

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«Национальный исследовательский технологический университет
«МИСиС»
НОВОТРОИЦКИЙ ФИЛИАЛ**

Кафедра металлургических технологий и оборудования

Н.Г. Куницина

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

для студентов направления подготовки 22.03.02 «Металлургия»,
всех форм обучения

Новотроицк, 2019

УДК 669. 771
ББК 34.62
К 91

Рецензенты:

*И.о. начальника ЛПЦ-1 АО «Уральская Сталь»,
Осипов Д.Н.*

*Доцент кафедры металлургических технологий и оборудования
Новотроицкого филиала ФГАОУ ВО НИТУ «МИСиС»,
к.т.н. Братковский Е.В.*

Куница Н.Г. Обработка металлов давлением: Лабораторный практикум для студентов направления подготовки 22.03.02 «Металлургия» всех форм обучения. - Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС», 2019 – 63 с.

Лабораторный практикум по дисциплине «Обработка металлов давлением» предназначен для закрепления знаний по основам обработки металлов давлением, изучения студентами технологии, инструмента, оборудования, технологических возможностей, а также ознакомления с методикой расчета основных параметров процессов обработки металлов давлением.

В практикуме рассмотрены методика проведения лабораторных работ, теоретические основы изучаемых вопросов, приведены требования к оформлению отчетов и вопросы для самопроверки.

Лабораторный практикум соответствует государственному образовательному стандарту высшего профессионального образования по направлению подготовки бакалавров 22.03.02 «Металлургия».

Рекомендовано Методическим советом НФ НИТУ «МИСиС»

© Новотроицкий филиал
ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский
технологический университет
«МИСиС», 2019.

Содержание

| | |
|---|----|
| Введение..... | 4 |
| Основы техники безопасности при выполнении лабораторных работ..... | 6 |
| Правила подготовки, выполнения, оформления и порядок сдачи лабораторных работ..... | 7 |
| Лабораторная работа 1 Изучение оборудования прокатного стана, основных узлов и механизмов..... | 9 |
| Лабораторная работа 2 Влияние неравномерной деформации при продольной прокатке на качество продукции..... | 15 |
| Лабораторная работа 3 Условие постоянства объема металла и коэффициенты деформации..... | 21 |
| Лабораторная работа 4 Скоростные условия при прокатке | 27 |
| Лабораторная работа 5 Исследование уширения металла при прокатке..... | 34 |
| Лабораторная работа 6 Влияние параметров деформации на сопротивление металлов деформации..... | 41 |
| Лабораторная работа 7 Влияние холодной обработки давлением на механические свойства металлов и сплавов..... | 48 |
| Лабораторная работа 8 Изучение течения металла при осадке..... | 54 |
| Рекомендуемая литература..... | 58 |
| Приложение А. Эмпирические коэффициенты для определения сопротивления металла деформации..... | 59 |

Введение

Целью лабораторного практикума является:

- закрепление, углубление знаний студентов в области процессов обработки металлов давлением, закономерностей формообразования, причин возникновения и путей устранения дефектов изделий;

- формирование у студентов умений и навыков управления технологическими процессами, качеством готовой продукции на основе определения и оптимизации деформационных режимов и энергосиловых параметров процессов с использованием лабораторной и вычислительной техники, статистической обработки экспериментальных данных и планирования эксперимента;

- развитие навыков самостоятельной творческой работы.

Каждая лабораторная работа выполняется по определенному плану, изложенному в описании работы в соответствии с задачей данного исследования. Однако последовательность проведения исследования примерно одинакова:

- проработка теоретических основ, содержания и методики проведения данной лабораторной работы;

- знакомство с оборудованием, оснасткой, образцами и измерительными приборами, применяемыми при исследовании;

- составление плана проведения исследования и распределение обязанностей между студентами группы;

- оценка погрешностей мерительного инструмента и приборов (если это необходимо);

- проведение измерений и испытаний с регистрацией показаний согласно методике исследования;

- обработка результатов исследования;

- обсуждение результатов исследования, формулировка выводов, составление отчета по работе в соответствии с требованиями, изложенными в указаниях к данной работе.

В практикум включены восемь лабораторных работ, которые проводятся в лаборатории обработки металлов давлением по форме «Групповые работы». Для студентов заочной формы обучения для выполнения рекомендуются лабораторные работы № 1,3,5.

При выполнении представленных в практикуме лабораторных работ студенты приобретают компетенцию ОПК-2, т.е. узнают основы теории и технологии производства изделий методами обработки давлением, учатся рассчитывать показатели пластической деформации металла при обработке давлением, приобретают навыки выбора оптимальных технологических схем и режимов обработки металлов давлением.

Большинство лабораторных работ являются небольшими исследованиями, поэтому для их проведения и обработки полученных данных требуется необходимая теоретическая подготовка и активное творческое участие студентов.

