



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

Магнитогорск
2020

УДК 621.771

Рецензенты:

кандидат технических наук,
начальник участка,
ЗАО «Магнитогорский завод прокатных валков»
Н.В. Мазур

доктор технических наук,
профессор кафедры технологий обработки материалов,
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова»
М.И. Румянцев

Составители: Некит В.А., Платов С.И.

Моделирование процессов обработки металлов давлением [Электронный ресурс] : учебное пособие / сост. В.А. Некит, С.И. Платов ; ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». – Электрон. текстовые дан. (0,60 Мб). – Магнитогорск : ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2020. – 1 электрон. опт. диск (DVD-R). – Систем. требования : IBM PC, любой, более 1 GHz ; 512 Мб RAM ; 10 Мб HDD ; MS Windows XP и выше ; Adobe Reader 8.0 и выше ; CD/DVD-ROM дисковод ; мышь. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-5-9967-1857-3

В учебном пособии изложены основы аналитических методов определения напряжений деформации и усилий при обработке металлов давлением. Даны основы инженерных методов анализа параметров волочения, вытяжки, осадки и методов решения двумерных задач методом линий скольжения и характеристик. Представлены примеры решения отдельных задач.

Предназначено для магистров и бакалавров направления 150401 «Машиностроение» направление «Машины и технология обработки металлов давлением», выполняющих курсовые проекты по дисциплинам «Теория ОМД», «Теория и технологические основы процессов обработки металлов давлением».

УДК 621.771

ISBN 978-5-9967-1857-3 © сост. Некит В.А., Платов С.И., 2020
© ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова», 2020

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ	6
1.1. Кристаллическое строение металлов	6
1.2. Понятие об упругой и пластической деформации.....	7
1.3. Особенности пластической деформации поликристаллических тел.....	8
1.4. Явления, сопровождающие процесс пластической деформации.....	9
2. УПРОЧНЕНИЕ ДЕФОРМИРУЕМЫХ СРЕД И ТРЕНИЕ ПРИ ОМД.....	12
2.1. Модель упрочнения при холодной обработке металлов давлением.....	12
2.2. Модель упрочнения при горячей обработке металлов давлением	13
2.3. Трение в обработке металлов давлением	14
3. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ И УСИЛИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ	17
3.1. Задачи аналитического исследования процессов обработки металлов давлением.....	17
3.2. Методика определения усилия деформирования	17
3.3. Определение напряжений на контактной поверхности инженерным методом. Основные упрощающие допущения	18
4. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НОРМАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ОСАДКЕ.....	20
5. НОРМАЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ КОНТАКТА ПРИ ПРОКАТКЕ (С УЧЕТОМ ДОПУЩЕНИЯ О СКОЛЬЖЕНИИ ДЕФОРМИРУЕМОГО МЕТАЛЛА ВДОЛЬ ПОВЕРХНОСТИ КОНТАКТА).....	23
5.1. Геометрический очаг деформации и его параметры	23
5.2. Дифференциальные уравнения контактных напряжений.....	24
5.3. Расчет энергосиловых параметров при прокатке	26
5.4. Методика определения усилия прокатки и среднего контактного давления	26
6. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ	29
6.1. Пример расчета нормальных напряжений при осадке полосы	29
6.2. Пример расчета нормальных напряжений при прокатке полосы	29
7. РАСЧЕТ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОКАТКИ НА НЕПРЕРЫВНОМ СТАНЕ	32
7.1. Методика определения усилия прокатки и среднего контактного давления при прокатке на непрерывном стане	32
7.2. Расчет технологических параметров холодной прокатки полос на непрерывном пятиклетьевом стане	35
8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЯ ВОЛОЧЕНИЯ ЗАГОТОВКИ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ	41
8.1. Общие сведения о процессе волочения	41
8.2. Параметры рабочего инструмента для волочения.....	42
8.3. Упрощенное дифференциальное уравнение равновесия при волочении профиля круглого сечения.....	42
8.4. Возможные допущения при решении задачи о волочении профиля круглого сечения	44
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	45
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	48
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	49

ВВЕДЕНИЕ

Одной из главных задач обработки металлов давлением является определение сопротивления металла пластическому деформированию, внешних и внутренних напряжений, усилий и моментов, необходимых для осуществления операций формоизменения. Без решения этой задачи невозможно правильно выбрать механическое оборудование и прочность рабочего инструмента.

Пластическое формообразование металлов осуществляется путем перераспределения частиц металлов в процессе пластического течения. Технологические процессы, основанные на использовании пластичности металлов, отличаются высокой производительностью, экономичным расходом металлов и улучшают их механические свойства.

Изучение пластического течения металлов основывается на законах механики деформируемых тел. Уравнения движения, условия равновесия и кинематические уравнения имеют локальный характер и являются дифференциальными уравнениями. Кроме того, в случае деформируемых тел должны удовлетворяться дополнительные условия, характеризующие механические свойства металлов.

Пластическое течение вызывается воздействием деформирующих инструментов, которые в большинстве случаев можно считать абсолютно твердыми. В процессах формообразования металлов возникает сложное пластическое состояние, которое характеризуется неоднородными полями напряжений, деформации, температур, деформационным и термическим упрочнением, начальными и граничными условиями.

Решение систем уравнений, описывающих движение и свойства металлов, могло бы дать достаточно полную картину процесса пластического течения металлов. Однако математические трудности приводят к необходимости установления некоторых ограничений. В связи с этим решение становится менее общим, зато позволяет решать конкретные технологические задачи.

Установление целесообразных ограничений и доказательство их допустимости в основном определяет развитие теории пластического деформирования металлов. В настоящее время одномерные теории, основанные на грубом усреднении схемы процессов, оказываются недостаточными. Часто возникает необходимость учитывать локальные эффекты, связанные с напряженным и кинематическим состояниями металлов.

Важной областью приложения теории пластического деформирования металлов, является анализ непрерывных технологических процессов обработки металлов давлением (прокатка, волочение, выдавливание металлов), широко используемых в промышленности. Здесь наибольший интерес представляют предсказание сил, необходимых для осуществления данного процесса обработки, и анализ происходящих деформаций. В задачах этого типа естественно полагать, что в каждой фиксированной точке пространства напряжения и скорости не изменяются.

Активное усилие, которое инструмент оказывает на деформируемое тело, передается в очаг пластической деформации либо в результате непосредственного контакта (прокатка, осадка), либо посредством пластически недеформируемых "жестких" участков (волочение, вытяжка листового металла, прессование, кручение).

В теории обработки металлов давлением находят применение разные, взаимно не исключающие друг друга, методы силового и деформационного анализа технологических процессов: методы совместного решения приближенных уравнений равновесия и пластичности, метод линии скольжения с инженерными упрощениями, метода баланса работ, вариационные методы, экспериментально-аналитические методы.

Эти методы дают приближенное описание наиболее существенных характеристик различных процессов обработки металлов давлением с помощью математических средств и математической символики. Современной формой такого описания или математического моделирования является моделирование на ЭВМ.

Решение задач анализа напряжений, деформаций, усилий для различных процессов обработки металлов давлением состоит из трех этапов:

- составление содержательного описания процесса.
- составление формализованной схемы процесса, замену общих описаний математическими уравнениями
- составление моделирующего алгоритма, позволяющего воспроизвести изучаемый процесс на вычислительных машинах.

Алгоритмом называется точное предписание по выполнению вычислительного процесса, которое через конечное число шагов приводит либо к решению задачи, либо к выводу о невозможности решения.

Методы моделирования позволяют с минимальными затратами разрабатывать и исследовать новые технологические процессы деформации металла, определять необходимые параметры при совершенствовании существующих технологических процессов, при освоении новых марок сталей и типоразмеров продукции.

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

1.1. Кристаллическое строение металлов

Металлы относятся к кристаллическим веществам, имеют *правильное, закономерное* расположение атомов в пространстве. Кристаллы имеют плоские грани. Физические свойства кристаллов зависят от выбранного в кристалле направления, это явление называется *анизотропией*.

Для наглядного представления кристаллического строения через центры атомов проводят воображаемые линии, в результате образуется пространственная модель - *кристаллическая решетка*. В решетке выделяют *элементарную кристаллическую ячейку* – минимальный комплекс атомов, который при многократном повторении в пространстве в трех направлениях образует кристаллическую решетку.

Кристаллизация металлов происходит в три типа кристаллических решеток: кубическую объемно-центрированную ОЦК, кубическую гранецентрированную ГЦК и гексагональную плотноупакованную ГПУ. Эти решетки характеризуются наиболее плотной упаковкой атомов.

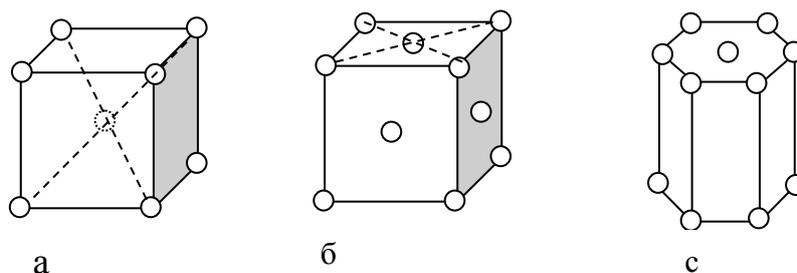


Рис. 1. Элементарные кристаллические ячейки: а – ОЦК, б – ГЦК, с – ГПУ

Расстояние между атомами в кристаллах определяются условиями силового взаимодействия между ними. В положении устойчивого равновесия уравниваются силы притяжения и силы отталкивания электрической природы. Силы притяжения между атомами или силы металлической связи возникают в результате обобществления свободных электронов в кристалле, которые создают «цементирующее» действие. Атомы металлов в кристалле находятся в виде положительно заряженных ионов.

Характерный размер ячейки (длина ребра куба или стороны правильного шестиугольника) называется *параметром или периодом* решетки. У металлов период кристаллической решетки составляет $(1-2)10^{-8}$ м.

Некоторые металлы в зависимости от условий кристаллизации (температуры и давления) могут существовать в разных кристаллических формах. Это явление называется *полиморфизмом или аллотропией*. Различные кристаллические формы одного вещества называются *полиморфными модификациями*. Переход от одной модификации к другой происходит при постоянной температуре. Например, железо при температуре выше 911°

существует в виде γ - железа с решеткой ГЦК, а при температуре ниже 911° - в виде α - железа с решеткой ОЦК.

1.2. Понятие об упругой и пластической деформации

Деформацией называется изменение формы и размеров тела под действием внешних сил. *Упругой* деформацией называется формоизменение, при котором после снятия приложенных сил тело полностью восстанавливает первоначальную форму и размеры. *Пластической* называется деформация, при которой после снятия приложенных сил тело не восстанавливает свою первоначальную форму и размеры.

Упругая деформация есть результат смещения атомов от положения устойчивого равновесия, при этом между соседними атомами возникают дополнительные силы притяжения или отталкивания, которые уравнивают внешние силы. Пластическая деформация происходит при смещении атомов в новое положение устойчивого равновесия, соизмеримое с расстоянием между атомами. Такое перемещение атомов при пластической деформации называют *сдвигом или скольжением*.

Скольжение происходит по определенным плоскостям и направлениям. Плоскости скольжения обладают наибольшей плотностью упаковки атомов и в наибольшей степени удалены друг от друга. Касательные напряжения, необходимые для сдвига атомов вдоль этих плоскостей – минимальны. Пластическое, необратимое скольжение начинается тогда, когда касательное напряжение в плоскости скольжения достигает предельного значения $\tau_{кр}$, которое называют сопротивлением сдвигу.

Я.И. Френкель путем упрощенного расчета определил величину сопротивления сдвигу при скольжении одного ряда атомов кристалла относительно другого

$$\tau_{кр} = 0.16G, \text{ где}$$

G - модуль упругости.

