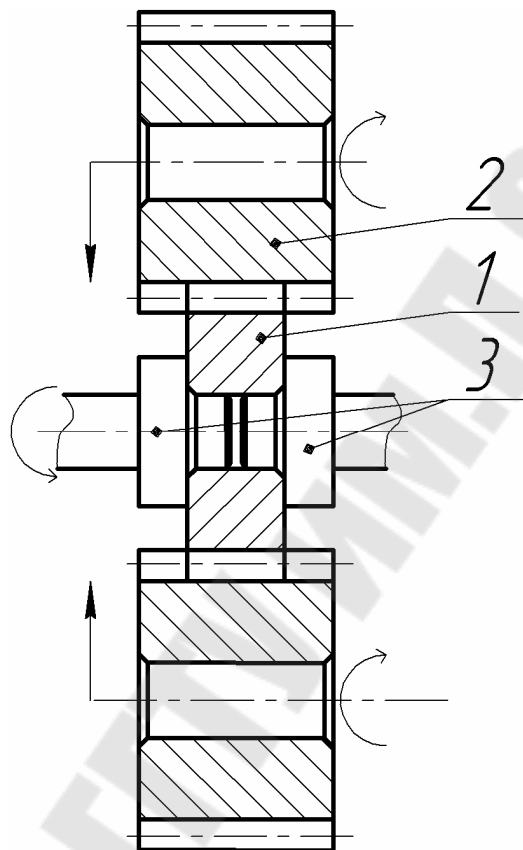


Рис. 78. Схема прокатки с радиальной подачей валков:
1 – заготовка; 2 – приводные прокатные валки со вставкой зубчатого профиля; 3 – центрирующий приводной зажим

2) Непрерывная прокатка шестерен (рис. 79).

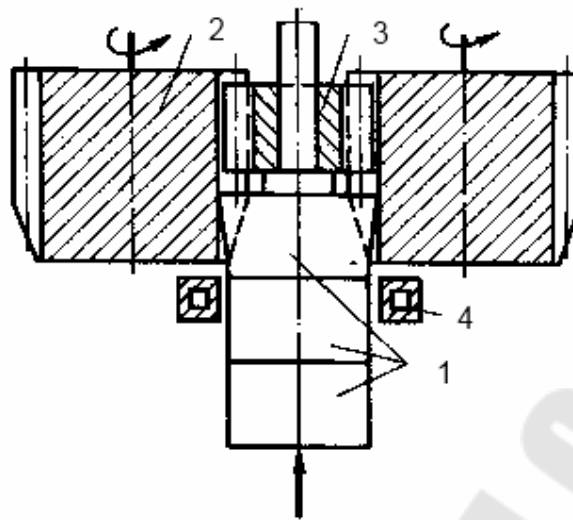


Рис. 79. Схема непрерывной прокатки шестерен:
 1 – заготовки; 2 – валки; 3 – делительная шестерня; 4 – индуктор

Схема представляет собой непрерывный процесс прокатки за счет постоянной подачи отдельных заготовок в очаг деформации.

Исходные заготовки в виде отдельных цилиндров, дисков или прутка подаются к валкам с торца.

Валки имеют входной конус со срезанными зубьями, что облегчает захват заготовки. На конусной части зубьев происходит основная деформация, а на цилиндрической части окончательная калибровка зуба.

В очаге деформации в начальный момент прокатки расположена делительная шестерня 3. Ее задача строго синхронизировать готовую шестерню и выводить ее из очага деформации.

Поперечная прокатка позволяет получить шестерни с прямым, полым, шевронным зубчатым профилем, возможна прокатка конических и многовенцовых шестерен. Получают таким способом валы – шестерни.

62. ПОПЕРЕЧНАЯ КЛИНОВАЯ ПРОКАТКА С ПЛОСКИМ ИНСТРУМЕНТОМ

Основное назначение поперечной клиновой прокатки связано с изготовлением ступенчатых валов, имеющих цилиндрические, конические и сферические участки. Принцип этой прокатки заключается в деформации заготовки в сужающемся зазоре между клинообразным инструментом. Инструмент может быть плоским или валковым. Рассмотрим этот вид прокатки с плоским инструментом (рис. 80).

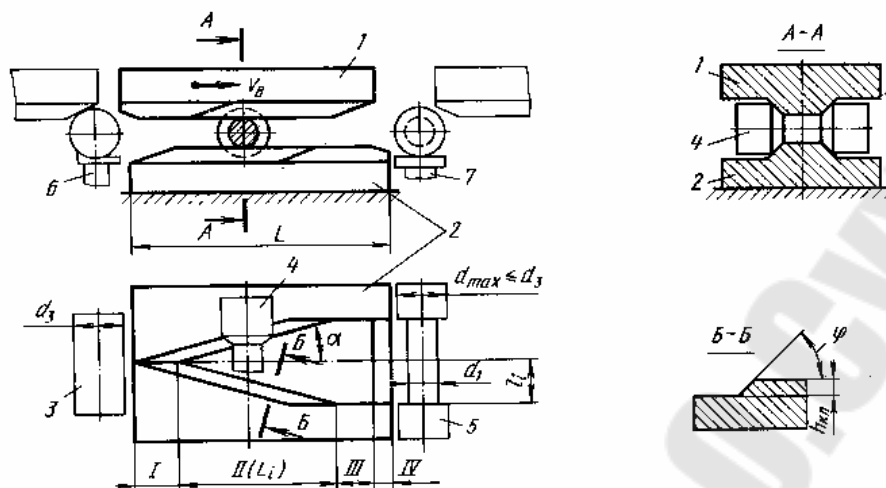


Рис. 80. Схема поперечной клиновой прокатки с подвижной и неподвижной частями инструмента:

- 1 – верхняя подвижная плита с клиновидным инструментом;
 2 – нижняя неподвижная плита с клиновидным инструментом с профилем симметричному верхнему клину; 3 – исходная заготовка на устройстве загрузки; 4 – заготовка в процессе деформации; 5 – готовый профиль после прокатки, отпускающий к устройству выгрузки;
 6 – устройство загрузки; 7 – устройство выгрузки

Заготовка попадает в зону деформации посредством захвата верхним клином. В процессе движения расстояние между верхними и нижними клиньями сужается, что обеспечивают деформацию заготовки. Профиль клиновидного инструмента обеспечивающие постепенное плавное приближение профиля заготовки к профилю готового изделия.

После прокатки максимальный диаметр изделия меньше или равен исходной заготовке. Длина получаемого профиля 150–600 мм, диаметр получаемого профиля 10–200 мм. Прокатка горячая, в редких случаях холодная. Процесс имеет свои стадии, которые связаны с характерными участками на поверхности клиновидного инструмента:

- 1) участок захвата – обеспечивает захват и разгон заготовки, имеется центральное внедрение клинов в заготовку;
- 2) основной деформирующий участок – обеспечивает основное формирование заготовки, характеризуется углами наклона клина и ее высотой. На этом участке возможна калибровка отдельных поверхностей заготовки.
- 3) калибрующий участок – имеет постоянное сечение инструмента по длине, обеспечивающее окончательное формирование размеров профиля;
- 4) выходной участок – имеет наклон рабочей поверхности в обратную сторону деформирующего клина, обеспечивающий плавный выход профиля из инструмента. Клиновой инструмент может обеспечивать разделение профиля в конце прокатки.

В зависимости от формы инструмента в поперечно клиновой прокатке используется прямой и обратный метод прокатки.

В прямом методе (рис. 80) боковые грани инструмента имеют наклон с наружной стороны. Поэтому очаг деформации формируется от середины заготовки к торцам.

Обратный метод (рис. 81) характеризуется выполнением наклона боковых граней с внутренних сторон клиньев. Поэтому очаг деформации формируется одновременно на нескольких участках заготовки, при этом очаг деформации постепенно сужается по ходу прокатки.

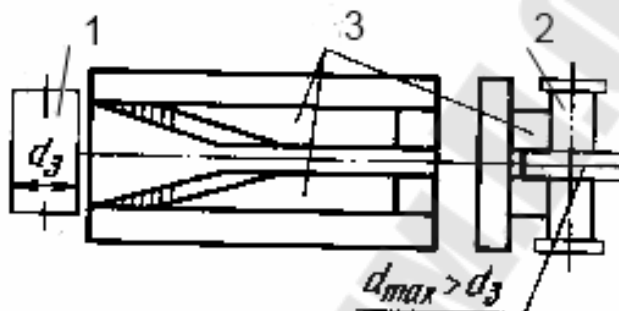


Рис. 81. Схема инструмента для обратного метода поперечной прокатки с плоским инструментом:

1 – заготовка; 2 – инструмент; 3 – деталь

При прямом методе прокатки $d_{max} < d_z$, при обратном наоборот $d_{max} > d_z$.

Недостатки этого вида прокатки: сложность геометрии инструмента; наличие обратного хода инструмента после каждого рабочего хода, снижающего производительность процесса.

63. ПОПЕРЕЧНО-КЛИНОВИДНАЯ ПРОКАТКА С ВАЛКОВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Для устранения основного недостатка поперечно-клиновой прокатки с плоским инструментом – наличие обратного хода после рабочего хода, используются схемы прокатки с валковым инструментом. Их принципиальные отличия заключаются в использовании клиновидного инструмента на поверхности валков (рис. 82) или валков – сегментов (рис. 83). Инструмент движется только в одну сторону, повышается производительность процесса, точность и чистота поверхности прокатки, появляется возможность формирования более резких переходов диаметра. Появляется возможность использования в качестве заготовок прутков или непрерывной заготовки. Недостаток: более высокая трудоемкость и сложность изготовления валковых клиновых поверхностей. Поэтому эти виды прокатки используют в массовом производстве или при отсутствии необходимости частой замены валков инструмента. Диаметр и длина получаемых изделий меньше по сравнению с прокаткой на плоском клиновом инструменте.

Для прокатки мелких деталей и для повышения производительности прокатки применяется валково – сегментная, поперечно – клиновая прокатка (рис. 83).

Производительность валковых и валково – сегментных поперечно – клиновых станов 100-3000 изделий в час. Это целесообразная производительность прокатки, связанная со сложностью инструмента. Прокатка горячая, для некоторых цветных металлов – холодная.

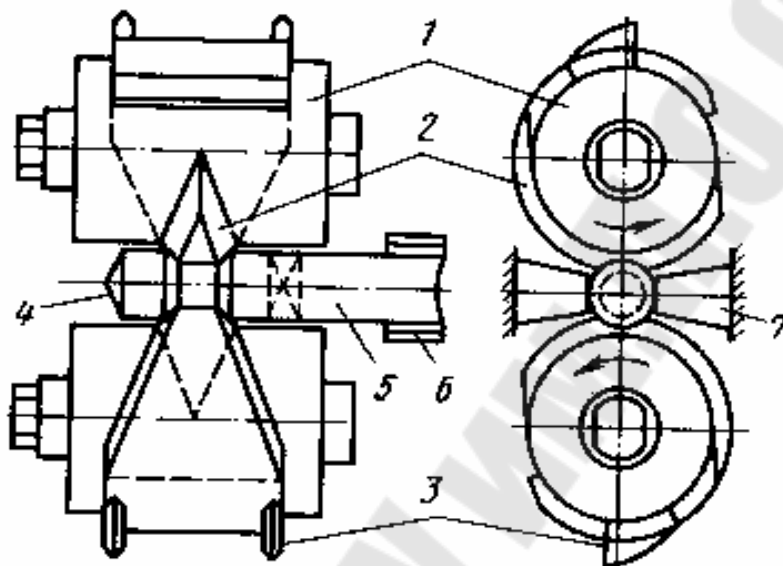


Рис. 82. Схема валковой поперечной клиновой прокатки:

1 – прокатные валки; 2 – валково – клиновидный инструмент; 3 – отрезные клинья; 5 – заготовка; 6 – устройство подачи заготовки; 7 – направляющие проводки, обеспечивают установку заготовки по центру очага деформации

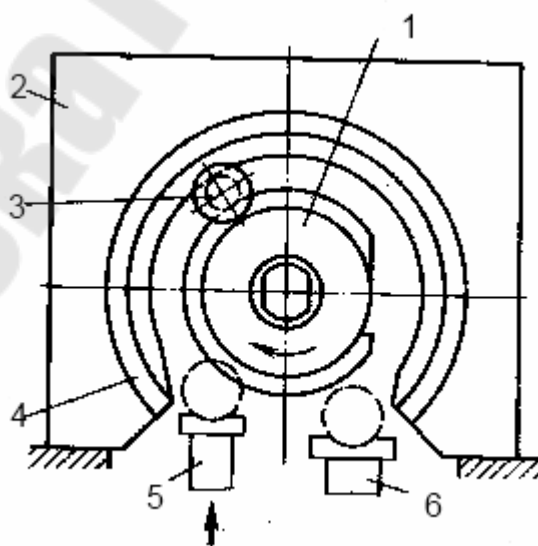


Рис. 83. Схема валково-сегментной прокатки:

1 – прокатный валок с деформирующим сегментным клиновым инструментом; 3 – прокатываемый профиль; 4 – неподвижный сегментный клиновидный инструмент; 5 – устройство подачи заготовки; 6 – устройство для выгрузки готового профиля

64. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ

Волочение – это процесс обработки металлов давлением, при котором обрабатываемая заготовка в виде длинномерного профиля постоянного размера деформируется протяжкой через сужающийся канал волоочильного инструмента (рис. 84).

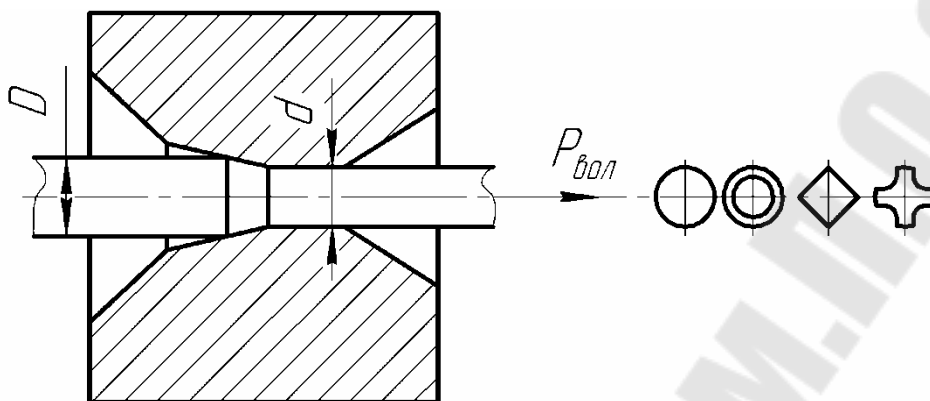


Рис. 84. Волочение проволоки через монолитную волоку:

1 – волоочильный инструмент; 2 – заготовка; 3 – готовый профиль

Волоочильным инструментом называют волоку или фильеру. На выходе из волоочильного инструмента получают профиль меньшего сечения, форма которого соответствует форме сечения и размерам канала волоочильного инструмента на выходе.

Таким образом, волочением называется способ ОМД, при котором обрабатываемый металл в виде заготовки постоянного поперечного сечения вводится в канал волоочильного инструмента (волоки) и протягивается (проволакивается) через него. Сечение канала плавно уменьшается от места ввода металла заготовки в инструмент к месту выхода из него. Форма поперечного сечения канала в самом узком участке одинакова или приближена к форме поперечного сечения протягиваемого металла. Выходное сечение канала всегда меньше поперечного сечения протягиваемого заготовки, поэтому заготовка, проходя через волоку, деформируется, поперечное сечение ее изменяется. Заготовка после выхода из волоки принимает форму и размеры наименьшего сечения канала.

Усилие, прилагаемое к готовому профилю и необходимое для его волочения, называется усилием волочения. Для создания усилия волочения применяют специальные тянущие устройства.

По конструкции волоки принято разделять на монолитные, роликовые, шариковые.

Главное отличие процесса волочения от прокатки заключается в схеме приложения деформирующего усилия. При прокатке усилие к металлу

приложено от приводного инструмента-валка, а при волочении – усилие к металлу приложено от тянущего устройства, а инструмент-волока не приводной.

Если основным условием осуществления прокатки является выполнение условия захвата полосы, то при волочении таким условием является выполнение неравенства:

$$1,3 < \frac{\sigma_s}{\sigma_v} < 2,8,$$

где σ_s – сопротивление пластической деформации металл готового профиля на выходе из волоки;

σ_v - напряжение волочения, равное:

$$\sigma_v = \frac{P_{вол}}{F_1},$$

где F_1 – площадь поперечного сечения готового профиля.

Обозначив $\frac{\sigma_s}{\sigma_v} = \gamma$ (где γ – коэффициент запаса волочения) получаем,

что для устойчивого и эффективного процесса волочения необходимо выполнение равенства $\gamma = 1,3 \dots 2,8$.

Это условие можно назвать условием отсутствия обрывности и эффективной загрузки процесса волочения. Если γ меньше 1,3, то возможно возникновение обрывности, если больше 2,8, то процесс волочения малоэффективен вследствие малой производительности.

65. НАЗНАЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ

Основное назначение процесса волочения – это получение длинномерных изделий постоянного сечения с высокой точностью размеров. Одним из таких металлических изделий (метизов) является проволока. Проволока составляет в настоящее время порядка 60% от общего количества выпускаемых метизов.

Проволока – это длинномерное изделие постоянного сечения, получаемое процессом волочения.

Изделия аналогичные проволоке можно получать нитевидной кристаллизацией расплава, процессом пластического растяжения, ковкой, прокаткой, раскаткой и др. Но самым эффективным является процесс волочения.

Размер получаемого профиля проволоки – от 0,005 мм до 17 мм. Заготовка – катанка, получаемая на проволочных прокатных станах, иногда мелкосортный прокат или непрерывнолитую заготовку. Проволоку сматывают обычно на катушки или в бунты (мотки).

Проволока находит самое широкое применение во всех отраслях промышленности, сельском хозяйстве и других сферах жизни и деятельности человека. Применяется она в как готовое изделие, так и полуфабриката для последующего производства целого ряда метизов. Проволоку изготавливают в широком ассортименте из самых различных черных и цветных металлов и сплавов, с разными механическими и физико-химическими свойствами, обладающими определенной пластичностью. Для каждого вида и размера проволоки требуется определенная технология изготовления и соответствующее оборудование.