Основы техники безопасности при выполнении лабораторных работ

Перед выполнением лабораторных работ обязателен вводный инструктаж, проводимый преподавателем в часы, отведенные для выполнения работы, о чем составляется соответствующий документ за подписью студентов и преподавателя.

Каждый студент должен следить за условиями и приемами выполнения порученной ему работы, ставить в известность преподавателя о замеченной опасности в работе, своевременно принимать меры к ее устранению.

Студентам запрещается трогать оборудование, на котором на данном занятии не выполняется экспериментальное исследование.

При работе на учебном оборудовании студент должен быть предварительно ознакомлен с его основными узлами, их взаимодействием и приемами управления агрегатом.

При работе на прокатном стане преподаватель и студенты обязаны руководствоваться следующими правилами:

а) перед началом работы осмотреть стан: валки, нажимное устройство, проводковую арматуру (столы и линейки), шпиндели и другие передаточные механизмы;

б) во время работы стана не производить регулировку нажимного устройства;

в) запрещается смазывать механизмы стана при его работе, а также производить какой-либо ремонт стана;

г) не обтирать валки во время их вращения со стороны входа в них металла;

д) при прокатке коротких образцов для подачи их к валкам пользоваться деревянным толкателем для исключения попадания рук в валки;

е) если при подаче полосы в валки захват металла не произошел, необходимо либо поднять валки, либо заострить конец полосы; вталкивать с силой, наваливаться телом на образец – категорически запрещается.

Следует иметь в виду, что при проведении лабораторных работ осторожность и внимательность должны быть на первом месте.

Каждый студент обязан бережно и аккуратно обращаться со всеми установками, следить за исправностью всего полученного им для работы инструмента, сдавать его после работы в полной исправности преподавателю.

Правила подготовки, выполнения, оформления и порядок сдачи лабораторных работ

Целью составления отчета по выполненной работе является более глубокое понимание содержания работы и результатов исследования, а также получение начальных навыков составления технических отчетов по научно-исследовательским работам.

При подготовке к лабораторной работе студент должен ознакомиться с теоретическим введением, четко усвоить цель, задачи и порядок выполнения работы. Необходимым условием допуска к выполнению работы является наличие конспекта лабораторной работы.

После выполнения работы каждый студент представляет письменный индивидуальный отчет. Отчет по лабораторным работам составляется по следующей схеме: наименование работы, цель работы, теоретическое введение, методика проведения работы (перечень и краткая техническая характеристика оборудования, используемые инструменты и приборы, характеристика образцов), результаты опытов и их обсуждение, выводы. Выводы должны содержать:

- а) констатирующую часть, в которой отражается освоенная методика, полученный результат;
- б) анализ исследуемых зависимостей с указанием причин, вызывающих изменение получаемых величин;
- в) анализ точности полученных данных и степени их надежности.

Для более рационального использования времени желательно, чтобы студенты оформляли отчет и защищали их сразу после выполнения работ. Обработка данных и оформление отчета могут быть перенесены на часы самостоятельной работы. В этом случае отчет по выполненной работе принимается преподавателем перед началом экспериментальной части следующей работы.

Отчет должен быть аккуратно оформлен, сокращения слов, кроме общепринятых, не допускаются. При построении графиков необходимо выбрать масштаб аргумента и функции, расположить их по соответствующим осям и нанести точки, полученные экспериментально или расчетом, и построить график функции. Если на графике располагается несколько кривых, то каждая из них обозначается цифрой или своим цветом, а в подрисуночной подписи приводится расшифровка этих обозначений. Все таблицы и рисунки должны иметь порядковые номера и названия.

Принимая отчет, преподаватель поверяет полученные студентом результаты, правильность ведения записей, обработки и оформления результатов. Студент должен ответить на вопросы теоретического и практического характера, связанные с данной работой. При бригадном выполнении лабораторных работ отчет выполняется и защищается каждым студентом индивидуально.

В том случае, если студент выполнил лабораторную работу в полном объеме без ошибок, сформулировал содержательные выводы и дал удовлетворительные ответы на вопросы теоретического характера, связанные с данной работой, лабораторная работа считается зачтенной, о чем в лабораторной тетради студента и журнале кафедры делается соответствующая запись.

Студенты, имеющие задолженности по отчетам двух лабораторных работ, к выполнению следующей лабораторной работы не допускаются.

После выполнения студентом всех установленных программой дисциплины работ и своевременной их защиты преподавателю, зачет по лабораторному практикуму выставляется без проведения дополнительного опроса.

Защищенные лабораторные работы являются допуском к итоговому виду аттестации по дисциплине «Обработка металлов давлением».