В действительности экспериментальная величина сопротивления сдвигу значительно меньше

$$\tau_{кр} = (10^{-4} - 10^{-5})G.$$

Поэтому современной физической теорией пластической деформации является *теория структурных несовершенств*. В соответствии с этой теорией сопротивление сдвигу при пластической деформации определяется количеством и свойствами дефектов кристаллического строения металлов. Характер и результаты пластической деформации определяются линейной разновидностью дефектов кристаллического строения - *дислокациями*. Существует несколько типов дислокаций: линейные, винтовые, смешанные. Такая модель пластической деформации называется также *дислокационной теорией пластичности*. На рис. 2 изображено сечение кристалла с линейной дислокацией. Главной особенностью дефекта кристаллического строения –

линейной дислокации является наличие *экстраплоскости*. Граница этой плоскости внутри кристалла называется *линией дислокации*. Малая область вокруг дислокации, имеющая наибольшие нарушения правильного взаимного расположения атомов и, следовательно, повышенную потенциальную энергию, называется *ядром* дислокации.

В поперечном сечении размеры ядра дислокации составляют несколько межатомных расстояний. За пределами ядра дислокации нарушения правильного кристаллического строения минимальны и не оказывают существенного влияния на свойства кристалла.

Плоскость, проходящая через линию дислокации перпендикулярно экстраплоскости, называется *плоскостью скольжения*. Под плоскостью скольжения наблюдается растяжение решетки, над ней - сжатие или наоборот.

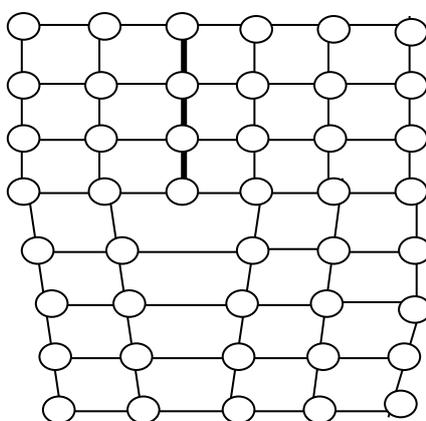


Рис. 2. Кристалл с дефектом кристаллического строения - линейной дислокацией

Важнейшими свойствами дислокаций являются их способность перемещаться под действием относительно небольших сдвигающих напряжений, размножаться в процессе пластической деформации. Кроме того дислокации при их сближении или пересечении взаимодействуют, препятствуют движению друг друга. Дислокационная модель позволяет объяснить низкую реальную прочность металлов по сравнению с теоретической и эффект упрочнения металлов при холодной пластической деформации.

1.3. Особенности пластической деформации поликристаллических тел

В связи с особенностями кристаллизации металлов они представляют собой не единый кристалл (монокристалл), а соединение большого числа малых кристалликов размерами от 10 до 200 мкм – *поликристалл*. Кристаллы неправильной формы в поликристаллическом теле называют *кристаллитами* или кристаллическими *зернами*. Зерна металла разориентированы друг относительно друга на большие углы и имеют границы.

В объеме, значительно превышающем объем отдельных кристалликов, все направления равноправны и свойства металлов вдоль них одинаковы - поликристаллические тела *квазиизотропны*

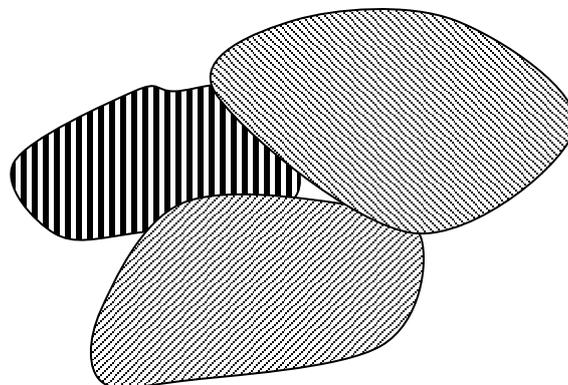


Рис. 3. Схема ориентации решеток в поликристаллическом теле

В поликристалле между кристаллитами имеются области с неправильным расположением атомов - границы зерен, вблизи них свойства зерен отличаются от свойств внутренних частей.

Главная особенность пластической деформации поликристаллических тел состоит во взаимодействии соседних зерен. При пластическом формоизменении происходит не только скольжение атомов внутри кристаллитов, но относительное смещение кристаллитов. В поликристаллическом теле пластическая деформация возникает не во всех зернах одновременно, а в первую очередь в тех из них, которые имеют благоприятную ориентировку плоскостей скольжения относительно внешней деформирующей силы. Остальные кристаллиты включаются в процесс пластической деформации по мере увеличения усилия деформирования и достижения им критического значения.

В результате пластической деформации зерна получают вытянутую форму в направлении интенсивного течения металла. Такая ориентировка деформированных кристаллитов называется *полосчатостью* микроструктуры. Наряду с этим зерна приобретают предпочтительную кристаллографическую ориентировку вдоль главных направлений деформации, которая называется *текстурой*. Возникновение текстуры деформации приводит к *анизотропии* свойств поликристалла.

1.4. Явления, сопровождающие процесс пластической деформации

В процессе пластического деформирования по мере роста степени формоизменения необходимое усилие или напряжение сдвига увеличивается – металл упрочняется. Изменение структуры и механических свойств металла при деформировании при температуре ниже температуры рекристаллизации называется *наклепом* или *нагартовкой*.

В соответствии с теорией дислокаций наклеп вызывается повышением плотности дислокаций, снижением их подвижности при взаимодействии их между собой и с другими препятствиями. Перемещение дислокаций затрудняется, если на их пути встречаются другие дислокации, частицы примеси, границы и субграницы зерен. Влияние одних дислокаций на перемещение других связано с полем упругих напряжений вокруг них, преимущественно внутри ядра дислокации. Движение дислокаций по системам взаимно пересекающихся плоскостей скольжения вызывает образование ячеистой дислокационной структуры. Уже при деформации в 5% дислокации образуют объемные сетки с размерами ячеек, свободных от дислокаций около 3 мкм. С увеличением степени деформации до 30% средний размер ячеек уменьшается до 2 мкм. Плотность дислокаций в скоплениях значительно увеличивается. Образование ячеистой структуры приводит к значительному сокращению длины свободного пробега дислокаций и увеличению интенсивности силовых полей, направленных против движения дислокаций. У недеформированного металла плотность дислокаций составляет 10^8 см^{-2} , у нагартованного металла она достигает 10^{12} см^{-2} . Экспериментально *плотность дислокаций* определяют как количество дислокаций, пересекающих 1 см^2 площади поверхности металла.

Изменение свойств металла с увеличением степени деформации происходит более интенсивно в начальной стадии холодной пластической деформации. При больших деформациях изменение свойств замедляется. Кроме увеличения прочности происходит снижение *пластичности* металла, ударной вязкости, а также меняются другие физические свойства: электрические, магнитные, растворимость в кислоте и др.

Таким образом, наклеп металла связан с увеличением плотности дислокаций и других дефектов – микротрещин в процессе деформации. Плотность металла при увеличении степени деформации не растет, а уменьшается, так как накопление дефектов приводит к *разрыхлению* металла.

Упрочнение при пластической деформации сопровождается поглощением энергии, металл нагревается. В результате металл переходит в неустойчивое (метастабильное) состояние. Переход в более стабильное состояние протекает с практически заметной скоростью только при достаточно высокой *температуре*. Кроме того скорость процесса разупрочнения зависит от *степени деформации* в холодном состоянии.

При низких температурах нагрева после холодной пластической деформации – менее 400°C происходит частичное восстановление свойств нагартованного металла, без существенных изменений в структуре металла. Происходит частичное *снятие упругих искажений* в кристаллической решетке путем перемещения атомов на небольшие расстояния.

При более высоких температурах происходит процесс *рекристаллизации* металла, связанный зарождением новых неискаженных зерен и их последующим ростом. В результате рекристаллизации новые неискаженные зерна занимают весь объем металла и его физические свойства восстанавливаются полностью.

А.А. Бочвар установил, что процессы возврата и рекристаллизации происходят при одинаковых гомологических температурах.

Гомологической температурой называют температуру, составляющую долю температуры плавления по абсолютной шкале.

Процесс *возврата* происходит при сравнительно низких гомологических температурах ($\approx 0,3$ Тпл). При этом наклепанный металл частично разупрочняется. В процессе возврата структура, текстура и другие свойства, характерные для наклепанного металла, практически не изменяются. Разупрочнение связано с релаксацией остаточных напряжений.

Температура начала *рекристаллизации* зависит от степени предшествовавшей холодной деформации: чем больше степень деформации, тем больше искажение микроструктуры, тем при более низких температурах протекает процесс рекристаллизации. Но в основном для металлов обычной чистоты температура начала рекристаллизации составляет 0,4 Тпл.

В процессе рекристаллизации происходит глубокое изменение всех свойств нагартованного металла: он полностью разупрочняется, пластичность повышается до уровня ненаклепанного состояния. Это объясняется тем, что происходит зарождение новых зерен равноосной формы, полосчатость структуры и механическая анизотропия исчезают.

Можно выделить две стадии рекристаллизации: первичную и собирательную. При *первичной* рекристаллизации происходит зарождение и рост новых зерен за счет деформированных зерен. При *собирательной* рекристаллизации происходит рост новых зерен за счет соседних рекристаллизованных зерен. Чем выше температура и больше длительность выдержки при высокой температуре, тем крупнее зерна за счет собирательной рекристаллизации.

При повышении степени деформации в холодном состоянии в металле увеличивается количество искажений кристаллической решетки (плотность дислокаций). Вследствие этого при нагреве растет скорость зарождения центров кристаллизации и скорость роста зерен. При этом скорость зарождения центров кристаллизации растет интенсивнее скорости роста зерен. Поэтому при увеличении степени деформации в холодном состоянии уменьшается размер зерна после нагрева. При малых степенях деформации в холодном состоянии ($\varepsilon=5-10\%$) роста размеров зерен после нагрева до температуры рекристаллизации не происходит. Эту степень деформации называют *критической*.

Величина зерна после холодной пластической деформации и рекристаллизационного отжига зависит от размеров зерна в исходном состоянии до деформации. Связь между ними прямая: чем крупнее зерно в исходном состоянии, тем крупнее оно получается после рекристаллизации.

Получение металла с крупнозернистой структурой нежелательно, т.к. он имеет, как правило, пониженную пластичность. Поэтому при холодной пластической деформации стремятся избегать критических степеней деформации.

2. УПРОЧНЕНИЕ ДЕФОРМИРУЕМЫХ СРЕД И ТРЕНИЕ ПРИ ОМД

2.1. Модель упрочнения при холодной обработке металлов давлением

Стандартные характеристики прочности деформируемых сред (предел текучести σ_T предел прочности σ_b) определяются по результатам испытания материалов на одноосное растяжение как частное от деления нагрузки в критический момент на начальную площадь образца

$$\sigma = \frac{P}{F}. \quad (2.1)$$

При больших пластических деформациях площадь растягиваемой заготовки существенно уменьшается в соответствии с соотношением

$$F = \frac{F_0}{1 + \varepsilon}, \quad (2.2)$$

где ε - относительная деформация удлинения.

Поэтому истинное напряжение растяжения будет значительно выше.

Зависимость между степенью деформации и истинным напряжением называют *кривой упрочнения*.

Для формализации аналитических моделей графические формы кривых упрочнения могут быть аппроксимированы аналитическими зависимостями типа

$$\sigma_T = \sigma_0 \varepsilon^n. \quad (2.3)$$

Опыт показывает, что основным фактором, влияющим на изменение механических характеристик металлов и сплавов в процессе холодной прокатки, является величина суммарной степени обжатия. Химический состав сплавов, микроструктура и термообработка определяют главным образом исходные механические свойства.