Виды проволоки

Общего назначения. Для армирования железобетонных конструкций; для армирования предварительно-напряженных железобетонных конструкций; сварочная; наплавочная; канатная; металлокордная; спицевая; для гибких тяг централизации сигналов и стрелок; пружинная; для армирования резинотехнических изделий; струнная; для пружинных шайб; для производства тканых сеток; для воздушных линий связи электрические и телеграфные провода; для сердечников проводов; для проводов и кабелей; для бронирования проводов и кабелей; бандажная; для нагревательных элементов; элементов сопротивления; для упругих элементов; с заданным температурным коэффициентом линейного расширения; для записи гармонических сигналов.

Конструкционная разного назначения. Для изготовления заклепок и распорок сепараторов подшипников качения; для крепежных изделий-гвозди, шурупы, изготавливаемых методом холодного выдавливания и высадки; шпильковая; полиграфическая; игольная; гребнечесальная, обвязочный и упаковочный материал и пр.

Кроме проволоки, как основной продукции волочения, волочение используется для получения прутков или калиброванного металла и холоднодеформированных труб. В отличие от проволоки прутки не сматываются, а складываются в прямолинейном виде длиной до 5-6 м. Их диаметр 3-100 мм. Волочение для прутков обычно используют как калибровочную операцию. В производстве труб волочение также используется как калибровочная операция. Волочение позволяет получать трубки диаметром от 0,5 мм и больше.

Объемы метизной продукции имеют следующее доленое соотношение : проволока – 60%, калиброванный металл – 33%, остальное - крепежные изделия, гвозди и др. Метизы из черных металлов составляют 65 %.

Впервые следы проволоки, полученной волочением, обнаружены при раскопках в Египте. Дата находки около 3500 лет до н.э. Золотая, серебряная бронзовая проволока и провололочные изделия обнаружены при раскопках на Кавказе, Крыму, Урале (второе и первое тысячелетия до н. э.). Вначале усилие волочения создавалось вручную. Затем появилась волочильная скамья с деревянным воротом. Заготовкой служил кованый прут. В 13 и 14 веках н.э. появилось волочение железа. Появились волочильные устройства от

водяного привода (принцип водяной мельницы). С 1800 г. Первый волочильный стан с клещевым захватом. С 1838 г. многократное волочение.

В настоящее время процесс волочения металлов используется очень широко в соответствии с уровнем развития современных науки и техники. Развивается как теория, так и практика волочения. К основным разработчикам современного процесса волочения можно отнести следующих специалистов: Перлин, Красильщиков, Красильников, Коковихин, Горловский, Битков и другие.

66. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ПРОЦЕССОВ ВОЛОЧЕНИЯ

Классификация процессов волочения:

1) По назначению – для получения проволоки, для калибровки металлических прутков и труб;

2) По температуре волочения – холодное и горячее волочение (используется в основном холодное);

3) По кратности деформации при волочении – однократное и многократное волочение (многократное волочение состоит в одновременной протяжке заготовки через несколько волок).

4) По конструкции волоки: волочение в монолитных волоках с твердосплавной вставкой; волочение в монолитных волоках с алмазной вставкой; волочение в сдвоенных волоках; волочение в напорных волоках; волочение в роликовых волоках; волочение в сборных волоках; волочение в трубных волоках: волоках без оправки, волоках с движущейся оправкой, волоках с неподвижной оправкой, волоках с самоустанавливающейся оправкой, в шариковых волоках.

5) По виду используемого оборудования – волочение на однократных станах, волочение на многократных станах: магазинного типа, прямоточных, петлевых, на станах со скольжением проволоки по тяговому барабану, прутковых волочильных станах, волочение на трубных станах.

67. МОНОЛИТНАЯ ВОЛОКА

Монолитной называют волоку конструкция, которой состоит только из одной детали. Это самый распространенный вид волок, используемый в производстве проволоки и прутков.

Рассмотрим схему этой волоки (рис. 85):

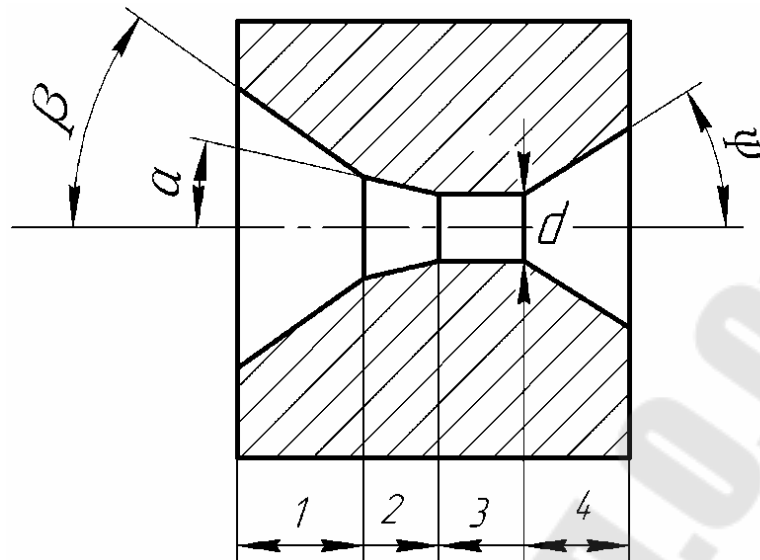


Рис. 85. Схема монолитной волоки

В направлении движения обрабатываемого металла канал волоки делится на следующие четыре зоны:

1. – Входная зона, служит для подачи проволочной заготовки в волоку, обеспечивает подачу смазки. Устраняет возможность образования задиров на поверхности заготовок об острые края волок. Форма поверхности зоны может быть коническая, радиальной, двуконической, комбинированной (радиально – конической), образующей угол $2\beta = 40..60^\circ$

2. – Рабочая (деформирующая) зона. Обеспечивает деформацию сечения заготовки, характеризуется углом α , изменяется в диапазоне от 4 до 12 град. Эта зона также обеспечивает захват смазки в начале деформации проволоки. Существует несколько разновидностей форм рабочей зоны волоки (рис. 86–88).

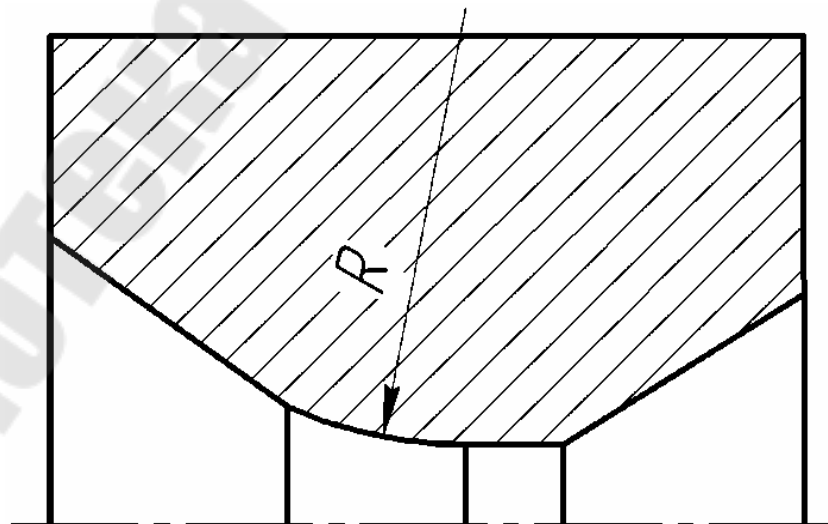


Рис. 86. Волока с радиальной формой рабочей зоной

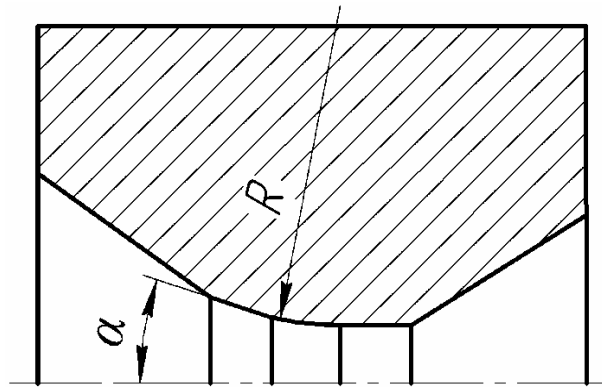


Рис. 87. Волока с радиально-конической формой образующей рабочей зоной

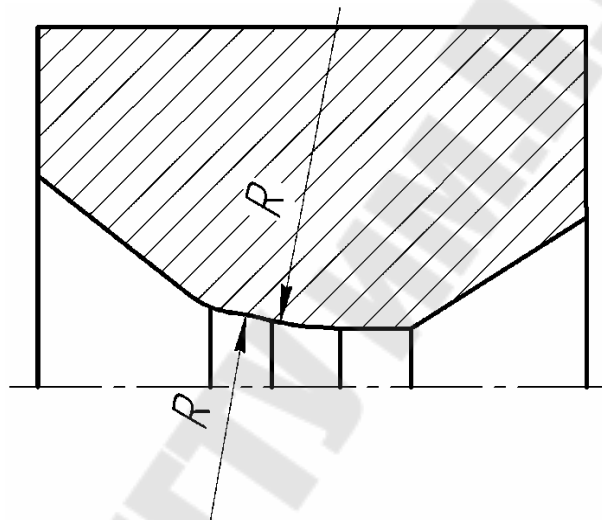


Рис. 88. Волока с сигмаидальной формой образующей рабочей зоной

3. – Калибрующая зона имеет цилиндрическую форму и обеспечивает получение требуемой точности, размеров и формы получаемого профиля. Повышает прочность и износостойкость рабочей зоны волокна, смещает рабочую зону волокна в центр волокна, повышая ее прочность, уменьшает износ выходного сечения. Для пластичных металлов длина калибрующей зоны составляет $l_k=0,3..0,4d_k$, для менее пластичных – $l_k=0,4..1d_k$.

4-Выходная зона, служит для устранения возможности образования задира на поверхности обрабатываемого металла о края калибрующего пояска. Повышает стойкость выходной плоскости волокна от выкрашивания, смещает очаг деформации волокна ближе к середине волокна, что повышает стойкость волокна. Форма зоны может быть коническая, радиальная, комбинированная (радиально – коническая). Характеризуется углом γ , изменяющимся в диапазоне от 30 до 45 градусов.

Материал волокна – вольфрам-кобальтовый твердый сплав. Твердый сплав, применяемый для изготовления волок, содержит 3—15 мас. % кобальта, остальное карбид вольфрама. Размер частиц карбида вольфрама колеблется в диапазоне 0,8—2 мкм.

Композиция WC—Co наилучшим образом обеспечивает выполнение предъявляемых к волокнам основных требований: высокая твердость (сопротивление износу), высокая прочность и ударная вязкость (сопротивление разрушению), достаточная удельная теплопроводность (отвод тепла из очага деформации). Такие уникальные свойства достигаются благодаря фазе карбида вольфрама (WC) и способности сохранять их при соединении с кобальтом, выполняющего роль связующего компонента. Свойства сплава WC—Co зависят от величины содержания кобальта и средним, размером зерен карбида вольфрама. Эти факторы определяют толщину слоя кобальта между смежными зернами карбида вольфрама и, следовательно, долю мягкой пластичной составляющей.

68. РОЛИКОВАЯ ВОЛОКА

В роликовой волоке (рис. 89) усилие волочения прикладывается к изделию на выходе из роликов. Трение в зоне деформации роликовой волоки изменено: в роликовых волоках контактное трение соответствует трению качения, а в монолитном трению скольжения. Роликовая волока может иметь специальный профиль, нанесенный на калибр. С помощью таких калибров получают холодно упрочнённую арматурную проволоку.

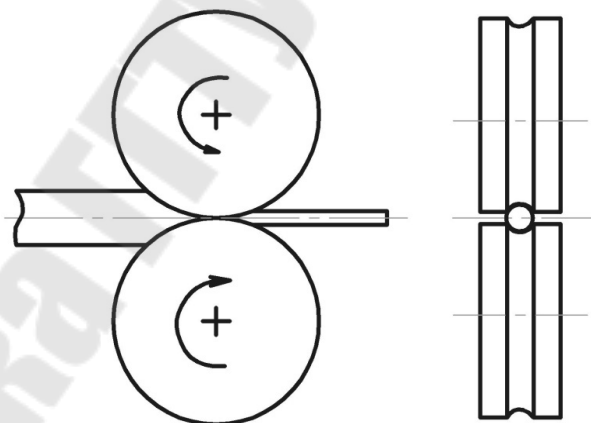


Рис. 89. Схема роликовой волоки (ролик, проволочная заготовка, готовый профиль)

Основные преимущества роликовой волоки по сравнению с монолитной: уменьшенное значение коэффициента трения в зоне деформации, замена трения скольжения на трение качения, возможность получения на поверхности профиля рельефной поверхности, передаваемой от рельефной поверхности калибра волоки; возможность регулировки расстояния между роликами и соответственно зоны деформации.

Недостатки: Сложная в исполнении конструкция; неполный охват инструментом зоны деформации в поперечном сечении.

Основное применение: для получения холоднодеформированной арматурной стали, для получения тонкой ленты способом «плющения проволоки».

69. СДВОЕННЫЕ И НАПОРНЫЕ ВОЛОКИ

Монолитные сдвоенные волокни (рис. 90).

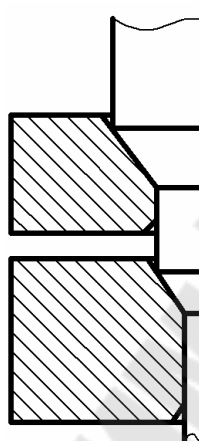


Рис. 90. Схема волочения в сдвоенных волокнах

Преимущества: снижение деформации в волоке (дробление деформации), снижение температуры проволоки при волочении.

Сдвоенные волокни применяются преимущественно при высокоскоростном волочении для снижения температуры волочения проволоки и возможности увеличения скорости волочения.

Принцип волочения прутков или калибруемого металла заключается в однократном волочении. Используются для этого обычные волокни, а так же сдвоенные волокни, представляющие собой несколько (до четырех) последовательно установленных волок в одной обойме. Это позволяет повышать плотность смазочного слоя, создавать противонапряжение между волокнами, повышать теплоперенос от этих волок, в целом повышает эффективность волочения.

Напорная волока (рис. 91)

Напорные волокни используются для обеспечения подачи смазки с избыточным давлением. Это позволяет повысить толщину слоя смазки и снизить усилие волочения.

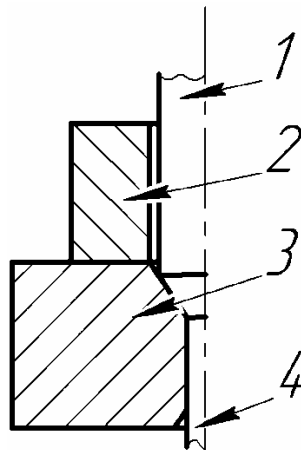


Рис. 91. Схема напорной волоки:

1 – проволоочная заготовка; 2 – напорный элемент; 3 – волока;
4 – готовый профиль

70. ТРУБНЫЕ ВОЛОКИ

Трубные волокни используются для калибровки холоднокатанных труб. Волокни для волочения труб разделяют по способам волочения:

а) Безоправочное волочение (рис. 92) труб используется для калибровки труб малого диаметра с дальнейшей намоткой в мотки. Данный способ позволяет обеспечить высокую точность наружного диаметра трубы.

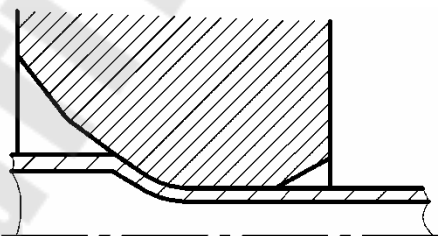


Рис. 92. Схема безоправочного волочения трубы

б) Волочение труб на закрепленной оправке (рис. 93) применяется при волочении коротких труб для повышения точности размеров сечения трубы (толщины стенки).

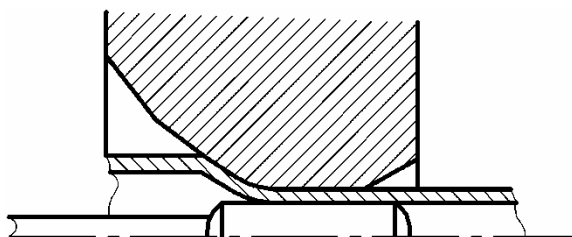


Рис. 93. Схема волочения на закрепленной оправке

в) Волочение труб на подвижной оправке (рис. 94) используется для повышения точности сечения и повышения прямолинейности готовой трубы

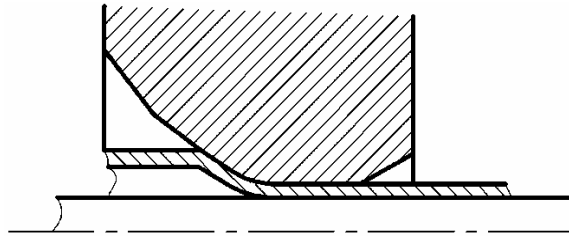


Рис. 94. Схема волочения трубы на подвижной оправке

г) Волочение труб на самоустанавливающейся оправке (рис. 95) используется для калибровки труб и обеспечения точных размеров сечения длинномерных труб с последующей намоткой в мотки. Угол образующей профиля оправки подбирается так, чтобы силы втягивающие оправку равнялись силе выталкивающей оправку. При этом условии оправка самоустанавливается и образуется очаг деформации с каналом волоки.

Удержание оправки в зоне деформации также обеспечивается незначительным преобладанием сил выталкивающих оправку из зоны деформации над силами втягивающими ее в эту зону.

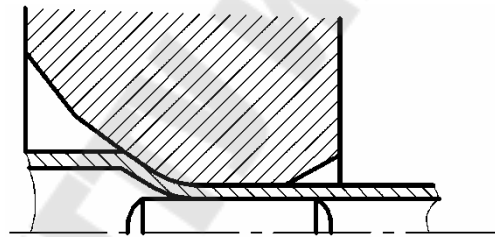


Рис. 95. Схема волочения трубы на самоустанавливающейся оправке

д) Шариковые волоки (рис. 96) используют для получения тонкостенных труб больших диаметров. При волочении сепаратор удерживают шарики, вращающиеся с помощью специального механизма. Шарики обкатывают трубную заготовку, деформируя его стенку.