Лабораторная работа 1. Изучение оборудования прокатного стана, основных узлов и механизмов

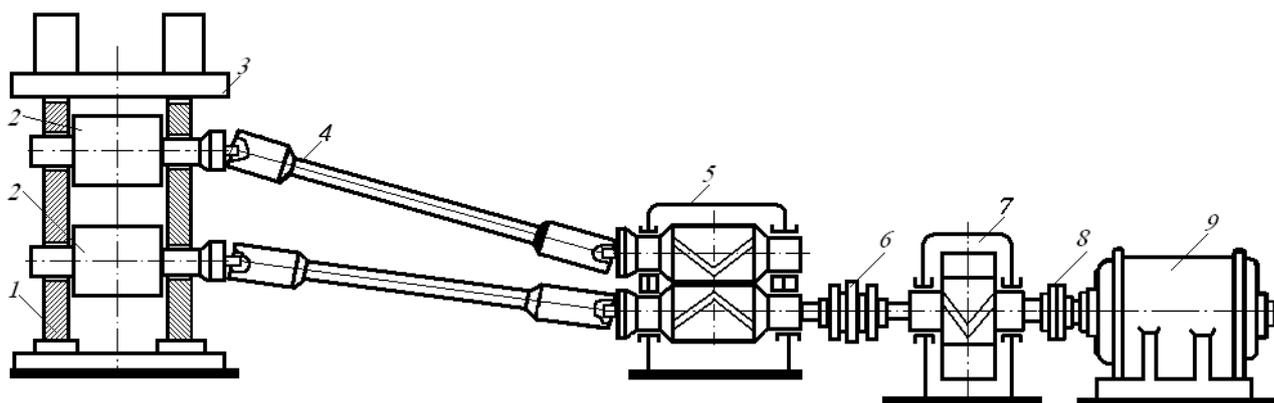
1.1 Цель работы

Изучение основного оборудования прокатного стана, его характеристик, ознакомление с оборудованием прокатной лаборатории кафедры металлургических технологий и оборудования.

1.2 Теоретическое введение

Прокатным станом называется комплекс технологических машин, обеспечивающих производство изделий из черных и цветных металлов прокаткой.

Машины и агрегаты прокатного цеха можно разделить на две группы: машины и механизмы главной линии прокатного стана (рисунок 1.1) и машины и агрегаты поточных технологических линий.



1 – станина; 2 – прокатные валки; 3 – поперечина; 4 – шпиндели;
5 – шестеренная клеть; 6, 8 – муфта; 7 – редуктор; 9 – электродвигатель

Рисунок 1.1 – Схема главной линии прокатного стана

Основным рабочим органом (технологически инструментом) прокатного стана являются валки, вращающиеся в подшипниках, установленных в рабочих клетях. Привод валков осуществляется электродвигателем через промежуточные передаточные механизмы и устройства. Машины и механизмы, предназначенные для вращения валков, а также для восприятия возникающих при пластической деформации металла усилий и крутящих моментов, составляют главную линию прокатного стана.

Машины и механизмы главной линии прокатного стана состоят из рабочей клетки, передаточных механизмов и главного электродвигателя.

Рабочая клеть является основным устройством прокатного стана, т.к. в ней

осуществляется собственно прокатка металла. Клеть представляет собой две массивные стальные литые станины, установленные на плитовины. В станинах смонтированы подушки с подшипниками и валками, а также устройства для перемещения верхнего валка по высоте и его осевой фиксации, направляющие проводки для металла и др. Силы прокатки, действующие со стороны металла на рабочие валки, через опорные шейки передаются на подушки и замыкаются в станинах рабочей клетки. Таким образом, станины, воспринимая суммарное усилие прокатки, должны обладать высокой прочностью и жёсткостью.

Прокатные валки выполняют основную операцию прокатки – деформацию (обжатие) металла и придание ему требуемых размеров и формы поперечного сечения. В процессе деформации металла, вращающиеся валки воспринимают усилие, возникающее при прокатке, и передают его на подшипники и другие детали рабочей клетки стана.

Валки состоят из трех основных элементов (рисунок 1.2): рабочей части – бочки валка (диаметром D и длиной L), которая при прокатке непосредственно соприкасается с деформируемым металлом; опорной части – шеек (диаметром $d_{ш}$ и длиной $l_{ш}$), расположенных с обеих сторон бочки и опирающихся на подшипники валка; приводного конца валка.

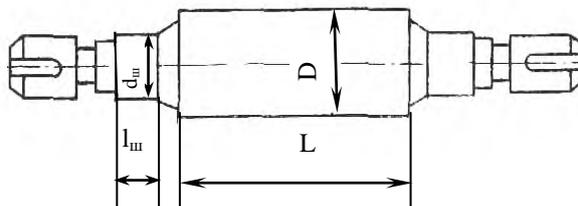


Рисунок 1.2 – Форма и основные элементы листового валка

При вращении валков, осуществляемом с помощью универсальных шпинделей, приводной конец валка делают в виде плоской лопасти (вилки) или цилиндрическим для насадки на него втулки с лопастью. При вращении валка с помощью трфовых шпинделей приводной конец (в этом случае его часто называют трфом) имеет вид крестовины и служит для соединения валка со шпинделем через промежуточную трфовую муфту.