Эмпирические кривые аппроксимируют математическими зависимостями типа

$$\sigma_T = \sigma_{T0} + \Delta\sigma \cdot \varepsilon^n, \quad (2.4)$$

$$\sigma_b = \sigma_{b0} + \Delta\sigma \cdot \varepsilon^m, \quad \text{где} \quad (2.5)$$

σ_{T0}, σ_{b0} - предел текучести и предел прочности до деформации,

$\Delta\sigma, m, n$ - постоянные коэффициенты,

ε - суммарное обжатие при прокатке.

Эмпирическим путем и в результате математической обработки полученных результатов получены зависимости изменения механических свойств металлов и сплавов при холодной прокатке. Средняя квадратическая погрешность не превышает 2%.

Константы к эмпирическим формулам для некоторых сталей

Марка стали	σ_{TO}	σ_{bo}	$\Delta\sigma$	$\Delta\sigma_b$	n	m
Ст 2	300	375	30.6	18.6	0.62	0.71
08кп	280	325	34.6	14.8	0.6	0.75
20	375	510	31.6	5.8	0.64	0.98
50	400	675	100	17.4	0.47	0.8

2.2. Модель упрочнения при горячей обработке металлов давлением

Метод определения прочности или сопротивления металлов и сплавов пластической деформации при горячей прокатке, предложенный Зюзиным В.И., получил название метода термодинамических коэффициентов.

Многозначную, функциональную зависимость сопротивления деформации от температуры, скорости и степени деформации представляют в виде:

$$\sigma = \sigma_{od} k_t k_u k_\varepsilon, \text{ где} \quad (2.6)$$

σ_{od} - базисное значение предела текучести, принятое условно при постоянных значениях термомеханических параметров ($t=1000^\circ\text{C}, u=1, \varepsilon=10\%$),

k_t - температурный коэффициент,

k_ε - деформационный (степенной) коэффициент,

k_u - скоростной коэффициент.

Скорость деформации - производная относительной деформации по времени $u = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}$. (2.7)

Величина скорости деформации позволяет учесть степень разупрочнения металла (времени деформирования) при горячей пластической деформации. Средняя скорость деформации при продольной прокатке может быть определена по формуле:

$$u_{cp} = \frac{v\Delta h}{lH}, \text{ где} \quad (2.8)$$

v - скорость выхода металла из валков,

l - горизонтальная проекция дуги захвата,

H - толщина полосы перед входом в валки.

После определения зависимости термодинамических коэффициентов сопротивление деформации может быть определено в виде аналитической зависимости.

$$\sigma = \frac{A\varepsilon^{m_2} u^{m_3}}{e^{m_1 t}} \quad (2.9)$$

Экспериментальные значения сопротивления деформации сталей и сплавов получают при испытаниях на машинах (пластометрах), на которых можно изменять температуру, степень и скорость деформации в исследуемом интервале параметров. Испытание образцов проводят на растяжение и сжатие.

2.3. Трение в обработке металлов давлением

Контактное трение - механическое сопротивление при относительном перемещении двух соприкасающихся тел в плоскости их касания. Сила сопротивления направлена противоположно относительному перемещению тел и называется силой трения.

Трение имеет место во всех процессах обработки металлов давлением и обычно оказывает негативное воздействие: оно является причиной неравномерности течения металла и остаточных напряжений, увеличивает давление металла на инструмент и его износ, расход энергии на деформирование, ухудшает качество поверхности изделия. Однако при прокатке трение является необходимым условием, поскольку усилие деформирования передается от двигателя к полосе посредством трения.

В соответствии с современными физическими представлениями о природе трения сила трения есть результат *молекулярного притяжения* или сварки и *механического зацепления* неровностей.

Трение скольжения характеризуется *коэффициентом трения* f – отношением силы трения T к силе нормального давления на поверхности скольжения P (закон Амонтона-Кулона).

$$f = \frac{T}{P} \quad (2.10)$$

Для научных и практических целей коэффициент трения определяют экспериментальным путем, известно несколько методов, применяемых в разных видах обработки металлов давлением. Путем одновременного измерения нормального давления и силы трения при скольжении металла по инструменту, путем измерения усилия при пластической деформации и последующего расчета по теоретическим формулам, путем измерения изменения формы образцов в процессе пластического деформирования, из условия захвата металла валками и путем определения опережения при прокатке.

Ориентировочно можно считать, что в процессе обработки металлов давлением коэффициент трения изменяется в следующих пределах: при холодной деформации $f = 0,04 - 0,15$, при горячей деформации $f = 0,2 - 0,6$.

Для расчетов силовых параметров обработки металлов давлением применяют несколько *законов* изменения трения при изменении нормального

давления – уравнений для сил трения. Обычно пользуются выражениями для удельной силы трения - касательного напряжения на контактной поверхности. Чаще других используют три закона трения.

1. *Закон Амонтона – Кулона* $\tau = f p$, где p - нормальное контактное давление.

2. *Закон Зибеля* $\tau = k \tau_t$, где τ_t - предел текучести при сдвиге.

3. $\tau = k \tau_t$, $\tau_t = \sigma_t$.

Из теории пластичности известно, что максимальное касательное напряжение не может превышать предела текучести.

Удельная сила трения зависит от сопротивления сдвигу поверхностного слоя металла. Если на поверхность нанесен слой с низким сопротивлением сдвигу (смазочный материал), то скольжение локализуется в слое этого материала. В этом случае величина силы трения определяется свойствами дополнительного материала. По этому признаку различают *сухое* трение, *жидкостное* трение (гидродинамическое трение) и промежуточные виды: *полусухое* и *полужидкостное* трение.

Основное назначение технологического смазывания в процессах обработки металлов давлением - снижение сил трения на контактной поверхности инструмента и металла и уменьшение износа инструмента.

Значение коэффициента трения зависит от многих факторов: материала и состояния поверхности инструмента, механических свойств и температуры обрабатываемого материала, скорости деформирования, технологических смазок и др.

Как правило, при прокатке на *стальных* валках коэффициент трения на 15-20% выше, чем при прокатке на *чугунных* валках. Это объясняется тем, что в структуре чугуна структурные составляющие (ледебурит, цементит, графит) имеют относительно низкую склонность к адгезионному взаимодействию (схватыванию).

С увеличением *шероховатости поверхности*, высоты неровностей коэффициент трения растет, причем значительно в 1,5-2 раза. Налипание (наваривание) частиц металла на деформирующий инструмент увеличивает шероховатость поверхности. При необходимости увеличить коэффициент трения прибегают к закруглению поверхности инструмента (проводят насечку зубилами, вырубляют канавки, накатывают зубчатыми роликами).

С повышением *температуры* металла до 700-1000° коэффициент трения растет, при последующем увеличении температуры более 1000° коэффициент трения уменьшается. Такой характер температурной зависимости объясняется свойствами окалины.

С увеличением *скорости скольжения* металла по поверхности инструмента коэффициент трения понижается. Существенное снижение коэффициента трения при горячей прокатке происходит при малых скоростях прокатки в интервале 2-3 м/сек.

Эффективность *смазывания* зависит от вязкости смазочного материала и содержания в нем поверхностно активных веществ ПАВ с увеличением

вязкости растет толщина смазочного слоя, что приводит к уменьшению коэффициента трения. В основном применяют смазочные материалы в виде минеральных и растительных масел или в виде водно-масляных смесей (эмульсий). Минеральные масла почти не содержат поверхностно-активных веществ и обладают низкой (почти в два раза) смазочной способностью. Поверхностно активными веществами являются *жирные кислоты*: стеариновая, олеиновая, рицинолевая, пальмитиновая, линолевая и их соли и *натуральные жиры* (растительные и животные): касторовое, пальмовое, рапсовое, сурепное, хлопковое, маисовое, вазелиновое, веретенное, саломас масла.

Порошкообразные смазочные материалы - мыла в виде порошка или стружки, графит применяют в виде добавки к маслам и в виде водной суспензии. Стекло в виде порошка или ваты применяют при горячей обработке металлов давлением.

При выборе смазочных материалов необходимо принимать во внимание дополнительные требования к ним. Смазка должна легко наноситься на прокатываемую полосу в процессе деформирования и легко удаляться после его окончания, не вызывать коррозии металла и образования коксовых и зольных остатков на поверхности полосы после термической обработки. Смазка должна иметь высокие адгезионные качества, быть экономичной и не токсичной.

3. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ И УСИЛИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Аналитический метод исследования объектов состоит в расчленении целого на составные части, при этом исследуемые объекты подвергаются фактическому расчленению или мысленно расчленяются посредством логических абстракций. Аналитические методы основаны на замене исследования реального физического объекта *математической моделью*, поведение которой с достаточной точностью отражает поведение объекта.

Модель процесса или объекта это *упрощенное* представление о действительном процессе или объекте. Некоторые исходные величины, входящие в модель (сопротивление деформации σ_t , силы контактного трения τ_k), определяются путем *экспериментальных* исследований и, следовательно, имеют ограниченную точность. Таким образом, ошибки, связанные с упрощенным описанием процесса, накладываются на ошибки, связанные с неточностью описания механических свойств деформируемого материала. Если ошибки велики, то точность моделирования может оказаться низкой, это оценивается экспериментальной проверкой.

3.1. Задачи аналитического исследования процессов обработки металлов давлением

При разработке технологических процессов обработки металлов давлением, выборе и проектировании механического оборудования необходимо знать *усилие деформирования*. Оно определяет необходимую прочность оборудования, мощность электродвигателя, работу, которую требуется затратить на деформирование. В некоторых случаях необходимо знать *распределение напряжений* на контактной поверхности и распределение *деформаций* по объему тела. Оно определяет неравномерность деформации тела и, следовательно, качество готовой продукции. Деформирующее усилие может передаваться в зону деформации или воздействием инструмента на поверхность контакта, (штамповка, прокатка), или через участки тела, деформирующиеся упруго (волочение, прессование).

Для определения деформирующих усилий и деформаций в процессе формоизменения применяют *аналитические и экспериментальные* методы.

3.2. Методика определения усилия деформирования

Аналитическим методом усилие деформирования можно определить, если известны нормальные и касательные *напряжения* в каждой точке поверхности контакта металла с инструментом или на границе зоны пластической деформации. Величина усилия деформирования зависит также от формы и размеров *поверхности контакта*.

Усилие деформирования определяют, проектируя составляющие нормальных и касательных напряжений на направление действующего рабочего усилия и суммируя их по всей контактной поверхности.

$$P = \iint_F \sigma_n dF + \iint_F \tau_k dF_\tau$$

dF - проекция элементарного участка контактной поверхности на плоскость, перпендикулярную движению инструмента,

dF_τ - проекция элементарного участка контактной поверхности на плоскость, параллельную движению инструмента.

Результаты расчета представляются в виде формул, содержащих геометрические размеры деформируемых тел, коэффициенты трения f , сопротивление деформации σ_T и др.

Инженерный метод является самым простым из аналитических методов и при этом позволяет достигать достаточной точности

$$P = f(b, h, f, \sigma_T)$$

В инженерных расчетах часто определяют не полное усилие деформирования, а удельное усилие - частное от деления полного усилия на площадь проекции контактной поверхности на плоскость, перпендикулярную направлению полного усилия. В свою очередь, сопротивление пластической деформации, коэффициент трения определяют с учетом их зависимости от температуры, скорости деформации и других условий.

3.3. Определение напряжений на контактной поверхности инженерным методом. Основные упрощающие допущения

В технической литературе его называют расчетом по приближенным уравнениям равновесия и условию пластичности, методом тонких сечений, методом плоских сечений, методом осреднения напряжений по сечению очага деформации. Метод разработан в 20-30г. 20 века и состоит в составлении упрощенных уравнений равновесия для каждого вида обработки металлов давлением (прокатки, волочения, прессования и др.) и решении их совместно с уравнением пластичности в главных напряжениях.

При решении задач инженерным методом пользуются рядом упрощающих допущений.