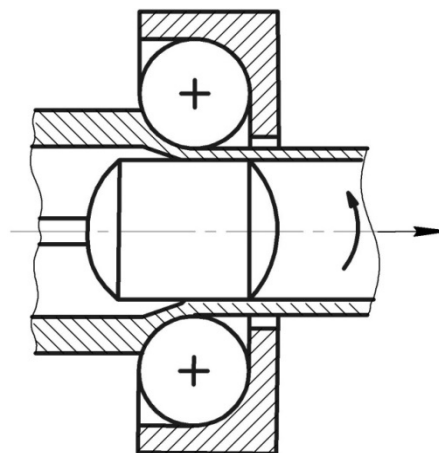


Рис. 96. Схема волочения трубы в шариковой волоке

71. ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ.

Рассмотрим схему деформации проволоки в процессе волочения для самой распространенной конической монолитной волоки (рис. 97).

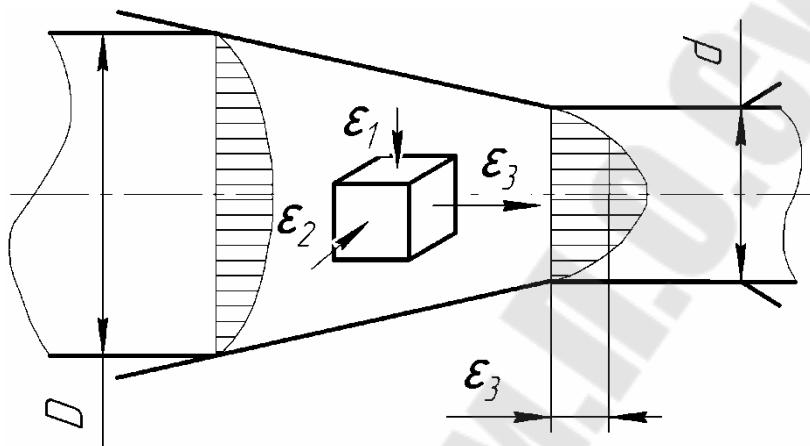


Рис. 97. Деформированное состояние проволоки в очаге деформации

При волочении преобладающей деформацией является деформация осевого растяжения ε_3 , которая направлена вдоль оси проволоки. Действие сжимающих деформаций ε_2 и ε_1 направлено вдоль двух радиусов сечения заготовки. Согласно закону постоянства объемов пластически деформируемого тела растягивающая деформация равна:

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_2 + \varepsilon_1 = 2\varepsilon_2 = 2\varepsilon_1.$$

Таким образом, деформация ε_3 в два раза превышает одну радиальную деформацию проволоки.

Радиальные деформации ε_2 , ε_1 в проволоке максимальны в поверхностных областях проволоки и минимальны в центральных областях проволоки. Это связано с сжимающим действием канала волоки. Поэтому ε_3 на поверхности проволоки меньше, чем в центре. Максимальная деформация растяжения расположена в центре, а минимальная на поверхности контакта проволоки с волокой. В расчетах часто принимают усредненные по сечению значения ε_3 , ε_2 , ε_1 .

Наличие контактного трения в очаге деформации приводит к усилению неравномерности распределения деформаций. Повышение контактного трения способствует повышению неравномерности деформаций в проволоке, быстрому износу канала волоки.

Для расчета деформации проволоки при волочении используют следующие параметры: вытяжка, истинная деформация, относительное обжатие. В теории и практике волочения используют все три показателя, но

наиболее точным является истинная деформация, а наиболее практичным – вытяжка.

72. ДЕФОРМАЦИОННЫЕ И КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВОЛОЧЕНИЯ

Процесс волочения принято характеризовать следующими основными деформационными показателями:

а) вытяжка;

$$\mu = D^2 / d^2, \mu = 1,01..1,2;$$

б) где D-диаметр заготовки на входе в волоку, d-диаметр на выходе из волоки;

с) интегральная деформация (истинная вытяжка);

$$\varepsilon = i = \ln \cdot \mu;$$

д) относительное обжатие;

$$\delta = (D^2 - d^2) / D^2 \cdot 100\%, \delta = 1..20\%;$$

е) относительное удлинение.

$$\lambda = d^2 / D^2 - 1.$$

По своему существу все эти показатели в различных математических выражениях характеризуют главную деформацию – удлинение осевого слоя, которая в процессе волочения является максимальной по отношению к поперечным и поэтому достаточно полно отражает деформационную сторону процесса.

Между параметрами μ, δ, i , имеется связь:

Показатель		Показатель, выраженный через					
Название	Обозначение	F_n и F_k	L_n и L_k	μ	i	δ	λ
Вытяжка	μ	$\frac{F_n}{F_k}$	$\frac{L_n}{L_k}$	-	$\exp i$	$\frac{1}{1-\delta}$	$1+\lambda$
Интегральная деформация удлинения	ε	$\ln \frac{F_n}{F_k}$	$\ln \frac{L_n}{L_k}$	$\ln \mu$	-	$\ln \frac{1}{1-\delta}$	$\ln(1+\lambda)$
Относительное обжатие	δ	$\frac{F_n - F_k}{F_n}$	$\frac{L_n - L_k}{L_n}$	$\frac{\mu - 1}{\mu}$	-	-	$\frac{\lambda}{\lambda + 1}$
Относительное удлинение	λ			$\mu - 1$	-	$\frac{\delta}{1-\delta}$	-

На практике чаще используют μ либо δ . При необходимости имеется возможность прямого и обратного пересчета этих параметров. Кинематические параметры волочения связаны со скоростным режимом волочения. Скоростной режим связан с деформацией, потому если известны деформационные параметры, то скорости волочения рассчитываются по формуле:

$$\vartheta_i = \mu_i \cdot \vartheta_{i-1},$$

где i – номер перехода волочения.

Кинематические режимы волочения относят также характеристики тянущего элемента, т. е. барабана или шкивов. Если между обработанной заготовкой и тянущим шкивом (барабаном) существует жесткая связь, то минимальная скорость вращения (движения) тянущего инструмента равна скорости проволоки на выходе из волюки. Если между тянущим инструментом и проволокой нет жесткой связи, то скорость тянущего инструмента выше, чем скорость проволоки, в этом случае усилие волочения создается силами трения между проволокой и барабаном. При многократном волочении действует закон постоянства секундных объемов:

$$V_i \cdot F_i = const$$

73. НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ

Рассмотрим схему очага деформации при волочении с точки зрения напряженного состояния (рис. 98).

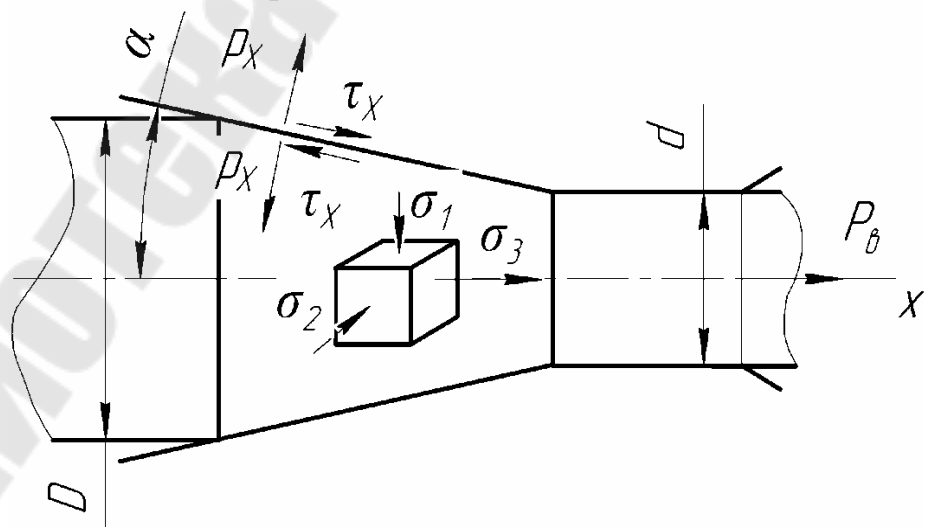


Рис. 98. Схема напряженного состояния при волочении

В результате действия силы волочения P_θ проволочная заготовка, движется через сужающийся канал. Деформируясь, проволока оказывает

усилие на поверхность рабочей зоны волокна. В результате возникают сжимающие нормальные контактные напряжения p_x , а от действия контактных сил трения возникают контактные касательные напряжения τ_x . От суммарного действия усилия волочения P_v и сжимающего усилия от напряжения p_x в очаге деформации возникает напряженное состояние. Это напряженное состояние соответствует объемному напряженному состоянию с одним главным растягивающим напряжением σ_3 и двумя главными и равными сжимающими напряжениями σ_1 и σ_2 . Напряжения σ_1 и σ_3 распределены в объеме проволоки неравномерно. Неравномерность вызвана наличием касательных контактных напряжений τ_x , а также действием проекций напряжением p_x и τ_x . Для напряжения p_x максимальная проекция направлена в радиальном направлении проволоки, а минимальная проекция в осевом направлении, которая вызывает осевые растягивающие напряжения. Для τ_x наоборот, максимальная проекция осевая, а радиальная – минимальна. Поэтому τ_x преимущественно оказывают влияние на осевые напряжения, но также незначительно влияют на радиальные напряжения.

Для анализа напряженного состояния очага деформации при волочении целесообразно использовать полярную систему координат, так как напряженное состояние объема проволоки обладает симметрией вокруг оси проволоки. Такой вид напряженного состояния называется осесимметричным. Использование полярных координат и осесимметричного напряженного состояния очага деформации позволяет уменьшить количество дифференциальных уравнений и неизвестных в них.

Рассмотрим распределение осевых напряжений (рис. 99):

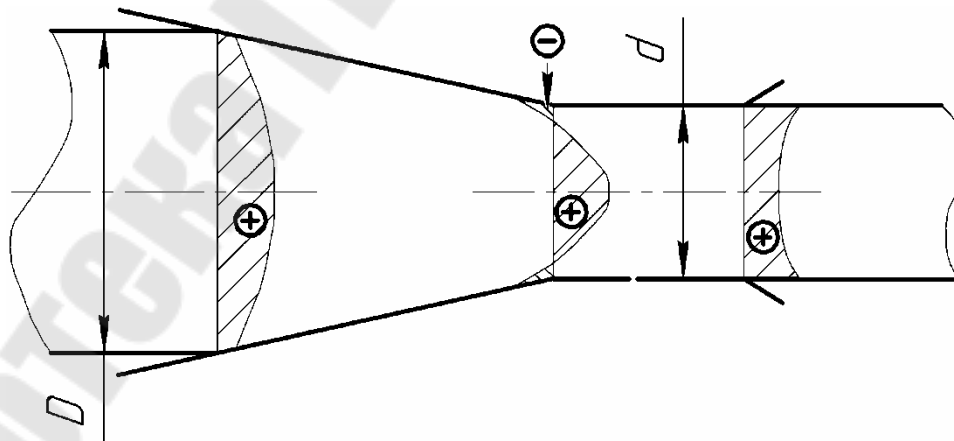


Рис. 99. Распределение напряжений σ_3

На входе в очаг деформации контактные силы трения сдерживают пластическую деформацию в приконтактных областях. Усилие волочения продвигает проволоку и вызывает растягивающие осевые напряжения.

По мере продвижения в через сужающийся канал волокна интенсивность напряжений τ_x и p_x возрастает. В результате из взаимодействия в приконтактных областях возникает сжимающие осевые

напряжения. А в центре проволоки максимально увеличивается растягивающие напряжения.

По мере продвижения через калибрующую зону силы контактного трения продолжают увеличиваться. На выходе из волоки растягивающие осевые напряжения приконтактных зон намного превышают напряжения центральных зон. Напряжение σ_3 создает основное сопротивление продвижению проволоки через канал волоки.

Рассмотрим распределение радиальных главных напряжений (рис. 100).

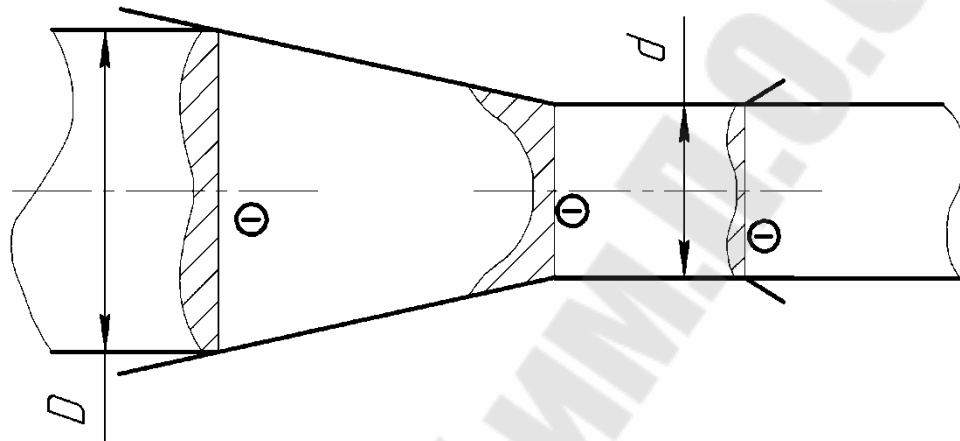


Рис. 100. Распределение напряжений σ_1

Неравномерность напряжения σ_1 вызвана сопротивлением пластической деформации от поверхности рабочей зоны.

74. НАПРЯЖЕНИЕ И СИЛА ВОЛОЧЕНИЯ

Выражение для напряжения волочения можно получить из зависимости для осевых напряжений в очаге деформации:

$$\sigma_x = \frac{\sigma_T \cdot (1 + a)}{a} \left[1 - \left(\frac{D_x}{D} \right)^{2a} \right] + \sigma_0 \cdot \left(\frac{D_x}{D} \right)^{2a}, \quad (68)$$

$$a = \frac{f}{\operatorname{tg}(\alpha)},$$

где f - коэффициент контактного трения;

α - полуугол конической зоны волоки.

σ_T - предел текучести металла проволоки;

D - диаметр проволоки на входе в волоку;

σ_0 - напряжение противонапряжения проволоки;

D_x - текущий диаметр проволоки в очаге деформации.

Для получения выражения для напряжения волочения в зависимость (68) необходимо подставить величину переменного диаметра равную диаметру заготовки на выходе из волоки. В этом случае осевое напряжение будет соответствовать уровню продольных напряжений на выходе из конической зоны волоки. Для получения полного напряжения волочения необходимо дополнительно учесть

Для определения напряжения волочения $\sigma_{вол}$ в формулу (68) следует подставить $D_x = d$ и дополнить ее прибавлением величины дополнительного напряжения $\Delta\sigma_{вол}$, вызываемого цилиндрическим калибрующим пояском. Получим формулу Губкина для напряжения волочения:

$$\sigma_{вол} = \frac{\sigma_T \cdot (1+a)}{a} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^{2a} \right] + \sigma_0 \cdot \left(\frac{d}{D} \right)^{2a} + \Delta\sigma_{вол} \quad (69)$$

где d – диаметр проволоки на выходе из волоки.

Основной недостаток формулы (69) заключается в том, что она не учитывает изменение величины σ_T по длине очага деформации.

Для устранения этого недостатка используют формулу Коковихина:

$$\sigma_{вол} = \sigma_{sk} - \frac{(m - \sigma_{so})(\mu^a - 1)}{\alpha\mu^a} - \frac{\sigma_{so} - \sigma_0}{\mu^a} + \Delta\sigma_{вол}, \quad (70)$$

$$m = \frac{\sigma_{sk} - \sigma_{so}}{\mu - 1},$$

$$\mu = \left(\frac{D}{d} \right)^2,$$

где m – модуль упрочнения основного металла;

f – коэффициент контактного трения;

α – полуугол волоки;

μ – коэффициент вытяжки;

σ_{so} – сопротивление пластической деформации металла перед волочением;

σ_{sk} – сопротивление пластической деформации металла после волочения;

Если в уравнении (68) вместо полуугла рабочей зоны α принять приведенное его значение α' , то получим уравнение Перлина для напряжения волочения:

$$\sigma_{вол} = \sigma_T \cdot (1+b) \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^{2b} \right] + \sigma_0 \cdot \left(\frac{d}{D} \right)^{2b}, \quad (71)$$

$$b = \frac{tg(\alpha')}{f}, \quad tg(\alpha') = \frac{(D-d)tg(\alpha)}{D-d-2l_k tg(\alpha)},$$

где l_k – длина калибрующей зоны волокна.

Существует ряд эмпирических формул для расчета напряжения волочения. Ф. Кербер и А. Эйхингер вывели следующую эмпирическую зависимость для напряжения волочения:

$$\sigma_{вол} = \sigma_s \left[\ln \frac{F_0}{F_1} \left(1 + \frac{f}{\alpha} \right) + 0,77\alpha \right], \quad (72)$$

где F_1 – площадь поперечного сечения металла после волочения;
 F_0 – площадь поперечного сечения металла до волочения.

Аналогичную зависимость предложил Э. Зибель:

$$\sigma_{вол} = \sigma_s \left[\frac{\ln F_0}{F_1} \left(1 + \frac{f}{\alpha} \right) + \frac{2}{3}\alpha \right]. \quad (73)$$

Сила волочения определяется по формуле:

$$P_{вол} = \sigma_{вол} \cdot F_1. \quad (74)$$

Р. Б. Красильщиков показал, что для сухого волочения стальной углеродистой проволоки можно использовать формулу усилия прокатки:

$$P_{вол} = 0,6 \cdot D^2 \sqrt{\sigma_b \cdot \delta}, \quad (75)$$

где $P_{вол}$ – сила волочения;

δ – частное обжатие;

σ_b – предел прочности проволоки после волочения.

Силу волочения можно найти исходя из мощности, потребляемой волочильным станом, кВт:

$$P_{вол} = \frac{N_{вол}}{V_{вол}} \eta, \quad (76)$$

где $N_{вол}$ – мощность, расходуемая на волочение, кВт;

$\eta = 0,87-0,95$ – КПД привода волочильного стана;

$V_{вол}$ – скорость волочения, м/с.