Прокатные валки можно разделить на две основные группы: листовые и сортовые.

Валки листовых станов служат для прокатки листов, полос и ленты. Эти валки называют гладкими. У гладких валков бочка имеет цилиндрическую, слегка выпуклую или вогнутую поверхность для компенсации упругих или температурных деформаций. Металл, прокатываемый между такими валками, получает гладкую поверхность, в идеальном случае - плоскость.

Валки сортовых станов служат для прокатки заготовок и сортового профильного металла. На поверхности бочки этих валков есть углубления, соответ-

ствующие профилю прокатываемого металла. Эти углубления называют ручьями (ручьи двух валков с зазором между ними образуют калибры), а валки – ручьевыми (калиброванными) (рисунок 1.3).

Валки сортового стана характеризуются рабочим диаметром D_p , диаметром буртов D_b и номинальным диаметром D_n .

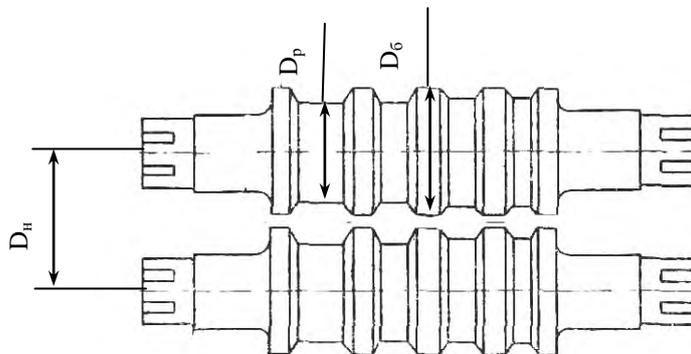


Рисунок 1.3 – Форма сортовых валков

Граница калибра – переход калибра с одного валка на другой – называется разделом калибра. Если раздел калибра осуществляется по линии, параллельной осям валков (по калибру), то такой калибр называют открытым. Калибр, у которого раздел находится вне предела калибра, называют закрытым. Разработку системы последовательных калибров, обеспечивающих получение заданного профиля и размеров изделия, называют калибровкой. Калибры делят на обжимные, уменьшающие сечение заготовки; черновые, приближающие сечение заготовки к заданному профилю, и чистовые или отделочные, дающие заданные форму и размеры сечения.

Валки изготавливают из чугуна, литой и ковальной углеродистой и легированной сталей и твёрдых сплавов. Число валков, диаметр и длина бочки рабочего валка являются основными параметрами прокатного стана. Диаметр валка определяет название сортового стана (например, стан 300), поскольку от диаметра валка зависит наибольшая глубина ручья. Длина бочки определяет название листового и ленточного станков (например, стан 2500), поскольку от длины бочки зависит наибольшая ширина проката.

Для обеспечения регулировки положения и установки валков рабочие клетки оснащены различными вспомогательными механизмами. Передаточные механизмы и устройства в зависимости от назначения и конструкции прокатного стана могут быть различными. На крупных станах (обжимных, толстолистовых), а также на станах, прокатывающих металл с большой скоростью, применяют индивидуальный привод рабочих валков от отдельных электродвигателей: в этом случае передаточным устройством являются универсальные шпиндели,

промежуточные валы и муфты.

На других станах предусмотрен общий привод рабочих валков от шестеренной клетки. В этом случае между электродвигателем и рабочей клетью в одну линию расположены моторная муфта, шестеренная клетка и универсальные шпиндели с устройством для их уравнивания. Шестеренные клетки предназначены для разделения крутящего момента и передачи вращения универсальным шпинделям от электродвигателя. Конструктивно оформляют шестеренную клетку в виде одноступенчатого редуктора с шевронными зубьями, расположенными в закрытом корпусе. Число и диаметр шестеренных валков соответствует числу и диаметру приводных валков рабочей клетки.

Если частота вращения электродвигателя не соответствует частоте вращения валков, то в линии привода валков устанавливают редуктор и коренную зубчатую муфту.

Главный электродвигатель прокатного стана является двигателем специального (металлургического) типа с воздушным продуваемым охлаждением. Для станков с постоянной скоростью прокатки (черновых клетей непрерывных станков) применяют синхронные (реже асинхронные) электродвигатели. Для станков с регулируемой скоростью прокатки используют электродвигатели постоянного тока большой мощности (5-7 тыс. кВт), питаемые от специальных машинных или тиристорных преобразователей, в ряде случаев от ртутных выпрямителей.