1. Задача сводится к плоской или осесимметричной.

2. Распределение напряжений определяют только для контактной поверхности. В соответствии с принятыми допущениями невозможно определить распределение напряжений внутри тела.

3. Распределение нормальных напряжений вдоль одной из координат осредняют - признается их зависимость только от одной координаты. В результате уравнения равновесия представляются одним обыкновенным дифференциальным уравнением. Касательные напряжения вдоль оси осреднения принимают распределенными по линейному закону.

4. Предполагается, что в выбранной системе координат оси незначительно отклоняются от главных осей и, следовательно, условие пластичности выражается в главных напряжениях.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \beta \sigma_s$$

4. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НОРМАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ОСАДКЕ

Осадкой называется технологическая операция, при которой увеличивается сечение заготовки, перпендикулярное к активной силе и уменьшается размер по высоте. При осадке рабочий инструмент полностью перекрывает заготовку, деформация происходит без внешних зон (жестких концов). Операция осадки применяется как самостоятельная операцияковки и как метод технологического испытания металла с целью определения механических свойств и пластичности металла (ковкости).

При осадке высоких заготовок $H \geq 2,5V$ возможна потеря устойчивости и появление продольного изгиба. При больших обжатиях происходит образование выпуклости свободных боковых граней, которые деформируются в условиях жесткой схемы деформации. Это накладывает ограничение на степень осадки

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{H_0} \leq 0,5 \quad (4.1)$$

Рассмотрим осадку полосы шириной $2b$, высотой $2h$, неограниченной длины между плоскими шероховатыми плитами. Начало координат расположим в центре заготовки (рис.1).

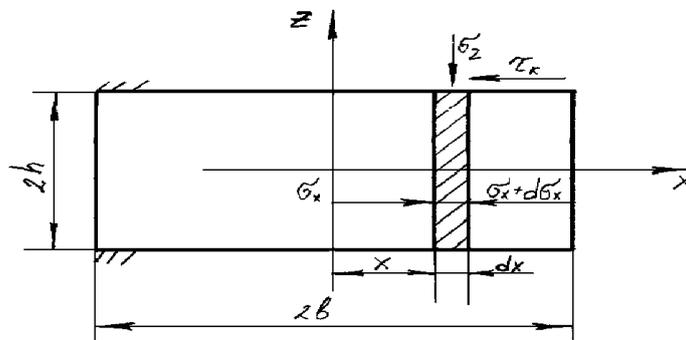


Рис. 4. Схема осадки полосы

Вследствие симметрии полосы относительно оси Z достаточно определить напряжения для правой части сечения. Рассмотрим условие равновесия выделенного элемента, проецируя все силы на ось X , т.е.

$$\sigma_x \cdot 2h - (\sigma_x + d\sigma_x)2h - 2 \cdot \tau_k \cdot dx = 0 \quad (4.2)$$

После преобразования получим

$$\frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{\tau_k}{h} \quad (2.3)$$

Уравнение пластичности с учетом допущения об использовании главных напряжений будет:

$$\sigma_x - \sigma_z = 2\tau_s \quad (2.4)$$

После дифференцирования уравнение пластичности будет

$$d\sigma_x = d\sigma_z \quad (2.5)$$

Подставив (2.5) в (2.3) получим уравнение контактных напряжений при осадке

$$\frac{d\sigma_z}{dx} + \frac{\tau_k}{h} = 0 \quad (2.6)$$

Так как касательное напряжение на контактной поверхности τ_k обусловлено трением об инструмент можно принять

$$\tau_k = f \cdot \sigma_z. \quad (2.7)$$

f – коэффициент трения.

После разделения переменных, интегрирования и учета граничного условия ($x = b, \sigma_z = 2\tau_s$), получим формулу для определения контактных напряжений

$$\sigma_z = 2\tau_s \cdot \exp\left[\frac{f}{h}(b-x)\right]. \quad (2.8)$$

Суммируя контактные напряжения, можно определить полное давление на единицу длины полосы и среднее давление:

$$P = 2 \int_0^B \sigma_x dx \quad (2.9)$$

$$P_{cp} = \frac{P}{2b} \quad (2.10)$$

Можно заметить, что нормальное напряжение, а следовательно, и касательные увеличиваются по мере перехода от края полосы к оси симметрии. При пластической деформации абсолютная величина касательного напряжения не может быть больше $\tau_k = \tau_s$. Следовательно на контактной поверхности есть

точка b , в которой касательное напряжение достигает предела. Следуя решению (2.8), координата x_b может быть определена по формуле.

$$x_b = 0,5 - \psi h, \quad (2.11)$$

где $\psi = \frac{\ln(2f)}{f}$

При $f = 0,5$ касательное напряжение достигает предельного значения уже на краю заготовки.

Уравнение равновесия и пластичности при условии постоянства касательных напряжений $\tau_k = \tau_s$ будет

$$\frac{d\sigma_z}{dx} + \frac{\tau_s}{h} = 0 \quad (2.12)$$

После интегрирования

$$\sigma_z = \sigma_b - 2\tau_s \frac{x_b - x}{h} \quad (2.13)$$

т.е. эпюра нормальных напряжений представляется прямой линией.

Кроме того, вблизи оси симметрии допускают линейное падение касательных напряжений τ_k с плавным переходом через 0 при $x = 0$. На контактной поверхности имеется точка c , в которой контактные касательные напряжения начинают уменьшаться.

Таким образом, при осадке полосы эпюры напряжений разделяются в общем случае на три зоны (рис.2):

Зона «скольжения», при этом нормальные напряжения σ_z определяются по уравнению (2.8).

Зона «торможения», где нормальные напряжения изменяются по линейному закону (2.13).

Зона «прилипания», где нормальные напряжения изменяются по параболическому закону

$$\sigma_z = \sigma_c - \tau_s \frac{h^2 - x^2}{h^2} \quad (2.14)$$

5. НОРМАЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ КОНТАКТА ПРИ ПРОКАТКЕ (С УЧЕТОМ ДОПУЩЕНИЯ О СКОЛЬЖЕНИИ ДЕФОРМИРУЕМОГО МЕТАЛЛА ВДОЛЬ ПОВЕРХНОСТИ КОНТАКТА)

5.1. Геометрический очаг деформации и его параметры

Разность толщины полосы при входе h_0 и выходе h_1 из валков называется абсолютным обжатием $\Delta h = h_0 - h_1$

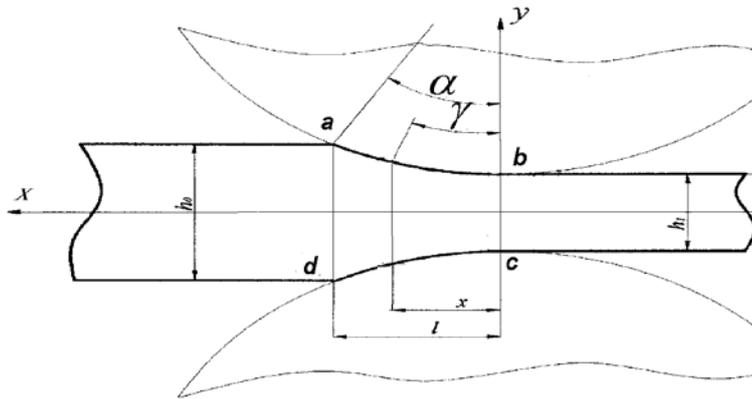


Рис. 5. Геометрический очаг деформации

Дуга ab называется дугой захвата, горизонтальная проекция дуги захвата называется длиной очага деформации ℓ .

Центральный угол, соответствующий дуге захвата называется углом захвата.

$$\cos \alpha = 1 - \frac{\Delta h}{D} \quad (3.1)$$

При небольших углах захвата можно принять

$$\alpha \approx \sin(\alpha) \quad \alpha = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}$$

Горизонтальную проекцию дуги захвата можно определить из равенства

$$\ell = R \times \sin(\alpha) \approx \sqrt{R \times \Delta h} \quad (3.2)$$

При установившемся процессе прокатки нормальные и касательные силы действуют по всей дуге захвата. Контактные силы трения в начале и конце дуги захвата имеют противоположное направление.

Вертикальное сечение, в котором контактные силы трения изменяют направление, называют нейтральным сечением. Соответствующий угол также называют нейтральным углом и обозначают γ . Нейтральное сечение делит зону деформации на зону отставания и зону опережения.

Нейтральный угол определяют, составляя уравнение равновесия сил на контактной поверхности. Если принять, что контактное давление по дуге захвата постоянно, а силы трения

$$\tau_x = \mu \times p, \text{ то}$$

$$\sin \gamma = \frac{\sin \alpha}{2} - \frac{1 - \cos \alpha}{2 \times \mu} + \frac{T_1 - T_0}{4 \times p \times \mu \times b \times R} \quad (3.3)$$

5.2. Дифференциальные уравнения контактных напряжений

Для определения усилия прокатки и моментов, необходимых для вращения валков, надо знать закономерности распределения контактных напряжений по дуге захвата.

Рассмотрим случай прокатки, когда длина дуги захвата значительно превосходит среднюю толщину прокатываемой полосы.

Предположим, что уширение отсутствует, т.е. будем рассматривать двумерную задачу (плоская деформация).

Предположим, в соответствии с гипотезой «плоских сечений», что вертикальные элементы, выделенные в очаге деформации, в процессе деформирования не искривляются.

Теоретически распределение нормальных контактных напряжений по длине контактной поверхности определяется решением дифференциального уравнения, которое выводится из равенства горизонтальных проекций сил, действующих на элементарный столбик металла в очаге деформации.

Выделим в очаге деформации (рис. 4) элемент $abcd$, ограниченный цилиндрическими поверхностями валков ab и cd и двумя плоскостями, перпендикулярными направлению прокатки ac и bd . Толщину элемента dx примем бесконечно малой.

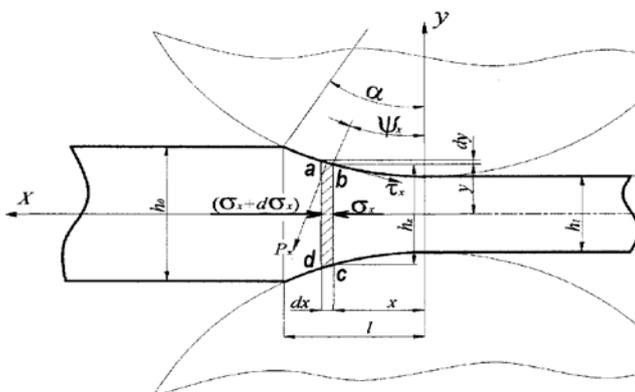


Рис. 6. Схема прокатки полосы

Рассмотрим, условие равновесия выделенного элемента, проектируя все силы, действующие на него, на ось x .

Сумма горизонтальных проекций всех сил, действующих на элемент

$$\Sigma x = (\sigma_x + d\sigma_x)(h_x + dh_x) - \sigma_x h_x - 2p_x \operatorname{tg} \psi_x dx + 2\tau_x dx = 0 \quad (3.4)$$

$$dx = \frac{dh_x}{2\operatorname{tg} \psi_x}$$

После преобразования, пренебрегая бесконечно-малыми второго порядка, получим

$$d\sigma_x - (p_x - \sigma_x) \frac{dh_x}{h_x} + \frac{\tau_x}{\operatorname{tg} \psi_x} \frac{dh_x}{h_x} = 0 \quad (3.5)$$

Примем, что главные оси напряжений в рассматриваемом элементе соответствуют вертикальным и горизонтальным осям. Условие пластичности запишем в виде

$$P_x - \sigma_x = 2\tau_s \quad (3.6)$$

Уравнение равновесия будет

$$d(p_x - 2\tau_s) = (2\tau_s \pm \frac{\tau_x}{\operatorname{tg} \psi_x}) \frac{dh_x}{h_x} \quad (3.7)$$

Знак $+\tau_x$ соответствует направлению касательных напряжений в зоне отставания. Знак $-\tau_x$ - в зоне опережения.