Несмотря на принятые допущения теоретические расчеты по уравнениям (69) и (70) дают удовлетворительное совпадение расчетных и опытных данных за счет усреднения вносимых в расчет величин.

Предпочтительно применение уравнения (70), имеющего лучшую сходимость с экспериментальными данными при волочении стальной проволоки различных типоразмеров в широком диапазоне химического состава.

Уравнения для определения силы и напряжения волочения наглядно отражают влияние основных технологических факторов (угла рабочей зоны волоки, единичного обжатия, коэффициента трения, противонапряжения, сопротивления металла деформации) на силовые условия процесса.

75. МОЩНОСТЬ ПРИВОДА ВОЛОЧИЛЬНОГО СТАНА

Для осуществления волочения проволоки необходимо, чтобы мощность привода тянущего устройства превышала мощность волочения. Суммарная мощность волочения расходуется на деформацию самой проволоки в волоке, для преодоления трения между проволокой и тянущим устройством (барабаном), для изгиба проволоки вокруг барабана и для преодоления динамических и статических нагрузок в кинематике привода.

Расчет основных зависимостей для компонент мощности:

1. мощность деформации проволоки в волоке

$$N_{деф} = P \cdot V.$$

2. мощность трения между проволокой и шайбой (только для станов со скольжением)

$$N_{тр} = (P) \cdot (B - V).$$

3. мощность изгиба проволоки по поверхности барабана:

$$N_{изг} = \frac{2 \cdot \sigma_{sk} \cdot W}{R} \cdot V;$$

где σ_{sk} – сопротивление пластической деформации проволоки огибающей барабан;

W – момент сопротивления пластическому изгибу (для круглой проволоки $W = 1,7(\pi \cdot d^3/32)$).

Мощность N_k , затрачиваемая на преодоление нагрузок кинематики волочильного стана, обычно принимают 10-15% $N_{вол}$. Тогда окончательно требуемая мощность двигателя привода:

$$N_{дв} = \frac{N_{деф} + N_{тр} + N_{изг} + N_k}{\eta},$$

где η – КПД привода тягового барабана ($\eta=0,85-0,95$).

76. МНОГОКРАТНОЕ ВОЛОЧЕНИЕ ПРОВОЛОКИ С НАКОПЛЕНИЕМ ВИТКОВ ПРОВОЛОКИ

Для реализации непрерывной протяжки проволоки через несколько волокон необходимо использовать определенные технологические приемы для согласования скоростей проволоки каждой волюки. В зависимости от принципа этого согласования различают несколько видов многократного волочения.

1) с накоплением витков проволоки на тяговых барабанах, по этому принципу работы волочильные станы многократного волочения магазинного типа. (Определение «магазин» связано с накоплением проволоки).

2) волочение с автоматической регулировкой скоростей проволоки для каждой проволоки непрерывного волочения, по этому принципу работы волочильные станы многократного волочения, петлевого и прямоточного типа.

3) волочение проволоки со скольжением витков проволоки по поверхности тяговых барабанов. По этому принципу работы волочильные станы многократного волочения со скольжением.

Рассмотрим схему волочильного стана магазинного типа (рис. 101).

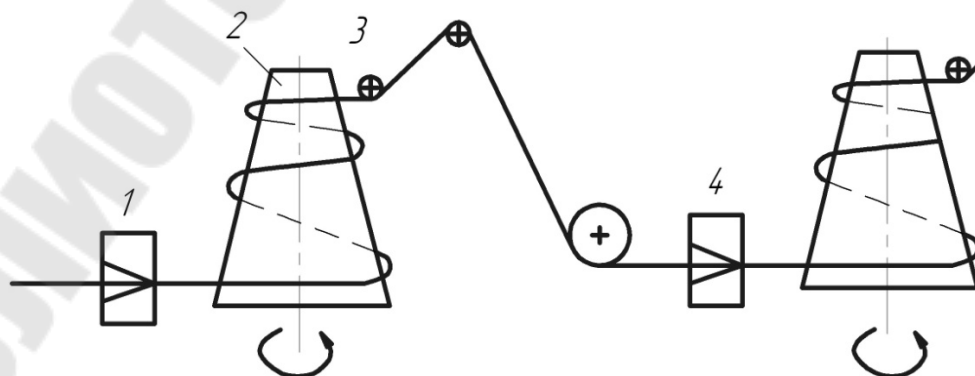


Рис. 101. Волочильный стан магазинного типа

Скоростной режим волочения назначается так, что на каждый тяговый барабан поступает на 3-6% больше проволоки, чем понадобится на следующий барабан. В результате на каждом тяговом барабане обеспечивается запас (магазин) проволоки. В результате отпадает необходимость соблюдения закона постоянства секундных объемов при непрерывной и многократной пластичной деформации проволоки. Каждый тяговый барабан имеет свой индивидуальный привод. Скорость вращения каждого барабана постепенно увеличивается. Это необходимо для повышения скорости волочения. Между числом оборотов каждого барабана имеется четкая зависимость. Так, для волочильных станов ОАО БМЗ это соотношение равно 1,2-1,26 и называется средним передаточным отношением между блоками магазинного волочильного стана. Обозначается μ_{cp} .

Для обеспечения накопления проволоки используют следующую формулу:

$$n = \frac{\ln(D^2 / d^2)}{\ln(\mu_{cp} \cdot k)},$$

где n – количество проволоки, установленной в волочильном стане;

D – диаметр проволоки на входе в волочильный стан;

d – диаметр проволоки на выходе из волочильного стана;

k – коэффициент накопления проволоки на тяговом барабане, равный 1,03...1,06.

Если имеется определенная проволочная заготовка D и диаметр конечной проволоки d , то можно определить требуемое n при известном μ_{cp} . Если же имеется определенный волочильный стан с заданной n и μ_{cp} , то можно определить D и d , который можно использовать и получать на данном волочильном стане.

В связи с постоянным накоплением витков проволоки, периодически возникает необходимость использования накопившегося запаса проволоки. Для этого применяют периодическую остановку тяговых барабанов, позволяющих использовать запасы проволоки на тяговых барабанах.

На ОАО БМЗ волочильные станы магазинного типа применяются в СтПЦ-3.

Основные недостатки этих волочильных станов – низкая производительность, невозможность волочения тонкой проволоки.

Преимущества – возможность несоблюдения закона постоянства секундных объемов.

Количество волок в станах от 2-6. При волочении цветной проволоки до 12.

77. МНОГОКРАТНОЕ ВОЛОЧЕНИЕ ПРОВОЛОКИ С АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКОЙ СКОРОСТИ ВОЛОЧЕНИЯ

В петлевом волочильном стане имеется натяжной подпружиненный ролик 3 (рис. 102). Величина натяжения ролика зависит от длины петли проволоки на нем. Величина натяжения ролика по средствам автоматического привода изменяет скорость тяговых барабанов 2. В результате контроля натяжения автоматически регулируется скорость волочения на каждой волоке 1, 4. Таким образом, длина петли остается постоянной для каждого барабана. Количество витков проволоки на каждом тяговом барабане больше 20. Это существенно повышает силу трения – скольжения и обеспечивает отсутствие проскальзывания проволоки по барабану.

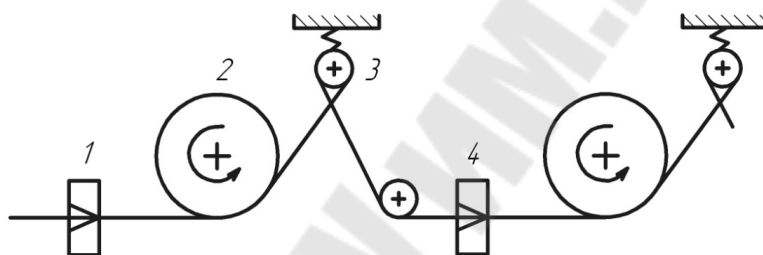


Рис. 102. Схема волочильного стана петлевого типа

Недостатки петлевого стана – образование петли, что не позволяет волочить проволоку больших диаметров. Невозможность волочения и тонкой проволоки, так как натяжение в петле значительное. Таким образом, петлевой стан используют для проволоки средних размеров.

Для частичного исключения приведенного недостатка используют прямоточные волочильные станы. У них отсутствует петлеобразование, а натяжение контролируется рычажным механизмом. Прямоточные волочильные станы используют для проволоки больших и средних диаметров, для тонких не используют по той же причине, что и для петлевых станом. На ОАО БМЗ петлевые станы используются для среднего волочения, прямоточные – для грубого и среднего.

78. МНОГОКРАТНОЕ ВОЛОЧЕНИЕ ПРОВОЛОКИ НА ВОЛОЧИЛЬНЫХ СТАНАХ СО СКОЛЬЖЕНИЕМ

Схема волочения со скольжением условно приведена на рис. 103.

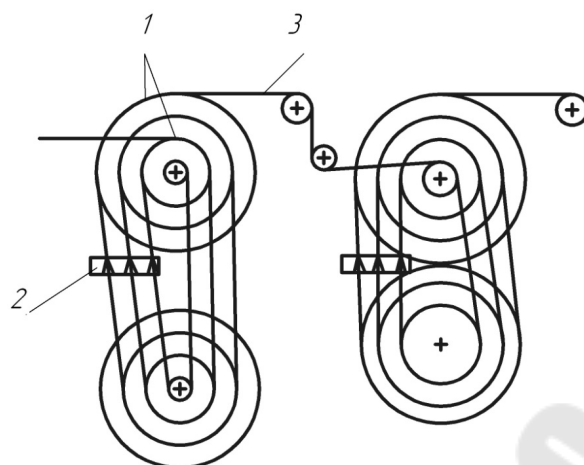


Рис. 103. Схема волочения со скольжением:
 1 – тяговые шайбы, расположенные в конусном порядке;
 2 – волокна; 3 – проволока

Принцип волочения со скольжением построен на условии $V > V$ (V – линейная скорость на поверхности тяговой шайбы, V – линейная скорость движения проволоки по поверхности тяговой шайбы). Количество витков проволоки на тяговых шайбах составляет от 2,5..3,5. Отсутствие жесткого сцепления проволоки с поверхностью тяговых шайб обеспечивается за счет контактного трения скольжения между проволокой и шайбой.

Для исключения провисания проволоки на шайбе поддерживается постоянное противонапряжение проволоки. Контактная сила трения действует на проволоку в направлении волочения. В результате возникает тянущая сила. Эта сила создает силу волочения. Величина силы трения является основой возможности осуществления процесса. Если трение относительно невелико, то и тяговая сила будет небольшая. Если сила недостаточна для движения проволоки через волоку, то проволока будет неподвижна в волочильном стане. Поэтому величину контактного трения регулируют количеством витков проволоки на шайбе, а так же величиной разницы скоростей между проволокой и шайбой. Чем больше витков, тем больше контактная поверхность и сила трения. Эту силу трения может регулировать шероховатость поверхности шайбы, но высокая шероховатость вызывает интенсивный износ проволоки и шайбы, поэтому поверхность шайб шлифуют как можно чаще. Относительное скольжение должно быть оптимально, малые относительные скольжения и большие недопустимы.

Если скольжение невелико, то уменьшается тяговая сила, а это вызывает дополнительный ее рост на средних шайбах. Если скольжение велико, то это приводит к дополнительному износу и тепловыделению. Траектория движения проволоки по шайбам построена по принципу постоянного роста скорости проволоки, поэтому при входе в зону волочения, сначала проволока попадает на шайбу малого диаметра, которой соответствует малые линейные скорости поверхности шайбы. Постепенно проволока попадает на увеличенные радиусы шайбы, что обеспечивает рост скорости проволоки и

диаметра шайбы. Верхние конусы называются тяговыми, так как создают силу волочения. Под конусом помещается набор волочильных обводных шайб.

Обводные шайбы предназначены для изменения траектории проволоки и не создают тяговых усилий. Таким образом, тяговый и обводной конус создают пару конусов. Количество таких пар может достигать до 10. Каждая пара вращается с повышенной угловой скоростью.

Скорость волочения на последней тяговой шайбе может достигать 30 м/с. Волочильные конуса расположены в ванне смазочно-охладительной жидкости.

79. ТЕМПЕРАТУРА ВОЛОЧЕНИЯ

Волочение – процесс холодной деформации металла. Холодная пластичная деформация металла сопровождается тепловыделением. Тепловыделение объясняется контактным трением в рабочей и калибрующей зонах волоки, а также трением между пластически сдвигаемыми слоями внутри структуры протягиваемого металла. Около 90% энергии холодной пластической деформации распределяется на нагрев металла. Около 10 % энергии пластичной деформации металла расходуется на его упрочнение после волочения, то есть остается в металле и выражается через повышение его прочности.

При волочении металлов и сплавов необходимо учитывать эту температуру. Повышенная температура снижает качество смазки, повышает силы контактного сцепления проволоки и волоки, повышает износ инструмента, снижает качество поверхности изделия, повышает энергопотребление волочения в результате повышения коэффициента трения.

При волочении высокоуглеродистых сталей и сплавов интенсифицируется процесс деформационного старения, который повышает хрупкость металла и вызывает в нем трещинообразование. Явление деформационного старения особенно актуально при волочении высокоуглеродистой проволоки, используемой для свивки металлокорда, изготовления рукавов высокого давления (проволока РМЛ). Явление деформационного старения металла заключается во взаимодействии примесных атомов С, N и H с ядрами дислокации. Это взаимодействие ограничивает подвижность дислокации, что снижает пластичность в целом.

Явление деформационного старения ограничивается путем уменьшения температуры волочения. В связи с двумя источниками (контактного и внутреннего трения) в теории волочения различают среднюю температуру сечения проволоки – t_c и температур поверхности проволоки - t_n . На среднюю температуру сечения проволоки t_c преимущественно влияют внутренние трения, а на t_n – контактное трение. Разделение условно, так как сечение проволоки сплошное (рис. 104).

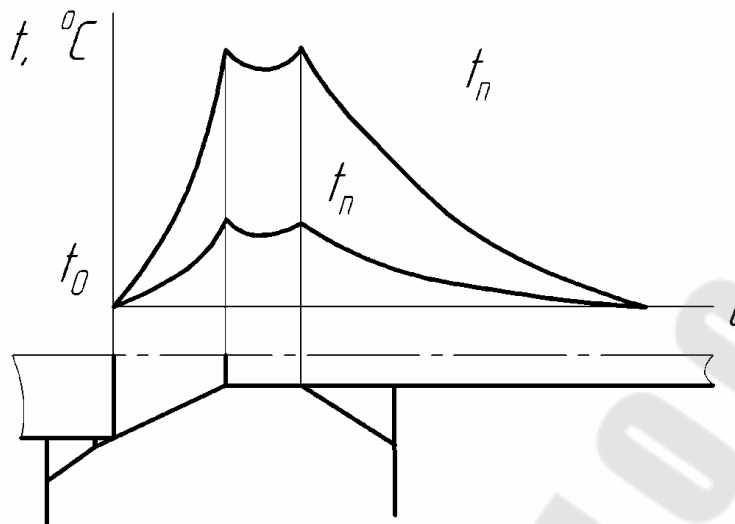


Рис. 104. Температурный цикл волочения проволоки

Проволока с исходной температурой t_0 попадает в очаг деформации (рис. 104), в результате действия контактного и внутреннего трения наблюдается рост средней температуры сечения проволоки t_c и температуры поверхности проволоки t_n . Максимальная температура t_c наблюдается в конце деформируемой зоны. Это связано с пиком уплотнения структуры металла. После входа и движения по цилиндру волюки температура t_c снижается, а температура поверхности t_n имеет характерное изменение, вызываемое контактным трением в цилиндре волюки. Плотность контакта в цилиндре высока, это связано с упругими деформациями, повышается диаметр проволоки 0,02%. Потому температура поверхности в калибруемой зоне почти не уменьшается. После выхода из калибруемой зоны наступает активная фаза охлаждения и постепенное выравнивание всех температур до температуры окружающей среды t_0 . Особую опасность вызывают температурные пики. При обработке углеродистой стали и цветных металлов температурные кривые, в первую очередь, ограничены свойствами смазок, температурой плавления металла. При обработке высокоуглеродистых сталей температурные пики ограничены температурой интенсивного ускорения деформационного старения. Так t_c для этих сталей не должна превышать 250 °С, а t_n не должна превышать 700 °С. Указанные пределы условны и могут изменяться в зависимости от концентрации углерода (С) и от диаметра проволоки. Для расчета можно использовать следующие формулы:

$$t_c = t_0 + 0,45 \cdot \sigma_s \cdot \left(1 - \frac{1}{\mu}\right),$$

$$t_n = t_0 + 0,3 \cdot \sigma_s \cdot \left(1 - \frac{1}{\mu}\right) + 2,75 \cdot \sigma_s \cdot \sqrt{V_s \cdot d \cdot 10^{-3}}.$$

Из приведенных эмпирических формул следует, что t_c зависит от прочности и степени деформации проволоки, а t_n зависит от прочности

проволоки, степени ее деформации, а также от скорости волочения и диаметра проволоки. Из формул также видно, что $2/3$ тепловыделения по сечению влияет на тепловыделение в поверхностных слоях.

80. КОНТАКТНОЕ ТРЕНИЕ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ

Так как волочение – процесс холодной обработки металла давлением, то контактное трение имеет существенное влияние на параметры процесса деформации. Повышение значения контактного трения приводит к росту энергосиловых параметров, температуры волочения, износа волокна. В результате растет энергопотребление, температура волочения и другие отрицательные проявления. При волочении контактного трения играет только отрицательную роль в отличие от прокатки. Увеличивает трение эффект проскальзывания проволоки по поверхности неподвижной волокна.