Машины и агрегаты поточных технологических линий прокатного цеха, не входящие в главные линии станков, предназначены для подачи металла от печи или нагревательных колодцев к приемному рольгангу стана (слитковозы), поворота слитка на рольганге (поворотные устройства), транспортирования металла в соответствии с технологическим процессом (рольганги или транспортеры), передвижения металла вдоль бочки валков для задачи его в соответствующий калибр (манипуляторы), поворота металла относительно его продольной оси (кантователи), охлаждения металла (холодильники), травления металла (травильные установки), разматывания рулонов (разматыватели), сматывания полосы в рулон или проволоки в бунт (моталки), резки металла (ножницы и пилы), для отделки металла (правки и дрессировки, клеймения, укладки, промасливания, упаковки и других процессов).

Эти машины и агрегаты весьма разнообразны; общая масса их значительно превышает массу машин и механизмов, входящих в главные линии стана.

1.3 Порядок проведения работы

По материалам, изложенным в теоретическом введении, изучить состав основного оборудования прокатного стана. После изучения теоретического мате-

риала составить паспорт лабораторного прокатного стана. Все данные занести в таблицу 1.1.

1.4 Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- цель работы;
- изложение теоретического введения;
- порядок проведения работы;
- паспорт лабораторного прокатного стана (таблица 1.1);
- выводы по работе.

Таблица 1.1 – Паспорт лабораторного прокатного стана

| <i>Общие данные</i> | | | |
|--------------------------------|-----------------|-------------------|--|
| Назначение | | | |
| Тип | | | |
| <i>Передаточные механизмы</i> | | | |
| Редуктор | Назначение | | |
| Шестеренная клеть | Назначение | | |
| Шпиндели | Назначение | | |
| Муфта | Назначение | | |
| <i>Элементы рабочей клетки</i> | | | |
| Валковый узел | Валки | Назначение | |
| | | Состояние | |
| | | Диаметр бочки, мм | |
| | | Длина бочки, мм | |
| | | Диаметр шейки, мм | |
| | Длина шейки, мм | | |
| | Подшипники | Назначение | |
| Подушки | Назначение | | |
| Нажимное устройство | Назначение | | |
| | Тип | | |
| Уравновешивающее устройство | Назначение | | |
| | Тип | | |
| Узел станин | Назначение | | |

1.5 Контрольные вопросы

- 1 Что называют прокатным станом?
- 2 Каково назначение и состав основного и вспомогательного оборудования прокатного стана?
- 3 Что такое главная линия прокатного стана?

4 Какие основные элементы входят в состав главной линии прокатного стана и каково их назначение?

5 Каковы основные способы привода рабочих валков?

6 Дайте классификацию рабочих валков в зависимости от производимой продукции и назовите их основные конструктивные элементы.

7 В каких случаях в главной линии прокатного стана не устанавливают редуктор и шестеренную клеть? Что это дает?

Лабораторная работа 2. Влияние неравномерной деформации при продольной прокатке на качество продукции

2.1 Цель работы

Ознакомление с явлением неравномерной деформации при обработке давлением; изучение причин возникновения неравномерной деформации и дефектов продукции, обусловленных неравномерностью деформации при продольной прокатке.

2.2 Теоретическое введение

Деформация материалов при пластической деформации протекает, как правило, неравномерно. При рассмотрении процессов деформации отдельных зерен, субзерен, гранул и т.д. говорят о микронеравномерности деформации. Различие степени деформации материала в зонах, соизмеримых по размерам с самими телами, характеризует макронеравномерность деформации, называемую, чаще всего, просто неравномерностью деформации.

При равномерной (однородной) деформации напряженное состояние во всех точках тела одинаково, направления главных осей не изменяются при переходе от одной точки тела к другой, плоскости и прямые линии в теле не изменяются.

При неравномерной (неоднородной) деформации напряженное состояние различно в разных частях тела. Во всех процессах обработки металлов давлением, в том числе и при прокатке, деформация всегда неравномерна (неоднородна), т.е. в различных точках пластически деформируемого тела имеются различные значения интенсивности деформации – как следствие неоднородности напряженного состояния.

При неравномерной деформации отдельные слои и элементы тела стремятся к различному изменению размеров и вследствие сплошности тела они оказывают воздействие на соседние слои и элементы. Как результат такого воздействия в деформированном теле, кроме внутренних сил, уравнивающих приложенные внешние силы, возникают дополнительные взаимно уравнивающиеся внутренние силы и соответствующие им дополнительные напряжения.

Согласно положению С.И. Губкина, в слоях и элементах пластически деформируемого тела, стремящихся к большему изменению размеров, возникают дополнительные сжимающие напряжения, а в слоях и элементах тела, стремящихся к меньшему изменению размеров, возникают дополнительные растягивающие напряжения.