Если пренебречь изменением сопротивления деформации в результате наклепа, то уравнение контактных напряжений будет

$$dp_x = (2\tau_s \pm \frac{\tau_x}{\operatorname{tg} \psi_x}) \frac{dh_x}{h_x} \quad (3.8)$$

$$dh_x = dx 2\operatorname{tg} \psi_x \quad (3.9)$$

Интегрирование дифференциального уравнения (3.8) с учетом $\sigma_1 = 2\tau_s + \sigma_3$ при $x = 0$ и $x = L$ дает формулу давления на валки А.И.Целикова:

$$\text{- для зоны опережения } P_n = \frac{2 * \tau_s}{\delta_0} \left((\zeta_0 * \delta_0 - 1) * \left(\frac{h_0}{h_{x0}} \right)^{\delta_0} + 1 \right) \quad (3.10)$$

$$\text{- для зоны отставания } P_n = \frac{2 * \tau_s}{\delta_1} \left((\zeta_1 * \delta_1 + 1) * \left(\frac{h_{x1}}{h_1} \right)^{\delta_1} - 1 \right) \quad (3.11)$$

$$\text{где } \delta_0 = \frac{\mu}{\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha + \gamma}{2}\right)}; \quad \delta_1 = \frac{\mu}{\operatorname{tg}\left(\frac{\gamma}{2}\right)}; \quad (3.12)$$

Анализ закона распределения контактных напряжений по дуге захвата показывает, что они зависят от коэффициента трения μ , высоты прокатываемой полосы h , величины обжатия, диаметра валков R_0 и натяжения прокатываемого металла при входе в валки ξ_0 и выходе из них ξ_1 .

5.3. Расчет энергосиловых параметров при прокатке

Для выполнения различных операций путем формоизменения, необходимо решить множество задач, но среди главных задач в среде обработки металлов давлением будет являться определение сопротивления металла пластической деформации, а также внешних и внутренних напряжений, моментов и усилий, востребованных для выполнения операций формоизменения. Не имея решения данной задачи, не получится и выбрать достаточную прочность рабочего инструмента и технологическое оборудование.

Пластическое течение металлов и их деформация изучаются на основе законов механики деформируемых тел. Уравнения равновесия, движения, и кинематические уравнения относятся к дифференциальным уравнениям, и имеют локальный характер. Существуют и дополнительные условия, они характеризуют определенные механические свойства деформируемых тел.

Деформирующими инструментами, которые в большинстве случаев можно считать абсолютно твердыми, вызывается пластическое течение. В большинстве случаев правильное формоизменение металла зависит от таких параметров как: неоднородные поля напряжений и деформаций, температуры, деформационное и термическое упрочнение, начальное и граничное условие.

Математические трудности решения систем уравнений, которые описывают движение и свойства металлов, приводят к ограничениям, таким образом, решение становится менее общим, однако позволяет решать конкретные технологические задачи.

Анализ непрерывных технологических процессов обработки металлов давлением, является одной из основных областей теории пластического деформирования металла, он достаточно широко используется в промышленности.

5.4. Методика определения усилия прокатки и среднего контактного давления

Распределение нормальных напряжений по поверхности контакта можно принять в соответствии с законом А.И. Целикова:

В зоне отставания:

$$P_{x0} = \frac{\sigma_m}{\delta_0} \left[(\xi_0 \cdot \delta_0 - 1) \left(\frac{h_0}{h_x} \right) + 1 \right] \quad (3.1)$$

В зоне отставания:

$$P_{x1} = \frac{\sigma_m}{\delta_1} \left[(\xi_1 \cdot \delta_1 - 1) \left(\frac{h_u}{h_1} \right) + 1 \right] \quad (3.2)$$

Где $\delta = \frac{2 \cdot f \times l}{\Delta h}$

f – коэффициент трения.

l – длина очага пластической деформации.

$\Delta h = H - h$ абсолютное обжатие

h_0, h_1 – толщина полосы до и после прокатки.

ξ_0, ξ_1 – коэффициент заднего и переднего натяжений.

Для определения предела текучести σ_m расчетным путем кривые упрочнения аппроксимированы математическими выражениями типа:

$$\sigma_m = \sigma_{m0} + a \cdot \varepsilon_\Sigma^n$$

Где σ_m – предел текучести отожженного металла, МПа.

ε_Σ – суммарное относительное обжатие, %

a, n – эмпирические коэффициенты.

Средний предел текучести определяют как среднее арифметическое величин пределов текучести перед входом и после выхода из очага деформации.

С целью упрощения теоретического решения общее решение находят для случая прокатки без натяжения. Полное усилие прокатки представляют в виде равнодействующей вертикальных проекций сил нормального давления и сил трения. Суммирование проводят отдельно для зон опережения и отставания.

Если учесть что в нейтральном сечении, при $\Delta h = h_n$ нормальное давление в зоне опережения и отставания одинаково, то можно определить неизвестное значение h_n :

$$\frac{h_n}{h_1} = \left[\frac{\left[\frac{1 + \sqrt{1 + (\delta^2 - 1) \cdot \left(\frac{h_0}{h_1} \right)^\delta}}{\delta + 1} \right]^{\frac{1}{\delta}}}{\left[\right]} \right] \quad (6)$$

Формула для среднего контактного давления:

$$\frac{P}{\sigma_m} = \left[\frac{2 \cdot h \cdot \frac{h_n}{h_1} \cdot \left(\frac{h_n}{h_1} \right)^\delta - 1}{(H - h) \cdot (\delta - 1)} \right] \quad (7)$$

Большие контактные давления на поверхности валков приводят к возникновению местной упругой деформации валков – радиального сплющивания. В результате увеличивается длина очага деформации. Длину

очага деформации с учетом упругого сплющивания можно приближенно определить по формуле:

$$L = \sqrt{R \cdot (H - h) + x^2} + x, \quad (8)$$

где $x = \frac{p \cdot R'}{95000}$,

Расчет длины очага деформации следует вести итерационным методом, поскольку величина среднего контактного давления изначально неизвестна и зависит от длины очага деформации.

Увеличение длины очага деформации изменяет форму контактной поверхности. Если допустить, что поверхность валков в очаге деформации остается цилиндрической, то можно рассчитать условный диаметр валка с учетом радиального сжатия и угол захвата.

$$Rc = \frac{l_c}{h_0 - h} \quad (9)$$

Если прокатка ведется с натяжением, то его влияние учитывают с помощью коэффициента:

$$n\sigma'' = \left(1 - \frac{\sigma_0 + \sigma_1}{2 \cdot p} \right) \quad (10)$$

где σ_0, σ_1 – напряжение натяжения переднего и заднего концов полосы.

6. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

6.1. Пример расчета нормальных напряжений при осадке полосы

Исходные данные для расчетов приведены в приложении 1.

Таблица 2

Исходные данные

μ	H	B	τ_s	σ_s
0,35	18	140	41,2	82,4

$$\sigma_z = 2\tau_s \cdot \exp\left[\frac{f}{H}(B/2 - x)\right].$$

Таблица 3

Результаты расчетов

x	0	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70
σ_z	369,6	322,6	281,5	245,7	214,4	187,1	163,3	142,5	124,4	108,5	94,7

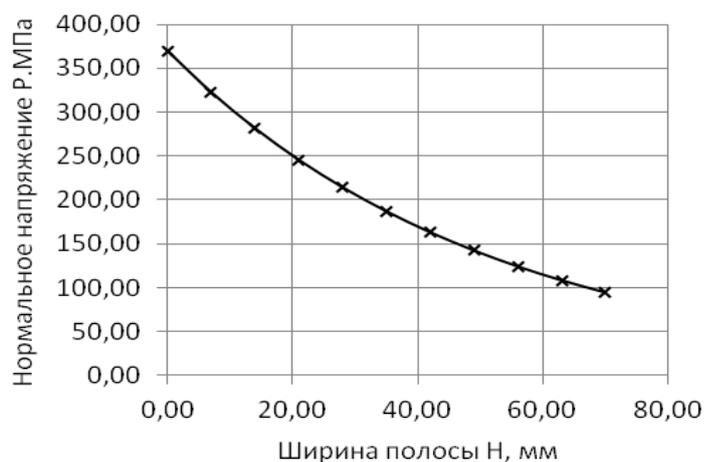


Рис. 7. Эпюра нормальных напряжений

6.2. Пример расчета нормальных напряжений при прокатке полосы

Исходные данные для расчетов приведены в приложении 2.

Угол захвата

$$\alpha = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}$$

Горизонтальная проекция дуги захвата

$$L = R \times \sin(\alpha) \approx \sqrt{R \times \Delta h}$$

Нейтральный угол

$$\sin \gamma = \frac{\sin \alpha}{2} - \frac{1 - \cos \alpha}{2 \times \mu}$$

Высота полосы в зоне опережения и отставания

$$h_{x0} = h_0 - 2 \cdot \Delta x \cdot \tan\left(\frac{\alpha + \gamma}{2}\right)$$

$$h_{x1} = h_1 + 2 \cdot (L - \Delta x) \cdot \tan\left(\frac{\gamma}{2}\right)$$

Давление металла на валки А.И. Целикова:

- для зоны опережения

$$p_{x0} = \frac{2 * \tau_s}{\delta_0} \left((\zeta_0 * \delta_0 - 1) * \left(\frac{h_0}{h_{x0}} \right)^{\delta_0} + 1 \right)$$

- для зоны отставания

$$p_{x1} = \frac{2 * \tau_s}{\delta_1} \left((\zeta_1 * \delta_1 + 1) * \left(\frac{h_{x1}}{h_1} \right)^{\delta_1} - 1 \right)$$

$$\text{где } \delta_0 = \frac{\mu}{\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha + \gamma}{2}\right)}; \quad \delta_1 = \frac{\mu}{\operatorname{tg}\left(\frac{\gamma}{2}\right)};$$

$$\Delta x = L/9$$

Исходные данные и результаты расчета нормальных контактных напряжений при прокатке

Таблица 4

Исходные данные

μ	0,1	τ	140	ξ_0	0,885
h_0	2	B	1000	ξ_1	0,964
h_1	1,48	α	0,0416	L	12,486
σ_0	32	γ	0,0165	Δx	1,387
σ_1	10	δ_0	3,347		
R	300	δ_1	12,136		

Таблица 4

Результаты расчетов

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Δx_i	0,00	1,39	2,77	4,16	5,55	6,94	8,32	9,71	11,10	12,49
h_{x0}	2,00	1,92	1,84	1,76	1,68	1,60	1,52			
h_{x1}						1,57	1,55	1,53	1,50	1,48
p_{x0}	248,0	273,4	304,0	341,1	386,6	443,0	513,6			
p_{x1}						584,0	484,9	400,9	329,8	269,9

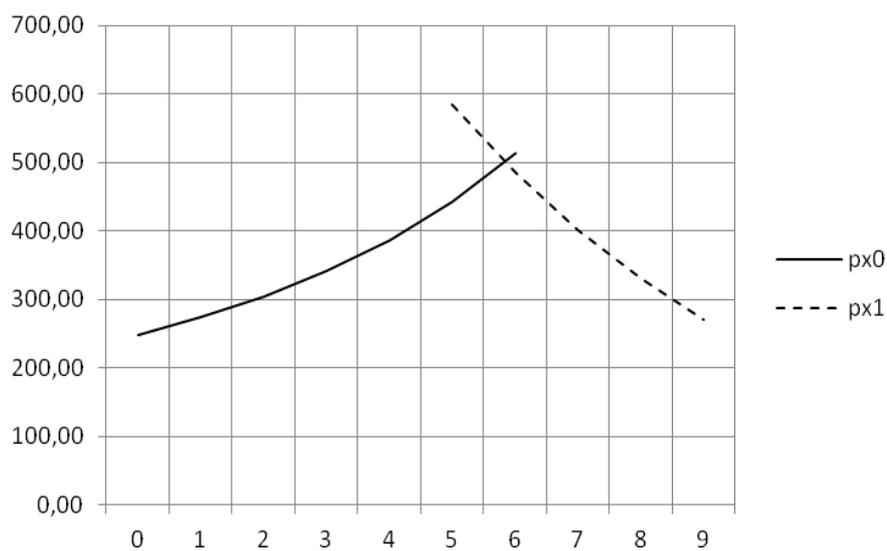


Рис. 8. Эпюра нормальных напряжений при прокатке

7. РАСЧЕТ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОКАТКИ НА НЕПРЕРЫВНОМ СТАНЕ

Для выполнения различных операций путем формоизменения, необходимо решить множество задач, но среди главных задач в среде обработки металлов давлением будет являться определение сопротивления металла пластической деформации, а также внешних и внутренних напряжений, моментов и усилий, востребованных для выполнения операций формоизменения. Не имея решения данной задачи, не получится и выбрать достаточную прочность рабочего инструмента и технологическое оборудование.