Для снижения контактного трения волочения всегда проводится со смазкой. При волочении на станах магазинного типа, на станах со скольжением, с автоматической регулировкой скоростей используют свои специфические смазки. В большинстве случаев при многократном волочении применяются сухие смазки на мыльной основе. Исключение составляет волочение со скольжением: применяются смазочно-охлаждающие жидкости. В станах со скольжением тяговые шайбы и волокна устанавливают в одной герметичной емкости, в которую заливается СОЖ. В состав СОЖ входит растворитель – вода и активные добавки, повышающие смазочные свойства жидкости, имеющие хорошую теплопроводность, повышающие смачиваемость поверхности проволоки, содержащие антикоррозийные добавки. Особую практическую значимость имеет коэффициент трения при волочении. Его величина для волочения находится в диапазоне 0,04 - 0,12. При волочении стальной латунированной проволоки в условиях ОАО БМЗ на станах со скольжением коэффициент трения равен 0,05. Если при волочении используется СОЖ на водной основе, заливаемая в герметичную ванну с установленными волокнами, этот вид волочения получил название «мокрое» волочение.

Величина коэффициента трения не постоянна, она зависит не только от физико-химических свойств смазки, но и от режимов волочения, от свойств контактной поверхности проволоки и волокна, для увеличения силы сцепления поверхности проволоки со смазкой перед волочением удаляется поверхностное загрязнение и окислы. Для этого проволока травится, промывается, на ее поверхность наносят подсмазочные слои, так на ОАО БМЗ в качестве подсмазочного слоя применяют буру. Она повышает силу удержания смазочных слоев.

На контактное трение влияет геометрия канала волокна, величина угла конуса деформирующей зоны влияет на объем захватываемой смазки. Существует оптимальное значение этого угла, обеспечивающее наиболее эффективное удержание смазки. Также установлено влияние скорости

волочения на коэффициент контактного трения. Общая зависимость: рост скорости волочения вызывает снижение коэффициента трения. Это связано с эффектом повышения эффекта захвата смазки с ростом скорости. Величина уменьшения коэффициента трения может достигать 20-25% от исходного значения. Кроме скорости волочения на коэффициент контактного трения влияет степень деформации. Чем выше степень деформации, тем выше коэффициент трения. Это связано с уменьшением толщины смазочного слоя с ростом степени деформации. Величина контактного трения при «мокром» волочении может быть рассчитана по эмпирической зависимости:

$$f_i = f_{\text{баз}} + \Delta f, \quad (77)$$

где Δf - изменение коэффициента трения;

$f_{\text{баз}}$ - значение коэффициента трения принимаемого в расчете маршрута волочения;

f_i - значение экспериментальных значений коэффициента трения.

$$\Delta f = -0,0179 - 0,0194 \cdot V_g + 0,0779 \cdot \varepsilon_p + 0,0103 \cdot V_g^2 - 0,0047 \cdot V_g \cdot \varepsilon_p - 0,0786 \cdot \varepsilon_p^2, \quad (78)$$

где V_g – скорость волочения, м/с;

ε_p – суммарная пластическая деформация.

81. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВОЛОЧИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Металлургическое производство имеет 4 основных передела (этапа):

1. Добыча и подготовка исходного сырья в виде руды, металлолома, окатышей, чугуна: добыча и обогащение руды, доменное производство чугуна, производство металлизированных окатышей, сбор и сортировка металлолома (скрапа).

2. Плавка и разливка металла для получения литых и непрерывно литых заготовок. Исходный полуфабрикат поступает с первого передела.

3. Горячая прокатка металлических изделий для получения заготовок; сортового, листового, трубного специального проката. Исходный полуфабрикат поступает со второго передела.

4. Производство метизных изделий с использованием холодной пластической деформации (волочения, холодного прессования, холодной высадки и др.), а также холоднокатаных металлических длинномерных изделий: холоднокатаного листа, холоднокатаных труб и других видов изделий. Исходный полуфабрикат поступает с третьего передела.

Таким образом, волочильное производство относится к третьему металлургическому переделу. В Беларуси в первом переделе присутствует

только сбор и сортировка металлолома, второй передел представлен полностью, в третьем переделе отсутствует только горячая листовая прокатка, в четвертом переделе нет холодной прокатки листов и труб. По этой причине белорусскую металлургию часто представляют как мини металлургию.

Метизами называют следующую группу изделий промышленного назначения: проволока, крепёжные изделия, плющенная и холоднокатаная лента, калиброванная сталь или профиль.

В РБ выпускают, в основном, проволочные и крепежные изделия. Производство этих изделий занимает основную долю всего метизного производства (около 60%), калиброванный профиль – около 23%. Таким образом, волочильное производство является основным этапом изготовления метизов в условиях РБ.

Из проволоки получают следующие основные изделия:

стальные канаты, металлокорд, металлические сетки, пружины, сварочные электроды, сварочную проволоку, болты, гвозди, винты, шурупы, фибры.

Калибрующие профили отличаются от проволоки отсутствием сматывания в бунты или катушки.

Название «*проволока*» появляется от названия процесса «*волочение*», то есть проволоченное изделие. Однако проволоку возможно получить не только волочением, но и прокаткой, прессованием, растяжением.

Основное качественное отличие проволоки:

- постоянство по всей длине поперечного сечения механических и физических свойств;
- высокая точность размеров профиля;
- высокая чистота поверхности (шероховатость).

В настоящее время волочильные технологии позволяют получать проволоку с размером профиля от 5 мкм до 24 мм.

Калиброванный профиль применяют в машиностроении, автомобилестроении, самолетостроении и др.

В отличие от прокатки, калибровка профилей при волочении выполняется в 1 переход и имеет цель повышения точности размеров профиля без существенного изменения его площади.

Калибровка способствует эффективному использованию полученных профилей металлообработки в механически обрабатываемых процессах.

Плющенная и холоднокатаная лента с размерами по толщине до 7 мм и по ширине до 500 мм используется в машино- и приборостроении. Такую ленту получают в роликовых волоках или на прокатных станах холодной прокатки.

Лента используется для производства пил, лезвий, ленточных пружин.

Крепежные изделия – металлические изделия для жесткого скрепления разъемных и неразъемных элементов конструкции.

Различают: - машиностроительный (болты, гайки, винты, шпильки и др.);

- железнодорожный крепежи.

Широко используется проволока с различными технологическими тонкими покрытиями.

В качестве покрытий могут служить: резина, пластмасса, другие металлические покрытия.

Резиновые и пластмассовые покрытия в основном используют для изготовления проводов и кабелей в электротехнической промышленности. Металлические покрытия являются технологическим для улучшения адгезионных свойств проволочных изделий в резинотехнической промышленности.

82. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОВОЛОКИ И ПРУТКОВ.

В связи с большим многообразием проволочной продукции, виды проволоки классифицируют по нескольким признакам:

1. *По форме поперечного сечения:* круглые, квадратные, трехгранные, овальные, шестигранные, прямоугольные, фасонные (сегментные, секторные, Z-образные, клиновидные).

Большинство производимых профилей круглого сечения.

2. *По размеру поперечного сечения:* - менее 0.1 мм; - 1.6 – 4 мм;

- 0.1 – 0.2 мм; - 4 – 6 мм;

- 0.2 – 0.4 мм; - 6 – 8 мм;

- 0.4 – 0.8 мм; - более 8 мм.

- 0.8 – 1.6 мм

Номер размерной группы проволоки используется для характеристики, технологических процессов и оборудования для волочения.

Калибрующий металл круглого сечения получают в диапазоне диаметров от 3 мм до 100 мм; квадратного – 5 – 10 мм; шестигранного (диаметр вписанной окружности) - 5 – 100 мм. Прямоугольное сечение или полосовой прутки имеют толщину 5 – 50 мм ширину 12 - 65 мм.

На современном уровне металлургического производства можно различить по степени деформации при их производстве. При производстве калиброванного металла и прутков минимальная деформация составляет до 5%, а при производстве проволоки составляет 50 – 400%.

3. *По точности изготовления и в зависимости от величины полей допусков* проволоку и калибрующий металл разделяют на классы точности.

Для каждого класса точности устанавливают допустимые отклонения размеров профиля.

4. *По химическому составу:* - стальные

- из цветных металлов

Стальные: низкоуглеродистые (до 0.25 C);

среднеуглеродистые (0.25 – 0.65 C);

углеродистые (0.65 – 0.8 C);
высокоуглеродистые (свыше 0.8 C).

5. По значению временного сопротивления на разрыв

- низко прочная (менее 390 МПа);
- пониженной прочности (390 – 790 МПа);
- нормальной прочности (790 – 1240 МПа);
- повышенной прочности (1240 – 1960 МПа);
- высокой прочности (1960 – 3100 МПа);
- сверх высокопрочные (3100 – 3500 МПа);
- ультра высокопрочные (3500 – 4000 МПа);
- мега прочные (свыше 4000 МПа).

При производстве проволоки для западноевропейских и американских фирм используется классификация проволоки по прочности, предложенная фирмой Goodyear. В соответствии с этой классификацией используется следующие классы прочности:

№	Название класса точности проволоки	Обозначение прочности	Формула для расчета прочности, МПа
1	Нормальная прочность	NT	3200-1800d
2	Высокопрочный	HT	3600-1800d
3	Сверх высокопрочный	ST	4000-2000d
4	Ультра высокопрочный	UT	4400-2000d
5	Мега прочный	MT	-

6. По виду поверхности проволока может не иметь дополнительную отделку поверхности.

В этом случае поверхность проволоки будет содержать остатки технологических покрытий, наносимых на ее поверхность перед волочением. Проволока может иметь специальную отделку поверхности путем удаления поверхностного слоя – травление, полирование, шлифование. Проволока может иметь покрытие металлическое или неметаллическое.

К металлическим покрытиям относят: цинк, олово, медь, латунь, алюминий,

К неметаллическим покрытиям относят: покрытия на основе полимеров, других химических соединений.

Проволока может быть *осветленная*, то есть термически обработанная защитной атмосферой без слоя оксидов; *оксидированная*, то есть специально окисленные при термической обработке до небольшого слоя окислов; *черная*, то есть термически обработана до тонкого слоя окалина.

83. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ВОЛОЧИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Исходной заготовкой волочильного производства является *катанка*. Ее качество определяет качество тонкой проволоки и изделий из нее (металлокорд, фибра). Традиционно диаметр катанки для проволочного производства имеет диапазон 4.5 - 12 мм. Для производства стальной проволоки – 5.5-6.5 мм.

Качество металлической катанки формируется на стадии прокатки на проволочных прокатных станах. Основными параметрами, влияющими на качество катанки, являются:

- качество сырья для сталеплавильного производства;
- технология выплавки стали;
- технология горячей прокатки стали;
- химический состав металла;
- структура металла.

Для сталепроволочного производства рекомендуется формирование у стальной катанки феррито-перлитных структур. Эта структура обеспечивает максимальную пластичность при достаточной прочности проволоки. Полученная катанка сматывается в бунты.

С экономической точки зрения и увеличения производства, предпочтительно формировать бунты максимальной массы, что обеспечивает максимальную загрузку волочильного производства, уменьшая количество пауз между бунтами.

Использование катанки минимально возможного диаметра также повышает производительность волочения за счет сокращения волочильных переделов и переходов.

Катанка из прокатных цехов поступает на склад катанки волочильных цехов. С помощью специальных транспортных средств бунты катанки поступают на участок подготовки поверхности катанки к волочению. Подготовка поверхности заключается в удалении окалина и в нанесении специальных подсмазочных слоев.

Операция *травление* проводится **механическими** и/или **термомеханическими способами** для удаления окалина. Эти способы считаются экологически чистыми и ресурсосберегающими.

В настоящее время наиболее распространен **химический способ** удаления окалина, который заключается в травлении поверхности катанки специальными химическими средствами. После травления проволока промывается водой и на ее поверхность химическим способом наносится подсмазочный слой (для БМЗ - это слой *буры*). Далее проволока промывается и просушивается, поступает на склад, расположенный перед участком грубого волочения.

После механического удаления окалина обычно подсмазочный слой не наносят.

Волочение проводится на станах грубого среднего и тонкого волочения, на участках соответствующих процессу волочения.

В связи с упрочнением проволоки, при волочении в промежутках между этапами волочения могут располагаться термические участки, обеспечивающие промежуточные разупрочнения, нанесение слоев металлических покрытий (для БМЗ латунные, бронзовые и цинковые покрытия).

После волочения проволока может служить как готовая продукция, так и заготовка для метизного производства.

84. СПОСОБЫ УДАЛЕНИЯ ОКАЛИНЫ ПРОВОЛОКИ И СВОЙСТВА ОКАЛИНЫ

Удаление окалины с поверхности катанки или проволочной заготовки производится на травильных или термотравильных участках сталеплавильных цехов. Как правило, на таких участках выполняется сразу несколько операций:

- удаление окалины
- нанесение подсмазочных слоев
- сушка катанки или проволочной заготовки

Удаление окалины позволяет:

1. повысить стойкость волочительного инструмента
2. получить требуемое качество поверхности проволоки после волочения
3. получить требуемую точность профиля
4. получение равномерности свойств металла по сечению и длине
5. уменьшить температуру на поверхности контакта заготовки и волоки
6. максимально использовать технологические свойства смазки
7. снизить усилие волочения за счет коэффициента контакта трения

Окалина может быть удалена:

- ✓ электро-химическим способом
- ✓ химическим
- ✓ механическим
- ✓ комбинированным

Химический и электро-химическим способы реализуются в травильных отделениях.

Механический способ осуществляется путем изгиба заготовки и отслоением окалины. Обычно осуществляется в 1 потоке с волочительным станом.

Окалина стальной проволоки или катанки имеет слоистую структуру: на ее поверхности находится Fe_3O_2 (*гематит*), далее следует слой Fe_3O_4 (*магнетит*), после идет слой FeO (*вьюстит*). Т. о. слои оксидов распределены в соответствии с уменьшением содержания O_2 по мере углубления в слой окалины.

Непосредственно около контакта с основным металлом может находиться различное содержание железа, кислорода, алюминия, кремния и др.

Вьюстит устойчив при температуре свыше 570°C, при более низких температурах он распадается на железо и магнетит.

FeO – наиболее рыхлая и мягкая составляющая часть окалины. Именно *вьюстит* обеспечивает свойства твердой смазки при горячей обработке металла с $T=700-1200^{\circ}\text{C}$.

При быстром охлаждении окалины *вьюстит* может остаться в окалине, если сохранятся поверхностные слои *гематита* и *магнетита*.

Учитывая механические свойства *вьюстита*, наиболее рационально использовать для его удаления способы травления и механической обработки.

Магнетит в отличие от *вьюстита* почти не растворяется в кислотах, обладает высокой образивностью, имеет устойчивую фазу во всем температурном интервале ГО.

Гематит обладает аналогичными свойствами магнетита, поэтому также является отрицательным элементом в составе окалины.

Положительным моментом окалины является возникновение в ней значительных внутренних напряжений после охлаждения, которое вызывает трещенообразование способствует удалению окалины с поверхности катанки.

Некоторые легирующие элементы (хром, алюминий, кремний) повышают стойкость стали к окалинообразованию.

Легирующие элементы стали преимущественно концентрируются на границе раздела окалины с металлом. Все промежуточные соединения, образованные на поверхности раздела металла и окалины, снижают сцепление окалины с металлом и способствуют ее более легкому удалению. Толщина и структура окалины зависит от химического состава металла, среды и режима нагрева и охлаждения.

В связи с высокой хрупкостью окалины, она должна быть тщательно удалена перед волочением.

85. НАНЕСЕНИЕ ПОДСМАЗОЧНЫХ СЛОЕВ НА ПРОВОЛОКУ ПЕРЕД ВОЛОЧЕНИЕМ

После операции травлением катанку или проволочную заготовку необходимо промыть. Промывка позволяет удалить остатки травильных растворов. Промывка осуществляется холодной водой 2-3 минуты. Возможна промывка к кипящей воде для снижения травильной хрупкости. Далее наносят подсмазочный слой.

Основные требования к подсмазочным слоям:

1. нейтрализация остатков кислотных растворов, которые могут содержаться после промывки.

2. Подсмазочный слой должен хорошо удерживать технологическую смазку при волочении и должен иметь низкий коэффициент трения.

3. Подсмазочный слой должен иметь хорошую адгезию с металлом проволоки.

Используются следующие виды подсмазочных слоев:

- ✓ гидрат окиси железа
- ✓ слой меди
- ✓ слой фосфорно-кислый
- ✓ слой оксалата железа
- ✓ слой извести
- ✓ слой жидкого стекла
- ✓ слой буры

Процесс нанесения слоя *гидрата окисла железа* – *желтение*.

Для образования *гидрата окиси* применяют обычное окисление металла в воде и в кислороде.

Погружение металла в раствор медного купароса и серной кислоты позволяет нанести тонкий слой меди – *меднение*.

Для нанесения тонких пленок фосфорно-кислотных слоев используют процедуру *фосфотирования*. Для этой цели используют взаимодействие ортофосфорной кислоты и цинкосодержащие соединений на поверхности стали.

Для нанесения слоя щавелевой кислоты применяют процедуру *оксалитирования*. В процессе на поверхности стали происходит растворение железа с образованием *оксалата железа*. Он является хорошим подсмазочным слоем и хорошо удаляет технологическую смазку.

Процесс *известкования* позволяет нанести на поверхность проволоки тонкий слой извести. Известь нейтрализует остатки кислоты после промывки, обеспечивает лучший захват смазки при волочении. Известкование проводят погружением проволоки в горячий водный раствор извести. Обычно погружение многократное и с промежуточной сушкой.

Остекление позволяет получить тонкий подсмазочный слой жидкого стекла.

Все перечисленные виды подсмазочных слоев имеют преимущества и недостатки.

Недостатки определяются степенью загрязнения проволокой рабочих мест и оборудования.

Необходимость тщательной нейтрализации химических соединений сопутствующих нанесению подслоя. В этой связи наиболее перспективным является способ *бурирования*, обеспечивающий нанесение подсмазочного слоя (буры).

Процесс *бурирования* заключается в погружении катанки или проволочной заготовки в водный раствор буры с концентрацией 150-200 г/л при температуре 80-90°C. В качестве активированной добавки можно использовать тринатрий и фосфат в количестве 10% от массы буры.

Длительность пребывания проволоки в растворе зависит от ее диаметра. Чем больше диаметр, тем больше выдержка. Продолжительность 4-10 секунд. После нанесения подмазочных слоев осуществляется сушка в специальных сушилках с электрическим или газовым подогревом. Температура сушки покрытия 60-200°C.