Возникшие в теле дополнительные напряжения могут сохраняться как остаточные напряжения и вызывать снижение пластичности, коробление или сни-

маться за счет пластической деформации; чаще всего дополнительные напряжения снимаются за счет нарушения целостности тела в отдельных слоях и элементах (возникновение микро – и макротрещин), приводящей к браку полупродукта или готовой продукции.

При оценке величины дополнительных напряжений необходимо учитывать, что в деформируемом теле взаимно уравниваются силы, обусловленные соответствующими дополнительными напряжениями, поэтому величина дополнительных напряжений обратно пропорциональна площади участков, на которой они действуют, чем меньше площадь участка, тем больше величина напряжений, действующих на этом участке.

В процессе деформации дополнительные напряжения алгебраически суммируются с напряжениями, вызванными действием внешних сил. Поэтому действительная схема главных напряжений весьма часто существенно отличается от схемы напряжений, обусловленной приложенными внешними силами.

При выполнении расчетов параметров процессов обработки металлов давлением, в том числе и прокатки, принимают деформацию равномерной по всему объему деформируемого тела или его условно разбивают на отдельные объемы, в пределах которых деформацию можно считать равномерной.

При продольной прокатке неравномерность деформации наблюдается по всему объему деформируемого тела, следовательно, имеет место неравномерность деформации по ширине и высоте прокатываемого металла.

Основные причины неравномерности деформации следующие:

- действие внешнего трения;
- несоответствие формы рабочего инструмента форме деформируемого тела;
- неоднородность физико-механических свойств деформируемого тела по объему.

В условиях конкретной схемы процесса действие всех перечисленных факторов протекает совместно, во взаимодействии друг с другом.

Внешнее трение затрудняет скольжение деформируемого тела по инструменту; действие его распространяется не одинаково по объему тела, оно наиболее сильно вблизи контакта с инструментом и уменьшается по мере удаления от контакта, что приводит к неравномерности деформации по толщине полосы.

Неравномерность деформации в результате трения приводит к появлению дополнительных напряжений и может привести к изменению схемы напряженного состояния в отдельных частях тела.

В большинстве процессов обработки металлов давлением форма исходной заготовки не соответствует форме и размерам зазора между валками. Обычно форма заготовки проще формы изделия, определяемой формой инструмента, что приводит к неодинаковому обжатию отдельных частей заготовки, следовательно-

но, к неравномерной деформации.

На рисунке 2.1, согласно И.М. Павлову, показаны типовые схемы прокатки, при которых возникает равномерная (а) и неравномерная (б) деформация.

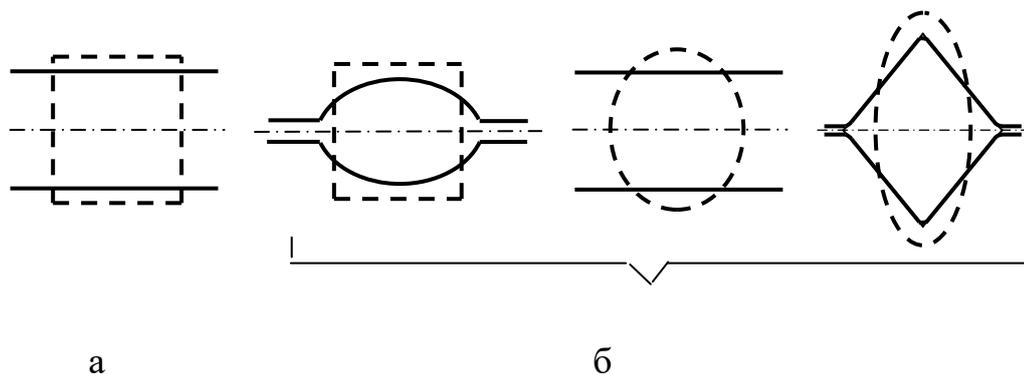


Рисунок 2.1 – Примеры равномерной (а) и неравномерной (б) деформации при прокатке (по И.М. Павлову)

На рисунке 2.1,а представлена схема прокатки на цилиндрических валках полосы из прямоугольной заготовки; абсолютные и относительные обжатия одинаковы по ширине полосы, деформация равномерная. На рисунке 2.1,б показаны три схемы прокатки, при которых наблюдается неравномерная деформация. При прокатке заготовки квадратного сечения в калибре овальной формы: деформация по ширине неравномерна из-за переменной высоты калибра при постоянной высоте заготовки; абсолютные и относительные обжатия минимальны на оси симметрии и увеличиваются к краям калибра. При прокатке круглой полосы на гладкой бочке неравномерность деформации обусловлена формой заготовки; обжатие максимально по оси симметрии и уменьшается к краям заготовки. При прокатке овальной заготовки в квадратном калибре: неравномерность деформации обусловлена совместным действием формы калибра и заготовки.