Пластическое течение металлов и их деформация изучаются на основе законов механики деформируемых тел. Уравнения равновесия, движения, и кинематические уравнения относятся к дифференциальным уравнениям, и имеют локальный характер. Существуют и дополнительные условия, они характеризуют определенные механические свойства деформируемых тел.

Деформирующими инструментами, которые в большинстве случаев можно считать абсолютно твердыми, вызывается пластическое течение. В большинстве случаев правильное формоизменение металла зависит от таких параметров как: неоднородные поля напряжений и деформаций, температуры, деформационное и термическое упрочнение, начальное и граничное условие.

Математические трудности решения систем уравнений, которые описывают движение и свойства металлов, приводят к ограничениям, таким образом, решение становится менее общим, однако позволяет решать конкретные технологические задачи.

Анализ непрерывных технологических процессов обработки металлов давлением, является одной из основных областей теории пластического деформирования металла, он достаточно широко используется в промышленности.

7.1. Методика определения усилия прокатки и среднего контактного давления при прокатке на непрерывном стане

Распределение нормальных напряжений на поверхности контакта можно принять в соответствии с законом А.И. Целикова:

$$\begin{aligned} & \text{в зоне отставания} \\ P_{x1} &= \frac{\sigma_1}{\delta} \left[(\xi_0 \cdot \delta - 1) \left(\frac{H}{h_x} \right)^\delta + 1 \right]; \end{aligned} \tag{7.1}$$

$$\begin{aligned} & \text{в зоне опережения} \\ P_{x2} &= \frac{\sigma_1}{\delta} \left[(\xi_1 \cdot \delta + 1) \left(\frac{h_x}{h} \right)^\delta - 1 \right] \end{aligned} \tag{7.2}$$

$$\delta = \frac{2 \cdot f \cdot l}{\Delta h},$$

f - коэффициент трения;

$l = \sqrt{\Delta h \cdot R}$ - длина очага пластической деформации;

H, h_1 - толщина полосы до и после прокатки;

ξ_0, ξ_1 - коэффициенты заднего и переднего натяжений.

Для определения предела текучести σ_t расчетным путем кривые упрочнения аппроксимированы математическими выражениями типа

$$\sigma_t = \sigma_{t0} + a \cdot \xi_{\Sigma}^n, \quad (7.3)$$

где

σ_t - предел текучести отожженного металла, МПа;

ξ_{Σ} - суммарное относительное обжатие, %;

a, n - эмпирические коэффициенты.

Средний предел текучести определяют как среднее арифметическое величин пределов текучести перед входом и после выхода из очага деформации.

С целью упрочнения теоретического решения общее решение находят для случая прокатки без натяжения. Полное усилие прокатки представляют в виде равнодействующей вертикальных проекций сил нормального давления и сил трения. Суммирование проводят отдельно для зон опережения и отставания.

$$P = b_{cp} \int_{x_n}^{x_1} P_{x1} (\cos(\varphi) + f \sin(\varphi)) \frac{dx}{\cos(\varphi)} + b_{cp} \int_{x_m}^{x_1} P_{x2} (\cos(\varphi) - f \sin(\varphi)) \frac{dx}{\cos(\varphi)}$$

где b_{cp} - средняя ширина прокатываемой полосы;

h_n - высота полосы в нейтральном сечении.

Поскольку произведение $f \cdot \operatorname{tg} \varphi$ - мало по сравнению с единицей им можно пренебречь и принять

$$dx = \frac{l \cdot dh}{\Delta h},$$

где Δh - абсолютное обжатие.

В результате интегрирования получим:

$$P = \sigma_t \cdot b_{cp} \cdot \frac{l}{\Delta h} \cdot \frac{h_n}{\delta} \left[\left(\frac{H}{h_n} \right)^{\delta} + \left(\frac{h_n}{h} \right) - 2 \right]. \quad (7.5)$$

Если учесть, что в нейтральном сечении, при $h_x = h_n$, нормальное давление в зоне опережения и отставания одинаково

$$(\delta - 1) \cdot \left(\frac{H}{h_n}\right)^\delta + 1 = (\delta + 1) \cdot \left(\frac{h_n}{h}\right)^\delta - 1,$$

то можно определить неизвестное значение h_n

$$\left(\frac{h_0}{h_n}\right)^\delta = \frac{1}{1-\delta} \left[(\delta + 1) \left(\frac{h_n}{h_1}\right)^\delta - 2 \right]; \quad (7.6)$$

$$\frac{h_n}{h_0} = \left(\frac{1 + \sqrt{1 + (\delta^2 - 1) \left(\frac{h_0}{h_1}\right)^\delta}}{\delta - 1} \right) \quad (7.8)$$

Формула для среднего контактного давления получается из уравнения (6.4) и после подстановки (6.5) и деления правой части на площадь контактной поверхности $b_{cп} \cdot l$

$$P_{cп} = \sigma_t \cdot \frac{2 \cdot h_1}{\Delta h \cdot (\delta - 1)} \cdot \left(\frac{h_n}{h_1}\right) \cdot \left[\left(\frac{h_n}{h_1}\right)^\delta - 1 \right]. \quad (7.9)$$

Большие контактные давления на поверхности валков приводят к возникновению местной упругой деформации валков – радиального сплющивания. В результате увеличивается длина очага деформации.

Длину очага деформации с учетом упругого сплющивания можно приближенно определить по формуле:

$$l_c = \sqrt{R \cdot \Delta h + x^2} + x, \text{ где} \quad (7.10)$$

$$\text{где } x = \frac{R \cdot P_{cп}}{m};$$

$w=95000$ для стальных валков;

$m=53000$ для чугунных валков.

Расчет длины очага деформации следует вести итерационным методом, поскольку величина среднего контактного давления изначально не известна и зависит от длины очага деформации. Увеличение длины очага деформации изменяет форму контактной поверхности. Если допустить, что поверхность валков в очаге деформации остается цилиндрической, то можно рассчитать условный диаметр валка с учетом радиального сжатия и угол захвата.

$$R_c = \frac{l_c^2}{\Delta h}; \quad \alpha_n = \sqrt{\frac{\Delta h}{R_c}}. \quad (7.11)$$

Если прокатка ведется с натяжением, то его влияние учитывают с помощью коэффициента

$$n_{\sigma} = 1 - \frac{q_0 + q_1}{2 \cdot P_{\text{ср}}}, \quad (7.12)$$

где q_0, q_1 – напряжение натяжения переднего и заднего концов полосы.

7.2. Расчет технологических параметров холодной прокатки полос на непрерывном пятиклетьевом стане

Исходные данные для расчета представлены в таблице: Предел текучести низкоуглеродистой стали в процессе прокатки изменяется по закону:

$$n = 0,6 \quad A = 36,4 \quad \sigma = 230 \text{ МПа}$$

$$\sigma = \sigma + A \cdot \varepsilon^n, \quad (7.13)$$

где $\varepsilon = \frac{H_0 - h_i}{H_0}$

Таблица 5

Исходные данные

Параметр клетки	Обозначение	Значение				
		1	2	3	4	5
Исходная толщина	H , мм	2,0	1,19	0,82	0,58	0,45
Конечная толщина	h , мм	1,19	0,82	0,58	0,45	0,4
Радиус валов	R , мм	300				
Ширина полосы	B , мм	1 650				
Коэффициент трения	f	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
Заднее натяжение	σ_0 , МПа	40	68	85	91	113
Переднее натяжение	σ_1 , МПа	68	85	91	113	51
Предел текучести до прокатки	σ_{T0} , МПа	230	650,4	699,7	725,1	734,6
Предел текучести после прокатки	σ_{T1} , МПа	650,4	699,7	725,1	734,6	806,9

Таблица 6

Результаты расчетов

Первая итерация

Параметр	Расчетные формулы	Значения				
		1	2	3	4	5
Абсолютное обжатие	$\Delta h = H - h$, мм	0,810	0,370	0,240	0,130	0,050
Относительное обжатие	$\varepsilon = \frac{\Delta h}{H} \cdot 100$, %	40,500	31,092	29,268	22,414	11,111
Угол захвата	$\alpha = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}$, рад	0,052	0,035	0,028	0,021	0,013
Длина очага деформации	$l_c = \sqrt{R \times \Delta h}$, мм	15,588	10,536	8,485	6,245	3,873
Коэффициент формы	$K_f = \frac{l}{H_{cp}}$	9,773	10,483	12,122	12,126	9,113
Параметр σ	$\sigma = \frac{2 \cdot f \cdot l}{\Delta h}$	1,539	1,708	2,121	2,882	4,648
Средний предел текучести	$\sigma_T^* = 1.15 \cdot \frac{\sigma_{To} + \sigma_{T1}}{2}$, МПа	506,20	776,302	819,275	839,326	886,369
Коэффициент положения нейтрального сечения	$h_y = \left[\frac{\left[1 + \sqrt{1 + (\delta^2 - 1) \cdot \left(\frac{H}{h} \right)^\delta} \right]^{\frac{1}{\delta}}}{\delta + 1} \right]$	1,117	1,093	1,108	1,094	1,049
Коэффициент влияния трения	$n'_\sigma = \frac{2 \cdot h}{\Delta h \cdot (\delta - 1)} \cdot h_y \cdot (k_Y^\delta - 1)$	1,131	1,116	1,161	1,182	1,143
Коэффициент влияния натяжения	$n''_\sigma = 1 - \frac{\sigma_0 + \sigma_1}{2 \cdot \sigma_T' \cdot n'_\sigma}$	0,906	0,912	0,908	0,897	0,919
Среднее контактное давление	$P_{cp} = \sigma_T' \cdot n'_\sigma \cdot n''_\sigma$, МПа	518,67	789,856	863,433	890,030	931,299
Упругое сплющивание	$x = \frac{P_{cp} \cdot R}{95000}$, мм	1,638	2,494	2,727	2,811	2,941
Длина очага деформации с учетом сплющивания	$L = \sqrt{R \cdot \Delta h + x^2} + x$, мм	17,312	13,321	11,639	9,659	7,804