Подмазочный слой буры отвечает всем требованиям, предъявляемым к подмазочным слоям при волочении. Существенно не загрязняет рабочее место и среду. Надежно защищенная сталь от окиси при длительном хранении перед волочением обладает свойством *флюса*, обеспечивающее надежную сварку концов проволоки.

Режимы сушки зависят от:

- свойств подмазочных слоев
- химического состава
- концентрации сушильных установок

Перспективным является направление – совмещение процессов травления и нанесения подмазочных слоев. Направление – травление в ортофосфорной кислоте с одновременным кислотным меднением для получения подмазочного медного слоя.

86. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПРОВОЛОКИ

Термообработка проволоки существенно влияет на механические свойства готовой проволоки, а также на ее структуру. Основное назначение термообработки проволоки в технологии волочения – разупрочнение между переделами волочения. Также с помощью термообработки формируется необходимая структура металла проволоки перед волочением. Исходная структура в процессе волочения изменяется, что существенно влияет на эксплуатационные свойства полученной проволоки.

Термообработка размещается преимущественно между переделами волочения, иногда перед волочением и реже всего после. Это связано с тем, что на склад проволочной заготовки поступает разупрочненная катанка или проволочная заготовка.

После волочения металл упрочняется, это повышает его прочностные свойства, но в некоторых случаях необходимо снизить прочность до необходимого эксплуатационного уровня. *Пример* такой проволоки – проволока Мюзле, вязальная проволока.

Различают 4 термообработки проволоки:

- отжиг
- нормализация
- патентирование
- закалка с отпуском

Основное назначение отжига: получение равномерной структуры металла упрочненной проволоки.

Основная особенность отжига: получение более равноосных зерен, которые обеспечивают наибольшую пластичность металла, обеспечивают возможность длительного волочения, которое сопровождается вытягиванием зерен.

Для назначения требуемой структуры металла и для получения необходимого сочетания прочности и пластичности применяют **патентирование** и **закалку с отпуском**. Эти процессы выполняются на многониточных агрегатах, оснащенные продольной нагревательной печью и ванной со средой охлаждения и выдержки. Размоточные устройства расположены перед агрегатами патентирования. После охлаждения проволока наматывается на катушки.

Закалки с отпуском окончательно формирует требуемые свойства проволоки, а патентирование разупрочняет проволочную заготовку, после чего следует процесс волочения (тонкое волочение). Закалка для доэвтектоидных сталей заключается в нагреве до $A_{c3}+50^{\circ}C$, затем следует выдержка для завершения фазовых превращений. После выдержки следует быстрое охлаждение. Высокая скорость охлаждения образует мартенсит. Охлаждающая среда: эмульсия, вода, масло. Далее следует отпуск, заключающийся в нагреве закаленной проволоки до температуры ниже A_{c1} . Далее следует выдержка при этой температуре и охлаждение с заданной скоростью. Скорость охлаждения обеспечивает необходимые механические свойства проволочной заготовки.

Различают 3 вида отпуска:

- *низкий*
- *средний*

• *высокий* Каждый вид отпуска формирует определенное соотношение между пластичностью и прочностью.

Наиболее распространенное сочетание ТО – **патентирование**. Название процесса обуславливает наличием патентов на изобретение этих технологий. Патентирование состоит в нагреве проволоки до линии A_{c3} , последовательной выдержки и ступенчатым охлаждением. На первой ступени проволоку охлаждают до $500^{\circ}C$ с определенным временем выдержки при этой температуре. На второй ступени проволоку охлаждают на воздухе. Такая ТО обеспечивает распад аустенита на тонкопластинчатый сорбит. Такая структура обеспечивает оптимальное соотношение между высокой прочностью и пластичностью одновременно. Это позволяет при дальнейшем волочении проволочной заготовки с указанной структурой деформировать проволоку с высокой степенью обжатий с целью достижения высокой прочности на малых диаметрах.

Операция патентирования также осуществляется на многониточных вытяжных агрегатах. Количество нитей может достигать 30-40 шт. Для расчета нагрева проволоки при патентировании используются следующие зависимости:

где $T_n = 900+10d-50c$, $^{\circ}C$,

$T_{\text{п}}$ – минимальная температура патентирования

d – диаметр проволоки

C – содержание углерода в стали в долях единицы

Расчетное значение минимальной температуры патентирования и времени нагрева является граничными и минимальными, т.е. ТО может проводиться с увеличением этих значений, но при этом теряется производительность. Охлаждение на первой ступени можно рассчитать более точно:

$$T_{\text{охл}}^1 = 490 - 15d + 60c, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

На практике средой для первого случая является расплав свинца, но $T_{\text{расплава}} = \text{const}$ и является опасным фактором производства из-за паров свинца. Поэтому на современных агрегатах патентирования используются другие материалы, например, кварцевый песок. Для нагрева и характеристик патентирования имеет значение произведение $V_{\text{в печи}} \cdot d$. Чем больше d , тем меньше скорость печи, и наоборот. Эта характеристика влияет на микроструктуру проволоки при патентировании, т.е. тем больше диаметр, тем больше масса металла, ТО и соответственно повышенное время ТО.

На современных агрегатах непрерывного действия патентирования величина

$V_{\text{в печи}} \cdot d$ должна изменяться в пределах 70-90 (м·мм)/с.

87. ВИДЫ ЗАЩИТНЫХ И СПЕЦИАЛЬНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ПРОВОЛОКИ

Основная масса производства проволоки является проволока стальная. Сталь сильно подвергается коррозии, поэтому ее металлические коррозионностойкие покрытия. Кроме защитных веществ покрытия могут иметь следующие свойства:

- Обладать повышенной электропроводностью (сталь+Al)
- Иметь повышенные адгезионные свойства (латунное покрытия, бронзовые покрытия стальной проволоки)

Процесс антикоррозионной защиты бывает *механическим* и *электрохимическим*. **Механическая защита** основывается на изоляции основного металла от окислительной среды. В этом случае покрытие должно быть сплошным, прочным и иметь хорошее сцепление с основным металлом.

Электрохимическая защита основана на образовании гальванических контактов, при которых защита металлов обеспечивается значениями стандартных материалов металлов, т.е. покрытие и металл могут быть анод-катод или катод-анод. *Катодное* покрытие защищает сталь только механическим путем, поэтому микропоры в катодном покрытии недопустимы. Более надежную защиту обеспечивает анодное покрытие,

которое защищает металл механически и гальванически. К катодным относятся металлы Cu, Sn, Pb, к анодным Zn, Al, Cr, Ti.

Анодное покрытие разрушается, а катодное сохраняется, разрушая сталь. В зависимости от этого назначают требуемое покрытие. В настоящее время развивается направление нанесения металлических покрытий в виде сплавов. Так получают развитие бронзовые и латунные покрытия. Также покрытия более функциональные. Выбор легированных элементов сплавов позволяет широко изменять защитные и специальные свойства, формы покрытия.

Наиболее широко в волочильном производстве получили распространение следующие процессы нанесения покрытий:

- Цинкование
- Лужение(Sn)
- Алюмирование
- Меднения
- Латунирование
- Бронзирование

Основные способы нанесения металлических покрытий:

- Горячий (прохождение проволоки через расплав)
- Электрохимическое (осаждение металла из водного раствора электролита)
- Плакирование (формирование покрытия и его соединение со сталью совместной ПД в валках или в валках прокатного стана)

1. Основан на тщательной очистке поверхности проволоки, в дальнейшем производстве через расплав и кристаллическое покрытия. Способ применяется для легкоплавких и пластичных металлических покрытий (Zn, Al,Pb и сплавы на их основе). Главное преимущество - простота.

2. Наносят Cu, Zn,Sn,Cr,Ni. Этот способ более универсальный, менее энергоемкий, обладает возможностью точного размера толщины покрытия. Это обуславливает широкое распространения этого способа в волочильном производстве. Преимущества: возможность регулировать толщины покрытия и низкая энергоемкость. Недостатки: опасность для окружающей среды

3. Для покрытия толстых и пластичных слоев. Основано на подаче порошкового металла в деформирующую зону волоки. Порошок как твердая смазка захватывает проволокой в ОД, где пластически формируется тонкий слой металлического покрытия. Далее следует термическая операция окончательного спекания порошкового слоя с одновременным припеканием к стальной основе. Вместо волоки могут использоваться прокатные валки с круглыми калибрами. В этом случае необходимо калибровать диаметр в волоке. В качестве порошка могут использоваться различные механические

смеси порошковых компонентов. Основа такого порошка должна быть пластичная.

Для получения качественного покрытия поверхность стали должна быть подготовлена, поэтому перед нанесением покрытия поверхность обезжиривается, травится, также возможно нанесение дополнительных флюсов. Наносимое покрытие может быть *финишным*, в случае, когда наносится на готовую проволоку; может быть *технологическим*, когда наносится перед переходом волочения. Примером технологического покрытия является латунированная стальная проволока.

Нанесение латунированного покрытия выполняется перед последним переделом волочения (тонкое волочение). В процессе волочения латунированной стальной проволоки латунное покрытие выполняет роль твердой смазки. Волочение повышает плотность и уменьшает пористость покрытия. Толщина наносимых покрытий может составлять от нескольких десятков мкм. Современные агрегаты нанесения покрытия имеют непрерывный принцип действия, изготавливаются в виде поточных линий. На траектории движения проволоки в потоке линии размещаются необходимые ванны, устройства, контрольно-измерительные приборы.

88. ВИДЫ БРАКА ГОТОВОЙ ПРОВОЛОКИ

Основная причина брака – *несоответствие техническим требованиям режимов производственного процесса*.

Брак – отклонение от требований, предъявляемых к готовой продукции нормативными документами. Для исключения или предупреждения брака используют входной и выходной контроль продукции.

Для получения продукции без брака применяют и используют технологические инструкции и карты.

Технологические инструкции определяют режим и порядок выполнения технологического процесса. Также регламентируется порядок выполнения контрольных операций. Контрольные операции выявляют причины и виды браков, а также способствуют их устранению.

При изготовлении проволоки все виды возможного брака классифицируют по следующим признакам:

1) *Несоответствие размеров и форм поперечного сечения*, обычно это отклонение диаметра проволоки за пределы допуска, появление овальности сечения свыше предельных норм. Этот вид брака предупреждается контролем размеров и формы при волочении и исключается своевременной заменой чистовых и предчистовых волок.

2) *Дефекты поверхности*. Причина возникновения может находиться в сталеплавильном, прокатном и волочильном производстве. Входной контроль катанки или проволочной заготовки исключает заусенцы, закаты и другие виды, аналогичные дефектам правильного и прокатного передела. Возможно удаление мелких дефектов с помощью дополнительного

травления, окислительного отжига, с помощью шлифовки и иглофрезерования.

В процессе волочения возможно также появление поверхностных дефектов, а именно: рисок, трещин.

Способы устранения такого дефекта:

- использование необходимой подготовки поверхности перед волочением

- контроль поверхности вытяжных и обводных устройств

- оптимальное распределение обжатий по переходу волочения

Основные требования по размерам, форме и поверхности обеспечивается последней чистой волокой, к которой предъявляются особые требования.

3) *Отклонение от прямолинейности проволоки.* Требуемая величина прямолинейности проволоки обеспечивается соосностью чистой волоки и проволоки, настройкой правильного и рихтовального устройства. Величина отклонения в линейности регламентируется качественными параметрами. Эта величина должна находиться в требуемом оптимальном диапазоне.

В современном метизном производстве прямолинейность проволоки во многом определяет качество некоторых видов проволочной продукции (металлокорд).

Проволока с отклонением по прямолинейности может быть отбракованной при ее дальнейшей обработке в автоматизированном режиме, когда требуется определенная величина ее искривления.

Главной причиной такого вида дефекта является релаксация остаточных видов напряжения в проволоке после ее волочения.

Так в результате действия остаточного напряжения появляется произвольное искривление проволоки после хранения проволоки на катушке перед следующим этапом ее обработки.

Основной причиной этого явления – неравномерность деформации по сечению и длине проволоки, а также склонность структур металла к образованию остаточных напряжений.

4) *Несоответствие механических свойств* – отклонение от нормируемой величины предела прочности и относительного удлинения (сужения). Эти величины обеспечивают нормальные эксплуатационные требования проволоки. Величина этих параметров зависит от свойств исходной заготовки, от режимов промежуточной термообработки и от режимов волочения. Поэтому для достижения требуемых механических свойств необходима точная настройка указанных режимов. Все заданные параметры механических свойств контролируются в установленном порядке путем выборочного контроля.

5) *Несоответствие макроструктуры* представляет собой обнаруживающееся на изломе трещины, пузыри, закаты, шлаковые включения и др. Основная причина данного вида дефектов чаще плавильное производство, реже прокатное.

б) *Несоответствие микроструктуры* – нормируется структура перлита без карбидных сеток, нормируется структура сорбита без участков свободного перлита, нормируется глубина обезуглероженного слоя стали.

Причины:

- Плавильный передел
- Режимы нагрева
- Охлаждение при прокатке и волочении

Дефекты макро- и микроструктуры – **неисправимый брак**.

7) *Несоответствие химического состава* является также неисправимым браком плавильного производства. Существуют отклонения от нормирования свойств физических, магнитных, жаростойких и др. характеристик. Например, в кабельном производстве строго нормируется величина электросопротивления алюминиевой и медной проволоки. Также возникает брак в покрытии проволоки. Причина – несоответствие режимов его нанесения.

Существует брак **намота** (наличие перепутанных витков в мотке или на катушке, которое может привести к отбраковке катушки). Для ликвидации этого брака выполняют правильную настройку намоточного устройства. Масса мотков и катушек также регламентируется. Причина появления неточных масс – повреждение счетчиков длины проволоки. Также существует требование к упаковке проволоки.

89. МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ПРОВОЛОКИ

Готовая проволока после волочения подлежит контролю, при этом контролируются физико-механические и химические свойства.

Физико-механические свойства:

- диаметр проволоки
- временное сопротивление разрыву
- отношение разрывного усилия проволоки к временному сопротивлению разрыву без угла
- удлинение проволоки

Эти испытания определяются путем испытания на растяжение. Также к физико-механическим относят испытания на реверсивное скручивание.

Химические свойства:

- содержание меди и цинка для латунной проволоки
- содержание олово и меди для бронзирования
- также определяют массу латунного и бронзового покрытий

Для проволоки наиболее распространен и универсален метод оценки свойств испытаний на растяжение.

Полученная в ходе испытаний на растяжение диаграмма строится в абсолютных координатах «усилие-растяжение», в относительных координатах - «деформация-напряжение».

Типичная схема растяжения (рис. 105) для проволочной заготовки (параметры с верхним индексом З) и тонкой проволоки (параметры с верхним индексом Т).

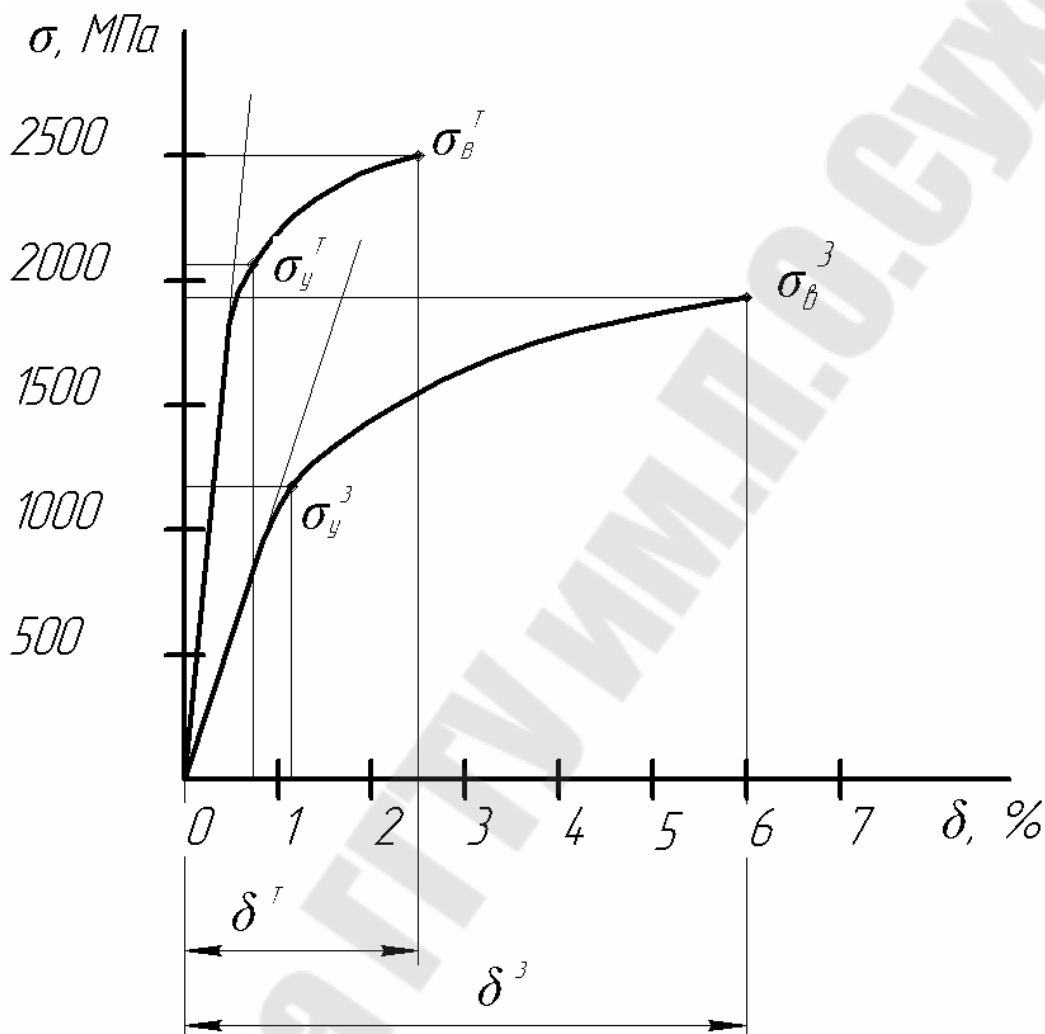


Рис. 105. Графики растяжения проволочной заготовки и проволоки

На графике растяжения проволоки присутствуют следующие параметры:

$\sigma_{\text{ПР}}$ — предел пропорциональности — условное напряжение, при достижении которого не происходит отклонение от закона Гука и закона упругой деформации. Параметр оценивает уровень напряжений, при котором проволока работает только в упругой деформации.