Неравномерное обжатие может привести к неоднородности структуры, особенно в заключительных стадиях горячей обработки давлением. В отдельных частях тела степень деформации может быть критической и в других - выше критической. Вследствие этого получают крупные и мелкие зерна. Неравномерность деформации в результате несоответствия формы заготовки форме инструмента также приводит к снижению пластичности тела в результате действия дополнительных напряжений.

Неоднородность свойств может быть зональной (макроскопической), когда свойства одной части тела отличаются от другой части, например, когда слиток (заготовка) нагрет неравномерно по сечению или деформируемое тело составлено из разных металлов (биметалл), и может быть микроскопической, обусловленной неоднородностью или анизотропией свойств кристаллитов.

Рассмотрим влияние зональной неоднородности свойств на неравномер-

ность деформации. Допустим, что слиток (заготовка) неравномерно нагрет так, что наружные слои имеют более высокую температуру. Нагретые слои как более мягкие деформируются в большей степени, чем внутренние холодные. Это приводит к появлению дополнительных напряжений сжатия в наружных слоях и растяжения во внутренних.

При большом перепаде температур по сечению слитка, большой степени деформации и малой пластичности металла дополнительные напряжения растяжения могут вызвать разрывы внутренних слоев. Если слиток был нагрет по сечению равномерно, а затем охлажден с поверхности (например, инструментом), то появятся дополнительные напряжения сжатия во внутренних (горячих) слоях и растяжения в наружных с возможным появлением поперечных разрывов.

При деформации тела, составленного из металлов с разными механическими свойствами, в мягких слоях появятся дополнительные напряжения сжатия, а в твердых – растяжения. Если твердые слои имеют пониженную пластичность, то в них произойдут разрывы.

В рассмотренных случаях неравномерность деформации проявлялась в пределах больших участков (зон) деформируемого тела; дополнительные напряжения уравнивались в пределах всего тела, такие дополнительные напряжения называют зональными или дополнительными напряжениями первого рода.

Неравномерность деформации может быть вызвана неоднородностью свойств кристаллитов и различием их ориентировки (микроскопическая неоднородность свойств). При осадке тела, состоящего из зерен, оказывающих различное сопротивление деформации, более мягкие зерна стремятся уменьшить высоту, чему противодействуют более твердые зерна. В результате в мягких зернах в направлении осадки появятся дополнительные напряжения растяжения, а в твердых – сжатия. В плоскости, перпендикулярной направлению осадки, мягкие зерна стремятся получить большую вытяжку, чем твердые. В последних появятся дополнительные напряжения растяжения, а в мягких – сжатия. Большое или меньшее сопротивление деформации зерен может быть обусловлено разным их химическим составом (многофазные сплавы) и различной ориентировкой в чистых металлах. Дополнительные напряжения при неравномерности деформации, обусловленной микроскопической неоднородностью свойств (разной податливостью зерен), уравниваются в пределах группы зерен; эти напряжения называют дополнительными напряжениями второго рода.

Кристаллическая природа металлов и анизотропия механических свойств кристаллитов приводят к неравномерности деформации, если даже исключено влияние всех остальных причин.

Неравномерность деформации – одна из самых основных особенностей

процесса прокатки. Неравномерность деформации сама, являясь следствием очень простых причин, в то же время приводит к очень важным следствиям, главные из которых:

- возникновение в различных зонах деформируемого металла внутренних остаточных напряжений (как сжатия, так и растяжения);
- вынужденное уширение;
- утяжка металла;
- изменение характера напряженного состояния в очаге деформации.

Изменение характера напряженного состояния в очаге деформации сказывается на силовых условиях деформации; возникновение внутренних остаточных напряжений при определенных условиях приводит к искажению профиля или к нарушению его сплошности; вынужденное уширение и особенно утяжка металла определяют условия получения требуемого фасонного профиля.

2.3 Оборудование, инструмент, образцы

Исследование неравномерности деформации при прокатке производят на лабораторном стане продольной прокатки с цилиндрическими валками с применением специальных образцов из свинца (рисунок 2.2).

Образцы со сложным поперечным сечением позволяют изучить особенности неравномерности деформации по ширине прокатываемых полос и влияние неравномерности деформации на качество продукции.