Вторая итерация

Параметр	Расчетные формулы	Значения				
		1	2	3	4	5
Абсолютное обжатие	$\Delta h = H - h$, мм	0,810	0,370	0,240	0,130	0,050
Длина очага деформации	$l_c = \sqrt{R \times \Delta h}$, мм	17,310	13,320	11,630	9,650	7,800
Коэффициент формы	$K_f = \frac{l}{H_{cp}}$	10,853	13,254	16,614	18,738	18,353
Параметр σ	$\sigma = \frac{2 \cdot f \cdot l}{\Delta h}$	1,710	2,160	2,908	4,454	9,360
Коэффициент положения нейтрального сечения	$h_\gamma = \left[\frac{1 + \sqrt{1 + (\delta^2 - 1) \cdot \left(\frac{H}{h}\right)^\delta}}{\delta + 1} \right]^{\frac{1}{\delta}}$	1,138	1,119	1,134	1,111	1,056
Коэффициент влияния трения	$n'_\sigma = \frac{2 \cdot h}{\Delta h \cdot (\delta - 1)} \cdot h_\gamma \cdot (h_\gamma^\delta - 1)$	1,169	1,181	1,263	1,326	1,330
Коэффициент влияния натяжения	$n''_\sigma = 1 - \frac{\sigma_0 + \sigma_1}{2 \cdot \sigma_T \cdot n'_\sigma}$	0,909	0,917	0,915	0,908	0,930
Среднее контактное давление	$p_{cp} = \sigma'_T \cdot n'_\sigma \cdot n''_\sigma$, МПа	537,543	839,967	946,866	1011,02	1096,94
Упругое сплющивание	$x = \frac{p_{cp} \cdot R}{95000}$, мм	1,698	2,653	2,990	3,193	3,464
Длина очага деформации с учетом сплющивания	$L = \sqrt{R \cdot \Delta h + x^2} + x$, мм	17,378	13,517	11,987	10,206	8,660

Третья итерация

Параметр	Расчетные формулы	Значения				
		1	2	3	4	5
Абсолютное обжатие	$\Delta h = H - h$, мм	0,810	0,370	0,240	0,130	0,050
Длина очага деформации	$l_c = \sqrt{R \times \Delta h}$, мм	17,370	13,510	11,980	10,200	8,660
Коэффициент формы	$K_f = \frac{l}{H_{cp}}$	10,890	13,443	17,114	19,806	20,376
Параметр σ	$\sigma = \frac{2 \cdot f \cdot l}{\Delta h}$	1,716	2,191	2,995	4,708	10,392
Коэффициент положения нейтрального сечения	$h_\gamma = \left[\frac{1 + \sqrt{1 + (\delta^2 - 1) \cdot \left(\frac{H}{h}\right)^\delta}}{\delta + 1} \right]^{\frac{1}{\delta}}$	1,139	1,121	1,136	1,112	1,056
Коэффициент влияния трения	$n'_\sigma = \frac{2 \cdot h}{\Delta h \cdot (\delta - 1)} \cdot h_\gamma \cdot (h_\gamma^\delta - 1)$	1,170	1,185	1,275	1,351	1,376
Коэффициент влияния натяжения	$n''_\sigma = 1 - \frac{\sigma_0 + \sigma_1}{2 \cdot \sigma'_T \cdot n'_\sigma}$	0,909	0,917	0,916	0,910	0,933
Среднее контактное давление	$p_{cp} = \sigma'_T \cdot n'_\sigma \cdot n''_\sigma$, МПа	538,193	843,341	956,301	1031,69	1137,25
Упругое сплющивание	$x = \frac{p_{cp} \cdot R}{95000}$, мм	1,700	2,663	3,020	3,258	3,591
Длина очага деформации с учетом сплющивания	$L = \sqrt{R \cdot \Delta h + x^2} + x$, мм	17,380	13,530	12,027	10,302	8,873
Усилие прокатки	$P = p_{cp} \cdot B \cdot l_c \cdot 10^6$, Н	15,43	18,83	18,98	17,54	16,65
Момент прокатки	$M = \Psi \cdot P \cdot l_c \cdot 10^3$, Н м	134,13	127,37	114,11	90,33	73,87

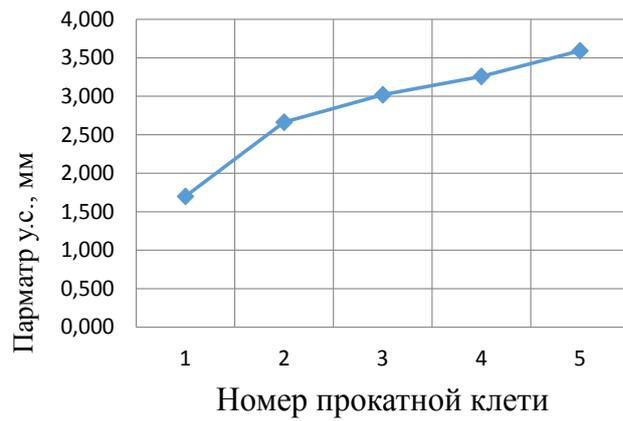


Рис. 9. Зависимость параметра упругого сплющивания от номера клетки прокатного стана

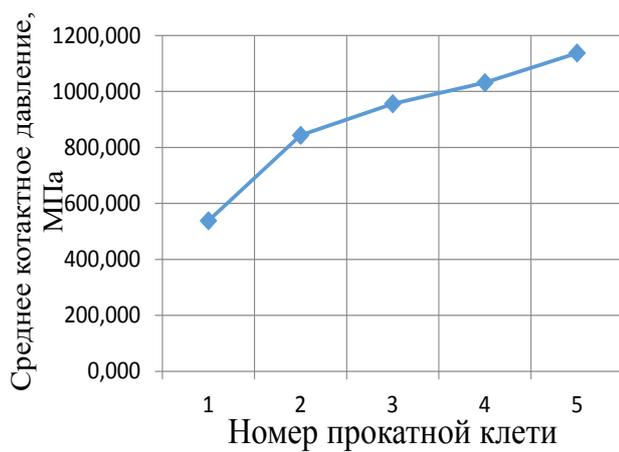


Рис. 10. Зависимость среднего контактного давления от номера клетки прокатного стана

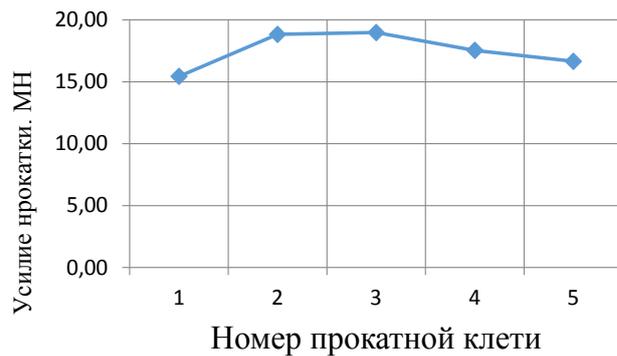


Рис. 11. Зависимость усилия прокатки от номера клетки прокатного стана

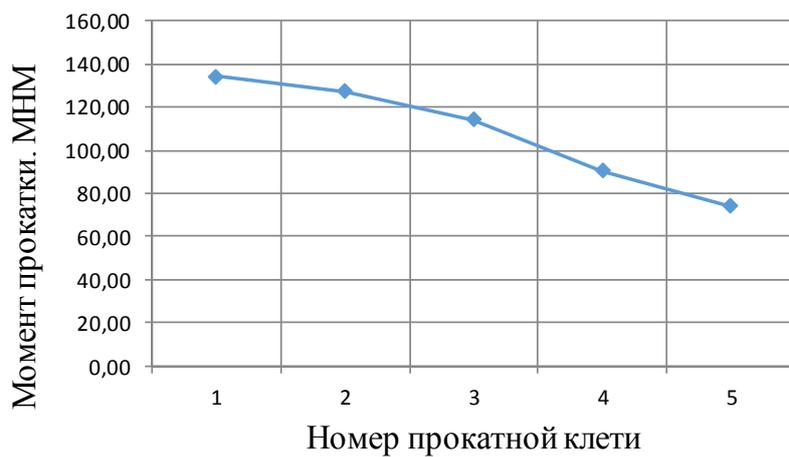


Рис. 12. Зависимость момента прокатки от номера клетки прокатного стана

8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЯ ВОЛОЧЕНИЯ ЗАГОТОВКИ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ

8.1. Общие сведения о процессе волочения

Волочением называется процесс протягивания заготовки через отверстие в волоке, имеющее меньшее сечение или иную форму. В результате волочения уменьшается площадь поперечного сечения заготовки и увеличивается ее длина. Исходным материалом для волочения являются катанка, прутки или трубы, получаемые горячей прокаткой.

Волочение металлов применяют преимущественно при производстве изделий малых сечений с высокими степенями деформации. Волочение прутков крупных сечений с невысокими степенями деформации проводят с целью повышения точности размеров сечения и улучшения качества поверхности, такой процесс называют *калибровкой*.

При волочении деформирующее усилие передается в зону деформации через деформированный конец заготовки. Величина деформирующего усилия не должна превышать предела упругости. Это обстоятельство ограничивает степень деформации: вытяжка за протяжку, как правило, не превышает 1,3. Для повышения степени вытяжки применяют многократное волочение. По этой же причине не используют горячее волочение.

При волочении *сила трения*, действующая на поверхность металла, направлена против деформирующего усилия, поэтому увеличение силы трения уменьшает степень возможной деформации. Использование мероприятий по снижению коэффициента трения повышает эффективность процесса волочения. Для уменьшения коэффициента трения и износа инструмента перед волочением с поверхности металла удаляют окалину (преимущественно травлением). Сила трения зависит от размеров периметра. Усилие волочения зависит от отношения периметра к площади поперечного сечения

$$K = \frac{\Pi}{s} = \frac{4}{D}.$$

Поэтому напряжение волочения сложных профилей и профилей малых сечений больше, чем напряжение волочения круглых профилей и больших сечений.

Для снижения давления металла на поверхность волоки применяют *противонатяжение* – приложение усилия растяжения к входящему концу заготовки. Согласно условию пластичности

$$\sigma_n - \sigma_r = \sigma_s$$

увеличение продольного напряжения растяжения уменьшает радиальное напряжение - давление на поверхность волоки и, следовательно, уменьшает износ инструмента. Противонатяжение увеличивает рабочее напряжение и,

следовательно, уменьшает допустимую величину вытяжки.

8.2. Параметры рабочего инструмента для волочения

Рабочий инструмент, используемый для волочения, называется *волокой*. Часть поверхности волоки, в которой осуществляется деформация, называется *рабочий конус*. Угол при вершине конуса 2α принимается $5-15^\circ$, при этих углах деформирующее усилие получается минимальным. Рабочий конус, как правило, имеет прямолинейную образующую.

Со стороны выхода из рабочего конуса предусматривают цилиндрический канал, называемый *калибрующий пояс*. Калибрующая часть служит для придания профилю заданных размеров и повышения стойкости выходной части рабочего конуса.