σ_T — предел текучести — если металл при растяжении образует площадку текучести (на диаграмме горизонтальный участок), то σ_T определяется местом положения этого участка. В технических расчетах волочения напряжения текучести соответствует величине σ_T соответствует σ_S . Если участка текучести нет (как для стальной тонкой проволоки), то σ_T приравнивается к условному пределу текучести, в индексе которого обозначают остаточную пластическую деформацию в %: $\sigma_{0,1}$; $\sigma_{0,2}$; $\sigma_{0,3}$ (0,1%, 0,2%, 0,3%). При

условном пределе текучести остаточная деформация достигает значительной величины.

σ_y - условный предел упругости, при котором в образце появляется малая остаточная деформация заданной величины (0,002%, 0,005%, 0,01%): $\sigma_{0,002}$; $\sigma_{0,005}$; $\sigma_{0,01}$.

Указанная деформация соответствует доле пластической деформации общей деформации образца до предела упругости. В образце, нагружая до σ_y , имеется преимущественно упругая деформация с заданной долей пластической деформации.

Основное отличие σ_T от σ_y заключается в развитии пластической деформации по всему объему образца. Таким образом при σ_y пластическая деформация на макроскопическом уровне, а при σ_T на микроуровне.

σ_b – максимальное условное напряжение, которое выдерживает образец до разрушения – предел прочности или временное сопротивление разрыву при растяжении. Это основное нормированное свойство проволоки.

Используется условное и истинное напряжение при разрыве (рис. 106).

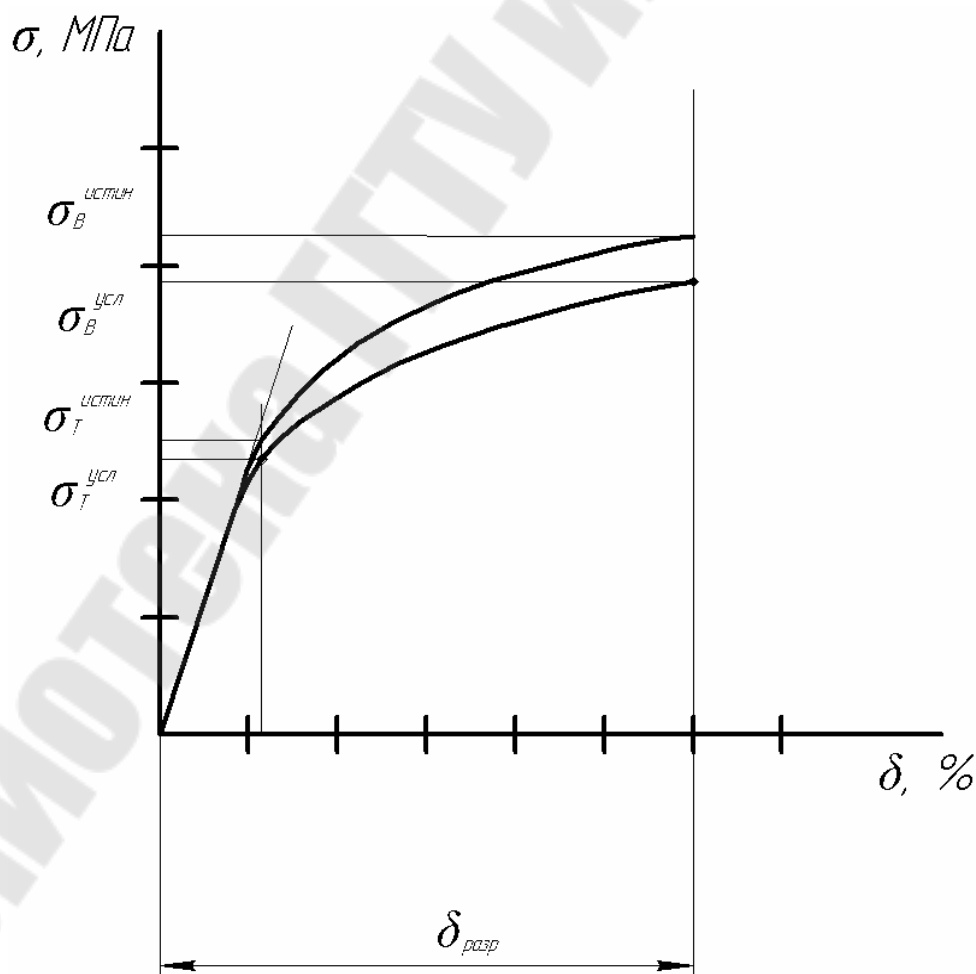


Рис. 106. Графики истинных и условных напряжений

Зависимости для напряжений:

$$\sigma_b^{истин} = \frac{P}{F}, \sigma_b^{усл} = \frac{P}{F_0}$$

P – усилие нагружения проволоки в указанный момент времени или деформации [Н];

F_0 – площадь поперечного сечения проволоки до испытаний, мм.

F – площадь поперечного сечения проволоки с учетом относительного сужения, мм.

К механическим характеристикам относятся и показатели пластичности:

δ – относительное удлинение;

Ψ – относительное сужение.

Чем выше δ , тем проволока пластичнее. Величины δ и Ψ измеряются в %.

Обозначение относительного удлинения осуществляется с указанием длины образца в его индексе ($\delta_{100}, \delta_{200}$). δ характеризует объемную пластичность деформации, а Ψ – сосредоточенную пласт. деф.

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0}, \Psi = \frac{F_1 - F_0}{F_0}$$

где l_0, F_0 – длина и площадь поперечного сечения проволоки до растяжения;

l_1, F_1 – длина и площадь поперечного сечения проволоки после растяжения;

l_1 – удлинение всего образца.

F_1 характеризует только определенный участок сечения образца после растяжения, поэтому для изучения пластичности всего образца лучше использовать δ , а для локальной пластичности проволоки предпочтительно использовать Ψ .

Все рассмотренные пределы напряжений относятся к прочностным свойствам, а δ и Ψ – к пластическим.

На практике прочностные характеристики обратно пропорциональны пластическим свойствам.

Основная задача современного волочильного производства – получение оптимального соотношения прочность-пластичность при их максимальных значениях. Для этого используют специальные режимы деформации при волочении, специальные режимы ТО, применяют особые структурные характеристики металла, используют микролегирование стали. Кроме испытаний на растяжение возможно оценивать мех. свойства с помощью испытаний на твердость.

Твердость – сопротивление материала проникновению в его поверхность другого более твердого тела. Для проволоки чаще всего используют испытания по Бринеллю, Виккерсу, Роквеллу.

С помощью испытаний на твердость возможно определить твердость поверхности проволоки и ее поперечного сечения.

90. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ПРОВОЛОКИ

Технологические испытания готовой проволоки направлены на определение способности проволоки к восприятию предельных напряжений и деформаций. При этом схема нагружения должна максимально соответствовать эксплуатационным режимам проволоки и проволоочной продукции. Наиболее распространены следующие виды испытаний:

1) испытания на изгиб (рис. 107) – проводится на спец. приборах, позволяющие изгибать проволоку повторно переменными нагрузками.

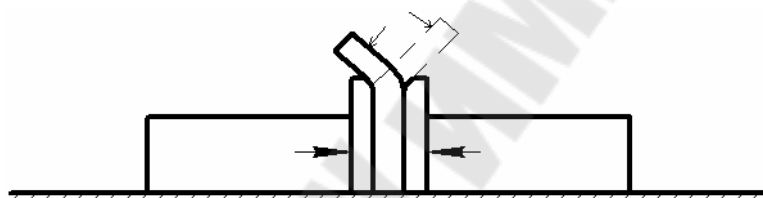


Рис. 107. Схема испытаний проволоки на изгиб

Диаметр испытываемой проволоки 0.5-10 мм, длина испытываемого образца проволоки 10-150 мм.

Губки имеют определенный радиус закругления в зависимости от диаметра проволоки. Проволока изгибается до появления трещин и разрушения. Результатом испытания является количество реверсивных изгибов до разрушения. Число нормируется технологическими документами;

2) испытания на скручивание для проволоки диаметром $d=0.2-10$ мм и длиной $l = 100d$ мм (рис. 108)

Длина определяется из условия и должно быть в диапазоне 50-500 мм.

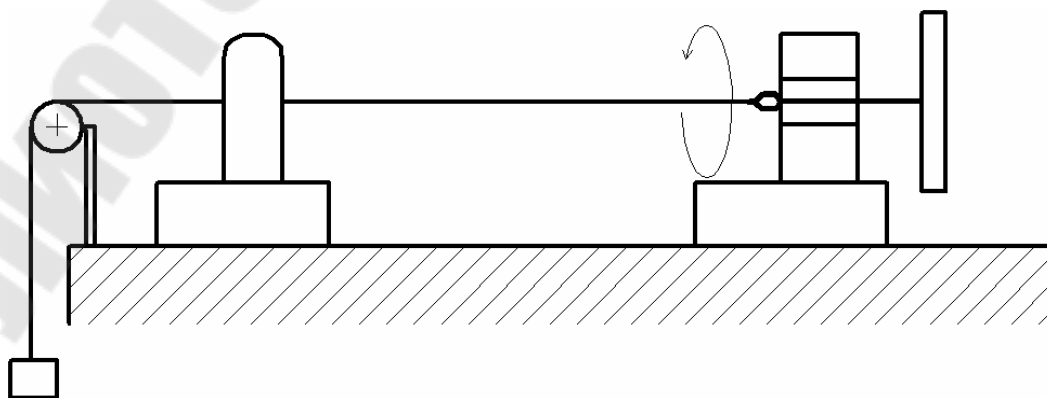


Рис. 108. Схема испытаний проволоки на скручивание

Груз массой m обеспечивает натяжение проволоки при скручивании 2% от предела прочности. Скручивание осуществляется с $\omega = \text{const}$ в диапазоне 30-90 об/мин. Испытание на скручивание проводится по 2 методикам:

При заданном числе скручиваний без разрушения проволоку скручивают до этого значения. Результатом испытаний является факт наличия или отсутствия разрушения.

Проволоку скручивают до разрушения, а полученное число скручиваний является результатом испытаний.

Испытание на реверсивное скручивание проводят скручиванием двух проволок относительно друг друга. Испытание имитирует свивку двух проволок, что так соответствует технологии изготовления металлокорда. Количество реверсивных скручиваний нормируется. Испытания проводят до разрушения проволоки. Результат – число скручиваний до разрушения;

3) испытания на навивку (рис. 109) – свивка проволоки вокруг цилиндра плотно прилегающими витками. Число витков – 5-10. Проводится для проволоки $d = 0.1-10$ мм. Чаще применяют для проволоки с покрытием. Результат испытаний – наличие или отсутствие расслоения, отслаивания, трещины в металле. Диаметр цилиндра для навивки зависит от диаметра проволоки.

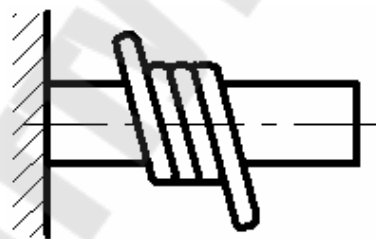


Рис. 109. Схема испытаний проволоки на навивку

4) испытания на осадку – проводят для проволоки для крепежа. Признаком брака является расслоение и трещины на боковой поверхности проволоки.

5) контроль качества поверхности проволоки – проводят с помощью визуального осмотра, а также с использованием спец. увеличительных приборов (микроскоп и лупа). Для некоторых видов проволоки контролируется шероховатостью.

6) контроль микроструктуры проволоки. С помощью микроанализа определяют форму и размеры зёрен, наличие неметаллических включений микротрещин. Для этого используют оптический электрический микроскоп.

7) испытания проволоки на усталость при изгибе с вращением (рис. 114) – метод заключается в том, что при вращении предварительно изогнутого образца вокруг продольной оси в каждой точке за 1 оборот реализуется полный симметричный цикл напряжений растяжения и сжатия.

Схема испытаний на усталость при изгибе с вращением

Результат испытаний является число оборотов или циклов до разрушения или определение факта отсутствия разрушения образца при определении количества оборотов проволоки. На схеме:

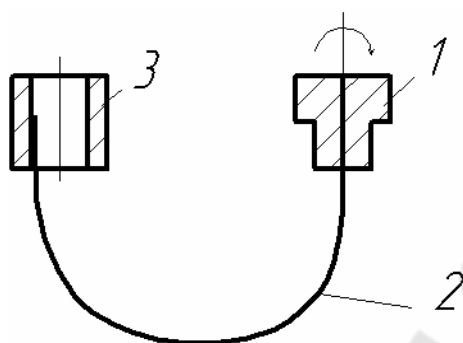


Рис. 110. Схема испытаний проволоки на усталость:
1 – приводной патрон; 2 – проволока; 3 – втулка

При испытаниях в проволоке создаются напряжения ниже пределов упругости.

91. СТРУКТУРА МЕТАЛЛОКОРДА. УСЛОВНОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ МЕТАЛЛОКОРДА

Металлокорд является основным армирующим материалом для брекера и каркаса радиальных шин. Расположение металлоарматуры в шинах этого типа показано на рис. 111.

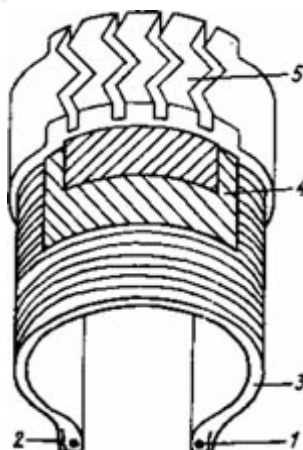


Рис. 111. Схема расположения армирующих элементов в радиальной шине: 1 – борт; 2 – чефер; 3 – каркас; 4 – брекер; 5 – протектор

Постоянный рост потребления металлокорда обуславливается удачным сочетанием его эксплуатационных характеристик:

1) Металлокорд – один из самых прочных промышленно используемых материалов. Хотя металлокорд уступает по удельной прочности арамидам, стеклокорду, поликапрамиду, но его высокая прочность, жесткость и сопротивление сжатию позволяет уменьшать число слоев, закладываемых в шину, и, тем самым, снижать вес самой шины. Также важным свойством является (в отличие от текстиля) отсутствие снижения прочности под воздействием влаги, относительно малое (особенно у компактных конструкций) снижение прочности в результате *фреттинга* (коррозия при минимальном повторяющемся (локальном) перемещении двух поверхностей относительно друг друга в условиях воздействия коррозионной среды).

2) Металлокорд имеет самый высокий модуль Юнга среди армирующих материалов для шин, а это обуславливает низкие потери на гистерезис и тепловыделение при работе шин, малое сопротивление качению, стабильность формы шины под различными видами нагрузок. Температурная стабильность металлокорда обеспечивает сохранение формы брекера и каркаса при высоких скоростях.

3) Металлокорд без всякой дополнительной обработки, необходимой для остальных видов армирующих изделий, имеет высокую адгезию к резине, как в исходном состоянии, так и после длительного температурного воздействия (старения).

Во всем мире происходит не только рост производства металлокорда, но и его значительное качественное развитие. Подтверждением служит ежегодный рост освоенных конструкций на ОАО "БМЗ".

В производстве металлокорда имеются определенные технологические трудности, касающиеся, в частности, процесса латунирования, мокрого волочения и свивки стальной латунированной проволоки, производства металлокорда с высокими адгезионными свойствами по отношению к резине, а также уменьшения обрывности тончайшей проволоки при волочении и свивке. Знакомство с путями устранения этих трудностей представляет значительный интерес.

Металлокорд состоит, как правило, из трех элементов (рис. 112): проволок – 1, прядей – 2 и оплеточной проволоки – 3.

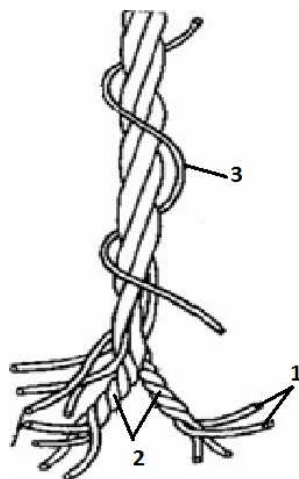


Рис. 112. Структура металлокорда

По внешнему виду металлокорд имеет равномерный блестящий желтый цвет и наматывается на стальные или пластмассовые катушки одной непрерывной длиной. Изготовители шин стремятся выбрать наиболее эффективные конструкции многоцелевого назначения и тем самым унифицировать сортамент используемого металлокорда.

В соответствии с требованиями «Американского общества по испытанию материалов» (Методы «ASTM») обозначение металлокорда содержит описание его конструкции с добавлением соответствующих индексов.

Для описания конструкций корда, в шинной промышленности приняты условные обозначения проволоки ASTM. Описание корда начинается с крайнего внутреннего элемента и продвигается наружу. Знаком «плюс» (+) отделяется каждый слой корда. Если нити в двух или нескольких компонентах имеют одинаковый диаметр, его размер опускается для всех кроме последнего компонента. Если элементом является одиночная нить, числовое обозначение один (1) опускается. Ниже дана обобщенная форма данных условных обозначений:

сердечник + промежуточная часть + крайняя внешняя часть + оплетка

или:

$$(N \times F) \times D + (N \times F) \times D + (N \times F) \times D + W \times D, \quad (79)$$

где N – количество элементов;

F – количество нитей;

D – диаметр нитей (мм);

W – оплетка (нить).

Необходимо отметить, что данные условные обозначения не учитывают направление скручивания (S или Z), а также длину свивки (шаг) корда. При

определении конструкции стального корда, направление скручивания и длина свивки указываются в последнем обозначении после введения в формулу любых возможных упрощений. Это можно проиллюстрировать на следующем примере.

Конструкция корда:

Слой I: N=1, F=4, D=0,175 мм.

Слой II: N=6, F=4, D=0,175 мм.

Слой III: (оплетка) N=1, F=1, D=0,15 мм.