8.3. Упрощенное дифференциальное уравнение равновесия при волочении профиля круглого сечения

Выделим в очаге пластической деформации бесконечно малый элемент путем двух плоских сечений (рис 7.1). Закон трения примем в форме Амонтона-Кулона

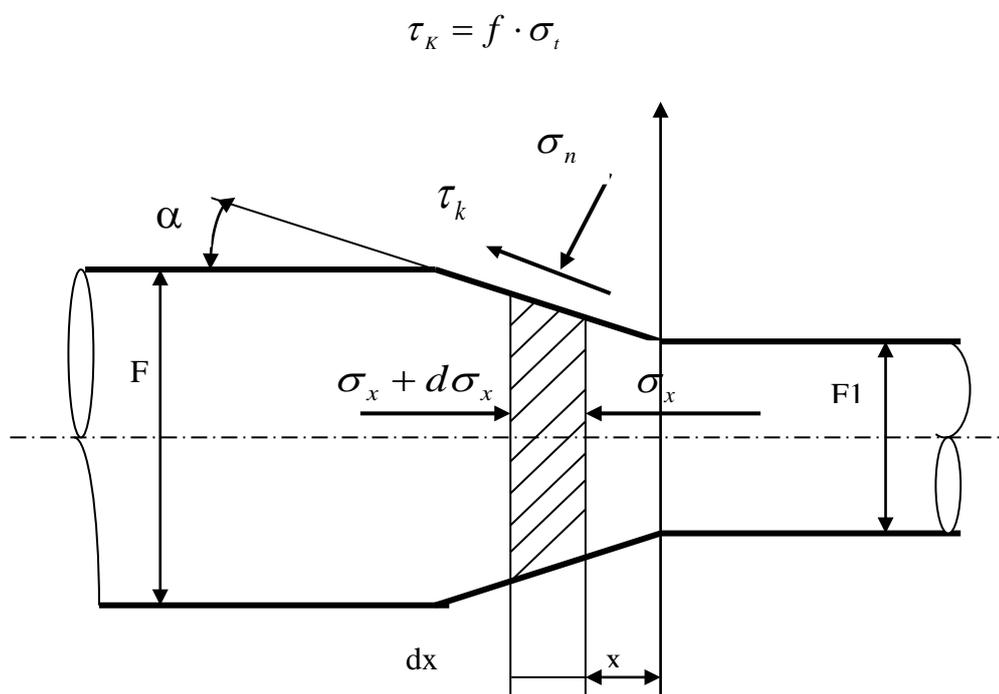


Рис. 13. Очаг пластической деформации и плоский элемент

Уравнение равновесия бесконечно малого элемента в проекциях на ось X запишется

$$(\sigma_x + d\sigma_x)(F_x + dF_x) - \sigma_x \cdot F_x - p_x \cdot dF_x - f \cdot p_x \cdot dF_x \operatorname{ctg} \alpha = 0. \quad (8.1)$$

После преобразований и сокращения бесконечно малых второго порядка, получим

$$d\sigma_x F_x + \sigma_x dF_x - p_x dF_x - f p_x dF_x \operatorname{ctg} \alpha = 0 \quad (8.2)$$

Допустим, что напряжения σ_x и p_x - главные, тогда условие пластичности можно записать в виде

$$\sigma_z - \sigma_x = \sigma_s. \quad (8.3)$$

Дифференциальное уравнение равновесия

$$\frac{d\sigma_x}{\sigma_x \frac{f}{\operatorname{tg} \alpha} - \sigma_s \left(1 + \frac{f}{\operatorname{tg} \alpha}\right)} = \frac{dF}{F}. \quad (8.4)$$

Для упрощения записи обозначим

$$\delta = \frac{f}{\operatorname{tg} \alpha}.$$

Общее решение дифференциального уравнения

$$\delta \sigma_x - (1 + \delta) = c F^\delta. \quad (8.5)$$

Граничные условия на входе заготовки в волоку

$$F = F_0, \quad \sigma_x = \sigma_0$$

Постоянная интегрирования определяется путем подстановки граничных условий в общее решение

$$c = \frac{\delta \sigma_0 - (1 + \delta) \sigma_s}{F_0^\delta}. \quad (8.6)$$

После подстановки постоянной интегрирования в общее решение, получим

$$\sigma_{x1} = \sigma_s \frac{1+\delta}{\delta} \left[1 - \left(\frac{F_0}{F_1} \right)^\delta \right] + \sigma_0 \left(\frac{F_0}{F_1} \right)^\delta. \quad (8.7)$$

8.4. Возможные допущения при решении задачи о волочении профиля круглого сечения

1. Отсутствие контактного трения $f = 0$, постоянство силы контактного трения $f = \text{const}$.

2. Отсутствие противонапряжения $\sigma_o = 0$.

3. Отсутствие упрочнения материала при холодной деформации, усреднение предела текучести

$$\sigma_s = 0.5 (\sigma_{s1} + \sigma_{s2})$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Целиков А.И., Томленов А.Д., Теория прокатки. Справочник. М.: Металлургия, 1982. –335с.
2. Громов Н. П. Теория обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1978.
3. Некит В.А., Пустовалов А.Б., Некит А.В. Методика определения критических деформаций при одноосном растяжении. //Кузнечно-штамповочное производство. 2003. №3. С.29-30.
4. Некит В.А., Некит А.В. Моделирование процесса холодной прокатки тонких листов с учетом упрочнения металла в очаге пластической деформации. Сб. научн. трудов под редакцией Платова С.И. Процессы и оборудование металлургического производства. Магнитогорск 2009. с.55-58.
5. Некит В.А. Исследование трения и упругого сжатия валков при холодной прокатке листов и полос. Сб. научн. трудов под редакцией Салганика В.М.. Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением. Магнитогорск 2009. с.101-104.
6. Некит В.А. Механическая модель процесса прокатки-волочения тонких полос//Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением. 2014. №20. С. 114-118.
7. Некит В.А. О положении нейтрального сечения в очаге пластической деформации при прокатке полос//Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением. 2012. №18. С. 137-138.
8. Некит В.А. Условия трения и упругого сжатия валков при холодной прокатке листов и полос//Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением. 2009. №15. С. 101-104.
9. Платов С.И., Некит В.А., Огарков Н.Н. Силы трения в процессе волочения катанки. В сборнике: Перспективные материалы и технологии Материалы международного симпозиума. В 2-х частях. Под редакцией В.В. Рубаника . 2017. С. 251-253
10. Некит В.А. Теоретическое обоснование условия захвата при установившемся процессе холодной листовой прокатки//Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением.2013. №19. С.72-75.
11. Скороходов Н.Е., Денисов П.И., Тулупов С.А., Некит В.А. Влияние распределения остаточных напряжений на неплоскостность листов. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1974. № 9. С. 94-96.
12. Денисов П.И., Тулупов С.А., Некит В.А., Скороходов С.Н. Условие нарушения сплошности листа при его неравномерной деформации по ширине. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1974. № 9. С. 94-96.
13. Денисов П.И., Некит В.А. Коробление узких холоднокатаных полос Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1983. № 1. С. 67-69.
14. Огарков Н.Н., Платов С.И., Шеметова Е.С., Самодурова М.Н., Терентьев Д.В., Некит В.А. Маслоемкость контактных поверхностей в процессах обработки металлов давлением. Металлург. 2017. № 1. С. 79-82.

15. Сторожев М.В., Попов Е.А., Теория обработки металлов давлением. - М.: Металлургия, 1980. –318с.
16. Зайков М.А., Полухин В.П., Зайков А.М., и др. Процесс прокатки. - М.: "МиСиС" 2004 –604с.
17. Грудев А.П. Теория прокатки. М.: Металлургия, 2001. –280с.
18. Колмогоров В.Л., Механика обработки металлов давлением. - М.: Металлургия, 1986. –688с.
19. Коновалов Ю.В., Остапенко А.Л., Пономарев В.И., Расчет параметров листовой прокатки. М.: Металлургия, 1986. – 430с.
20. Денисов П.И., Некит В.А., Аналитические методы определения напряжений, деформаций и усилий деформирования: учебное пособие. Магнитогорск. МГТУ 2004г. –57с.
21. Смирнов В. С. Теория обработки металлов давлением. М. Металлургия, 1973. 496 с.
22. Целиков А. И., Никитин Г. С., Рокотян С. Е. Теория продольной прокатки. М. : Металлургия, 1977. 312 с.
23. Денисов П. И., Румянцев М. И. Расчёт и контроль основных параметров горячей прокатки листов: Учеб. пособие. Магнитогорск: МГМИ, 1989.
24. Гун Г. Я., Теоретические основы обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1983. 351с.
25. Теорияковки и штамповки. Учебное пособие/ Унксов Е.П., Джонсон У., Колмогоров В.Л. М.: Машиностроение, 1992г.
26. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1979. 520 с.
27. Зубцов М.Е. Листовая штамповка. Л.: Машиностроение, 1980. 432 с.
28. Аверкиев Ю.А., Аверкиев А.Ю. Технология холодной штамповки. М.: Машиностроение, 1989. 304 с.
29. Головин В.А., Ракошиц Г.С., Навроцкий А.Г. Технология и оборудование холодной штамповки. М.: Машиностроение, 1987. 352 с.
30. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х томах./ Под ред. Семенова Е.И. М.: Машиностроение, 1987. 544 с.
31. Платов С.И., Огарков Н.Н., Некит В.А. Improving the controlled cooling after wire rod rolling in the finishing block of stands. В сборнике: Materials Engineering and Technologies for Production and Processing II Editors: A.A. Radionov, G.G. Mikhailov, D.A. Vinnik. 2016. С. 620-624.
32. Платов С.И., Некит В.А., Звягина Е.Ю., Терентьев Д.В. Улучшение температурного режима прокатных валков за счет совершенствования их охлаждения в процессе прокатки. В сборнике: Перспективные материалы и технологии Материалы международного симпозиума. В 2-х частях. Под редакцией В.В. Рубаника . 2017. С. 247-250.
33. Платов С.И., Некит В.А., Огарков Н.Н. Математическое моделирование процесса охлаждения металла при прокатке на мелкосортном проволочном стане. В сборнике: Перспективные материалы и технологии

Материалы международного симпозиума. В 2-х частях. Под редакцией В.В. Рубаника . 2017. С. 251-253.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Значения исходных данных для расчета параметров процесса осадки

Вариант	Марка стали	Предел текучести σ_s , МПа	Ширина, В мм	Конечная высота, мм	Коэффициент трения μ
1	08кп	82,4	140	18	0,35
2	08кп	82,4	120	12	0,4
3	10	84	120	22	0,25
4	12ХГН	86	80	12	0,4
5	08кп	82,4	100	25	0,35
6	10	84	140	18	0,4
7	40Х	86	80	12	0,3
8	10	84	120	8	0,45
9	40ХН	86	110	10	0,3
10	08кп	82,4	140	10	0,45
11	08кп	82,4	80	10	0,4
12	08кп	82,4	120	15	0,45
13	40	86	100	10	0,35
14	40ХГН	86	80	15	0,3
15	08кп	82,4	125	20	0,45
16	08кп	82,4	150	15	0,35
17	40Х	86	80	15	0,35
18	20	85	120	15	0,5
19	10	84	60	10	0,4
20	20	85	120	15	0,4

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Значения исходных данных для расчета параметров процесса прокатки

Вариант	Марка стали	Предел текучести, МПа	R_e , мм	h_0 , мм	h_1 , мм	σ_0 , МПа	σ_1 , МПа	Коэф. трения	B , мм
1	08КП	280	300	2	1,48	32	10	0,1	1000
2	10	300	250	0,88	0,53	2	5	0,1	900
3	08КП	280	250	1,86	1,6	48,1	10	0,1	1500
4	08КП	280	200	0,5	0,35	14	35	0,1	550
5	08КП	280	275	1,07	0,75	0	8	0,1	1500
6	10	300	250	2	1,6	21	35	0,1	2000
7	40	350	250	2	1,6	28	102	0,15	1350
8	08КП	280	250	1,65	1,1	88	104	0,1	1500
9	08КП	280	250	3,53	2,95	82	72	0,12	1400
10	10	300	250	1,86	1,6	23	0	0,1	1500
11	08КП	280	190	0,35	0,28	12	28	0,14	320
12	08КП	280	300	1,58	1	0	13	0,1	900
13	08КП	280	300	1	0,64	18	0	0,12	1000
14	08КП	280	300	0,64	0,41	12	0	0,12	950
15	08КП	280	300	0,41	0,35	38	15	0,15	900
16	40	350	250	3,5	2,97	28	58,9	0,23	1500
17	08КП	280	250	2,58	2,19	0	10	0,1	1350
18	08КП	280	250	2,19	1,86	58	42	0,15	1500
19	08КП	280	250	1,86	1,6	18	26,5	0,185	1500
20	08КП	280	600	1,6	1,1	21	14	0,1	980

Учебное текстовое электронное издание

**Сост. Некит Владимир Афанасьевич
Платов Сергей Иосифович**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ**

Учебное пособие

0,60 Мб

1 электрон. опт. диск

г. Магнитогорск, 2020 год
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
Адрес: 455000, Россия, Челябинская область, г. Магнитогорск,
пр. Ленина 38

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»
Кафедра машин и технологий обработки давлением и машиностроения
Центр электронных образовательных ресурсов и
дистанционных образовательных технологий
e-mail: ceor_dot@mail.ru