Подставив данные значения в формулу (1), конструкцию корда можно выразить следующим образом:

$$(1 \times 4) \times 0,175 + (6 \times 4) \times 0,175 + 1 \times 0,15. \quad (80)$$

Используя правило одиночного элемента нити (N = 1 или F = 1), упрощенное выражение данной конструкции корда будет иметь следующий вид:

$$4 \times 0,175 + (6 \times 4) \times 0,175 + 0,15. \quad (81)$$

В предыдущем примере конструкции стального корда, и компонент в слое I (крайний внутренний), и компонент в слое II (крайний внешний) выполнены из нитей с диаметром D=0,175 мм. Дальнейшее упрощение обозначения конструкции корда позволяет использовать идентификацию диаметра (D) только с крайним внешним компонентом при условии, что все компоненты имеют нити одинакового диаметра. Тогда обозначение конструкции корда для данного примера будет иметь следующий вид:

$$4 + (6 \times 4) \times 0,175 + 0,15. \quad (82)$$

Если направления скрутки обоих элементов одинаковое, выражение можно упростить до:

$$7 \times 4 \times 0,175 + 0,15. \quad (83)$$

Данное обозначение конструкции корда (т.е. тип конструкции корда) не является окончательным, так как в нем не отражается направление скрутки и длина свивки (шаг) стренг, корда и нити оплетки. Если мы допустим, например, что:

- шаг навивочной нити в пряди составляет 10 мм при левом направлении скрутки (S),

- шаг навивочных прядей в корде составляет 20 мм при правом направлении скрутки (Z),

- шаг оплетки составляет 3,5 мм при левом направлении скрутки (S).

Окончательно обозначение конструкции корда выглядит следующим образом:

$$7 \times 4 \times 0,175 + 0,15 \ 10/20/3,5 \ S/Z/S. \quad (84)$$

На рис. 113 дается схематичное представление данной конструкции стального корда ($7 \times 4 \times 0,175 + 0,15$) с учетом шага и направления скрутки нитей, прядей и оплеточной проволоки.

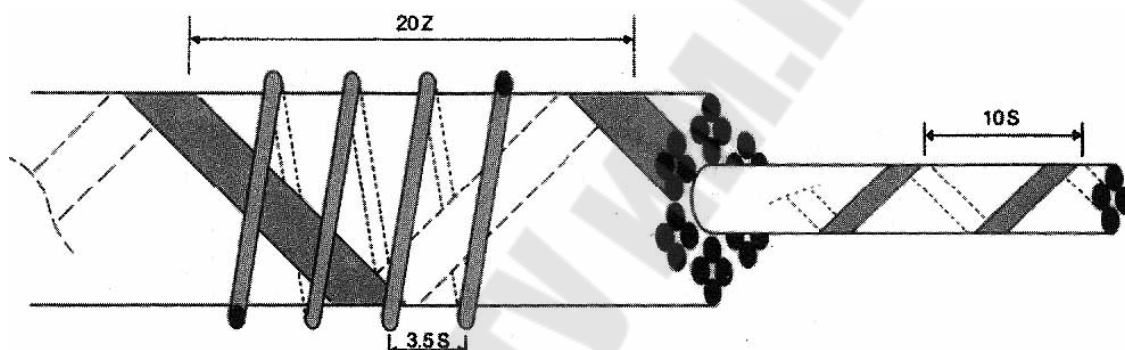


Рис. 113. Конструкция стального корда $7 \times 4 \times 0,175 + 0,15$

Методика идентификации стального корда (так называемая марка корда) предусматривает использование четырех чисел и буквы, например, 21Л15. Число 21 показывает количество нитей в корде. Буква русского алфавита Л означает, что проволока корда имеет латунное покрытие (латунированная). Число 15 показывает диаметр нити в миллиметрах, умноженный на 100, т.е. 0,15 мм. Следует отметить, что нити в пряди и сердечнике в данном примере (21Л15) имеют диаметр 0,15 мм.

Оба диаметра (например, 49 Л17/25) указываются в том случае, если диаметр нити сердечника в пряди отличается от размера других нитей сорта корда. В данном случае, цифра 49 показывает количество проволок в корде, буква Л означает, что проволока имеет латунное покрытие, а пряди изготовлены из одиночных нитей диаметром 0,17 мм и диаметром нити сердечника – 0,25 мм.

92. СХЕМА СВИВКИ «ИЗНУТРИ-НАРУЖУ»

Машины двойного кручения широко применяются во всем мире при изготовлении металлокорда. Особенностью метода двойного кручения является то, что при образовании винтовой линии проволока подвергается подкручиванию в сторону развития спирали. При этом проволока совершает

один оборот вокруг своей оси на длине шага свивки. На рис. 113 показано подкручивание проволок при их укладке в спираль в процессе свивки на машинах двойного кручения. Принцип свивки металлокорда «изнутри-наружу» показан на рис. 114.

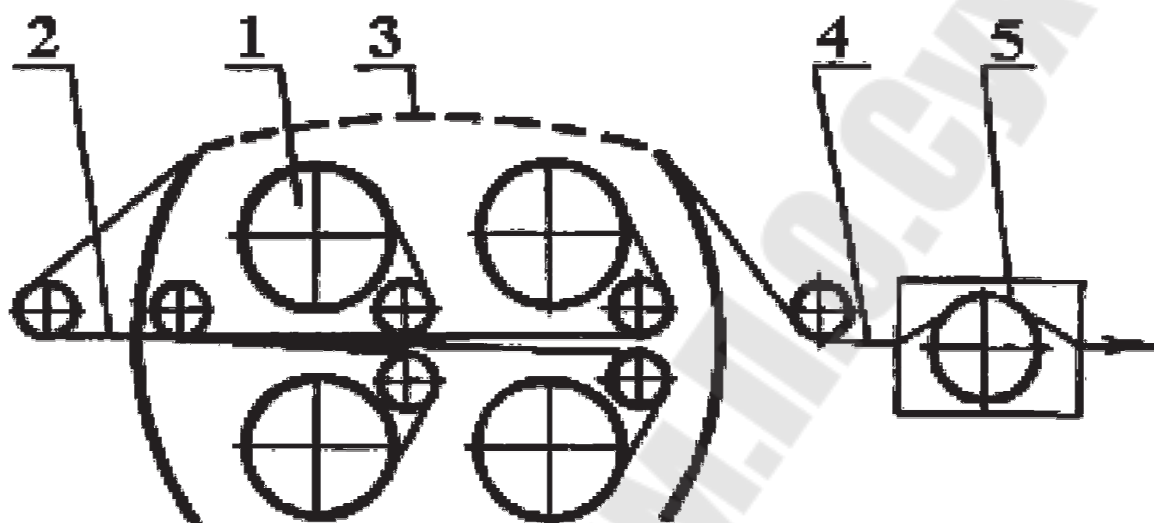


Рис. 114. Кинематическая схема крутильного узла машины двойного кручения с внутренним расположением питающих катушек («изнутри – наружу»): 1 – питающая катушка; 2 – первичная свивка; 3 – «баллон»; 4 – вторичная свивка; 5 – торсионный узел

При свивке на машинах двойного кручения укладка проволок в пучок может быть «неорганизованной» и «организованной». «Неорганизованная» свивка используется при изготовлении пряжей или канатов простых конструкций, например $2xd$; $3xd$; $4xd$; $2 \times 1xd$; $2 \times 2xd$ и т. д., как правило, на машинах с расположением питающих катушек внутри свивочного модуля. «Организованная» свивка применяется при изготовлении металлокорда многослойных конструкций (спиральных, компактных) и с целью снижения габаритных размеров изготавливается на машинах двойного кручения с расположением питающих катушек вне свивочного модуля.

Метод двойного кручения, как более производительный, получает все большее распространение при производстве витых изделий. В то же время метод имеет свои специфические особенности, которые накладывают ряд ограничений в его использовании для конструкций металлокорда на параметры технологии свивки, и выдвигает повышенные требования к качеству металла и способам пластической деформации при изготовлении проволоки.

В табл. 1 приведены ряд технических характеристик машин типа «изнутри-наружу», которые используются на ОАО «БМЗ» при производстве металлокорда.

Таблица 1 – Техническая характеристика канатного оборудования ОАО «БМЗ»

Техническая	Канатные машины			
	TD2/401	TD2/202	TD2/402	TD2/601
Тип машины	TD2/401	TD2/202	TD2/402	TD2/601
Максимальная частота вращения,	6000	6000		4700
Максимальное количество круток,	12 000	12 000		9400
Количество зарядных катушек, шт.	4 x1; 4 x4	2 x2	2 x4; 4 x4	2 x1; 2 x2; 3 x2
Диаметры фланцев зарядных	190	190		190
Мощность двигателя, кВт	5,5; 5,9; 7,5	5,9; 7,5		5,9
Уровень шума, дБ	77	77		77
Тип или диаметр приемной катушки, мм	190; 275; BS40; BS60; BS80/17; BS80/33			

Одним из основных требований при изготовлении металлокорда конструкций является устранение упругих крутящих моментов для плотного расположения проволок в структуре. Плотность структуры можно оценить по поведению элементов корда после их выплетения из корда.

Таким образом, по кривизне проволоки в свитом состоянии и после выплетения ее из металлокорда можно судить об усилении прилегания проволок к центральным слоям. Чем меньше остаточная кривизна выплетенных проволок по сравнению с кривизной этих проволок в металлокорде, тем плотнее структура металлокорда.

93. СХЕМА СВИВКИ «СНАРУЖИ-ВНУТРЬ»

Изменение шага свивки на машине с внешним расположением питающих катушек (рис. 115), аналогично кинематической схеме, показанной на рис. 114. Процесс свивки на машине, изготовленной по схеме «снаружи–вовнутрь», включает размотку проволоки 7 с питающих катушек 1, установленных на стационарном стенде. Проволоки и сердечник подаются к распределительному шаблону 8, а затем – в конус свивки и формирующие плашки 9. Первичная свивка 2 металлокорда с шагом $2t_{м.к}$ осуществляется за счет вращения ротора со скоростью n_p , затем баллонизирующая свитая нить 3 проходит через крутильные диски к ротору 4. На участке ротор направляющий ролик происходит докрутка витой структуры до шага $t_{м.к}$. Для устранения упругих крутящих моментов производится пластическое

кручение торсионным устройством 5 и намотка на приемную катушку 6. При этом проволоки также подкручиваются вокруг своей оси.

В табл. 2 приведены ряд технических характеристик машин типа «снаружи-вовнутрь», которые используются на ОАО «БМЗ» при производстве металлокорда.

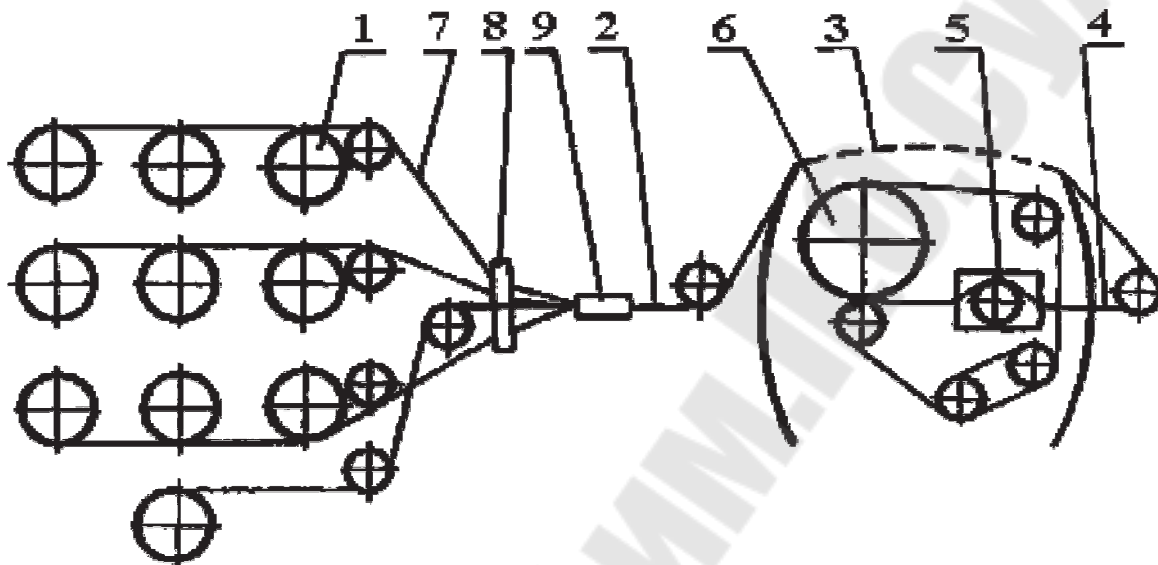


Рис. 115. Кинематическая схема свивочной машины двойного кручения с внешним расположением питающих катушек («снаружи-вовнутрь»): 1 – питающая катушка; 2 – первичная свивка; 3 – «баллон»; 4 – вторичная свивка; 5 – торсионный узел; 6 – приемная катушка; 7 – проволока; 8 – распределительный шаблон; 9 – плашки

Таблица 2 – Техническая характеристика канатного оборудования ОАО «БМЗ»

Техническая характеристика	Канатные машины		
	RI-	RI-10	RI-10
Тип машины			
Максимальная частота вращения, ω	3500	3500	3500
Максимальное количество круток,	7000	7000	7000
Количество зарядных катушек, шт.	18	2 x 7	2 x 18; 3 x 18
Диаметры фланцев зарядных катушек,	190; 275		
Мощность двигателя, кВт	11	11	11
Уровень шума, дБ	77	77	77
Тип или диаметр приемной катушки, мм	190; 275; BS40; BS60; BS80/17; BS80/33		

Еще одной особенностью свивки методом двойного кручения металлокорда с сердечником является необходимость создания значительного

натяжения сердечника при размотке по отношению к натяжению проволок (прядей) наружного повива. Формирование витых структур с центральным элементом (проволока, прядь или слой проволок) методом одинарного кручения не вызывает трудностей. Двойное кручение таких структур сопровождается накоплением избыточной длины центральных элементов на второй стадии свивки и нарушением структуры из-за потери устойчивости от действия огромных сжимающих усилий проволоками (пряжами) наружного повива, повышенной обрывностью, а также неравномерностью распределения нагрузки при эксплуатации металлокорда в шине.

94. ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭМАЛИРОВАННОГО ПРОВОДА

Производство кабельной продукции осуществляется на специальных предприятиях. Производственный цикл начинается с поставки медной катанки на склад исходной заготовки. Катанка поставляется в катушках большого диаметра, затем катушки отправляют на грубое волочение. Грубое волочение, как правило, осуществляют на волочильных станах магазинного типа с накоплением витков на промежуточных тяговых барабанах.

Количество проходов многократного грубого волочения может составлять 10-15.

В связи с высокой плотностью меди из катанки диаметром 7,2-8 мм получают диаметр 1,5 мм. Дальнейшее волочение ограничено упрочнением медной проволоки. После волочения проволоку наматывают в бухты весом ≈ 1 т и транспортируют на участок тонкого волочения и эмалирования.

В современном производстве тонкое волочение и эмалирование объединены в эмаль-агрегаты. На входе эмаль-агрегата находится бухта с проволокой, на выходе – катушки с готовой эмалированной проволокой.

После тонкого волочения проволока имеет диаметр 0,2-0,7 мм, а катушка с готовым проводом имеет вес 70-300 кг.

Рассмотрим схему эмаль-агрегата вертикального расположения (рис. 116).

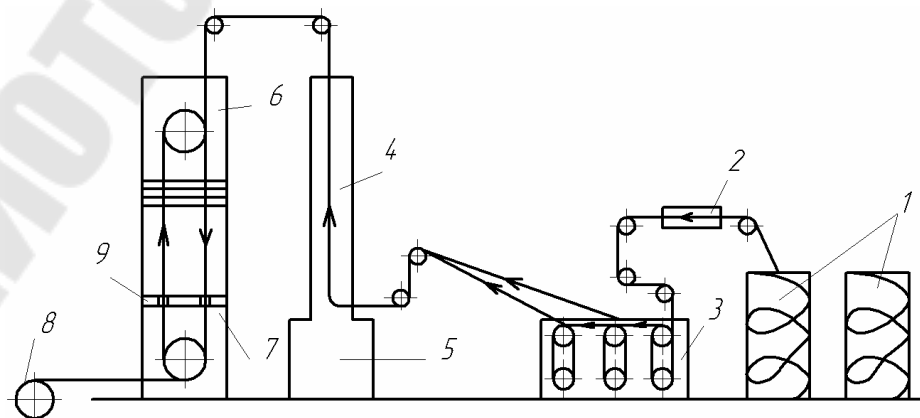


Рис. 116. Схема агрегата для получения эмалированного медного и алюминиевого провода

Исходная заготовка в бухтах (1) с помощью отдающего устройства подается с бухты в печь предварительного отжига (2). В этой печи с помощью газа при температуре 560°C разупрочняют медную проволоку. Высокотемпературный защитный газ нагревает медную проволоку без окисления. Далее проволочная заготовка поступает в волочильный механизм или в волочильную приставку (3). Волочение осуществляется по принципу скольжения и содержит от 13 до 18 проходов. Для отжига также используют водяной пар. Одновременно подается несколько проволочных заготовок, поэтому используется несколько волочильных устройств. После волочения проволока поступает на транспортировочный механизм (4), который подает проволоку к печи отжига (6).

Основное назначение отжига – разупрочнение после волочения. После отжига горячая проволока охлаждают в обессоленной воде. Охлажденная проволока поступает на эмаль-устройство (7), где имеется эмаль-нанесённое устройство (9). Потребление эмали осуществляется из бака (5) и регулирует толщину слоя покрытия. Избыток эмали возвращается обратно в бак. После нанесения каждого слоя эмали провод поступает в зону сушки и спекания при температуре 580°C. Многократное движение проволоки через эмаль с последующей сушкой и спеканием позволяет получить на медной проволоке около 16 слоев эмалированного покрытия.

**ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА
(прокатное и метизное производство)**

**Пособие
для слушателей специальности переподготовки
1-42 01 71 «Металлургическое производство
и материалобработка»
заочной формы обучения**

Составитель Бобарикин Юрий Леонидович

Подписано к размещению в электронную библиотеку
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного
учебно-методического документа 23.03.23.

Рег. № 100Е.
<http://www.gstu.by>