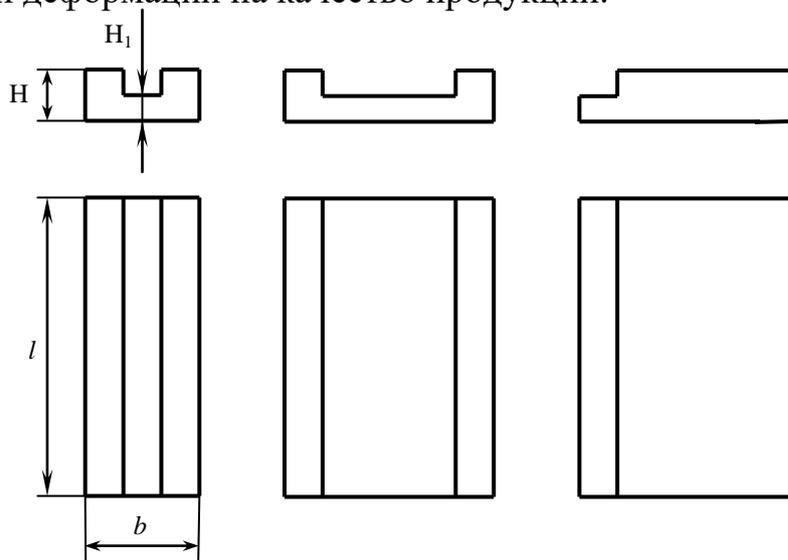


Рисунок 2.2 – Образцы для изучения неравномерности деформации при продольной прокатке

2.4 Порядок проведения работы

Выполнить эскизы образцов до деформации и указать материал образцов.

Произвести прокатку образцов на лабораторном прокатном стане с обжатиями, заданными преподавателем. При прокатке соблюдать основы техники безопасности.

Выполнить эскизы образцов после деформации, отметить характерные наблюдаемые явления; с помощью схем основных, дополнительных и результирующих напряжений в выводах объяснить причины наблюдаемых явлений.

2.5 Обработка экспериментальных данных

Результаты выполненной работы представляют в виде эскизов недеформированных и деформированных образцов, схем основных и дополнительных напряжений для каждого образца и выводов с объяснением причин наблюдаемых характерных явлений по каждому образцу.

2.6 Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- цель работы;
- изложение теоретического введения;
- краткое описание методики выполнения работы;
- эскизы образцов до деформации;
- эскизы образцов после деформации;
- описание характеристик явлений, наблюдаемых при деформации каждого образца;
- выводы с объяснением причин наблюдаемых характерных явлений.

2.7 Контрольные вопросы

- 1 Что такое неравномерность деформации?
- 2 Какие Вам известны причины неравномерности деформации?
- 3 Что такое макро- и микронеравномерность деформации?
- 4 Перечислите дефекты продукции, обусловленные неравномерностью деформации.
- 5 Назовите причины возникновения дополнительных напряжений.
- 6 Какие мероприятия необходимо проводить для снижения брака при прокатке?
- 7 К каким последствиям приводит неравномерность деформации при прокатке?

Лабораторная работа 3. Условие постоянства объема металла и коэффициенты деформации

3.1 Цель работы

Закрепление знаний о проявлении условия постоянства объема металла; о величинах, характеризующих пластическую деформацию металлов; изучение принципа действия лабораторного прокатного стана; обучение оцениванию погрешности измерений.

3.2 Теоретическое введение

При разработке новых, совершенствовании действующих технологий и выполнения исследований в области обработки металлов давлением используют условие постоянства объема металла, согласно которому плотность деформируемого металла сохраняется постоянной в течение всего цикла обработки. Это условие записывают в виде

$$h_0 \cdot b_0 \cdot l_0 = h_1 \cdot b_1 \cdot l_1, \quad (3.1)$$

где h_0, h_1 – толщина заготовки до и после деформирования, мм;
 b_0, b_1 – ширина заготовки до и после деформирования, мм;
 l_0, l_1 – длина заготовки до и после деформирования, мм.

В действительности при обработке металлов давлением наблюдаются отклонения от этого положения. При горячей прокатке на блюминге слитков кипящей стали вследствие исчезновения в первых 5-6 проходах пустот, усадочной раковины, пузырей плотность металла повышается от 6,9 до 7,85 т/м³, т.е. объем слитка уменьшается на 12 %. При дальнейшей горячей деформации плотность металла (следовательно, и объем) практически не изменяются.

При холодной обработке давлением ранее деформированного металла плотность снижается в результате увеличения числа дефектов решетки, вакансий, дислокаций, появления микротрещин. Соответственно этому объем металла увеличивается. Точными опытами установлено, что при степени деформации 80 % уменьшение удельного объема стали составляет 0,25-0,35 %, при степени деформации 60 % изменение объема меди и латуни достигает 1-2 %. В практических расчетах параметров технологических процессов отмеченными изменениями плотности пренебрегают.

Из условия постоянства объема можно получить

$$\frac{h_1 \cdot b_1 \cdot l_1}{h_0 \cdot b_0 \cdot l_0} = 1. \quad (3.2)$$

Величина $\frac{h_0}{h_1} = \frac{1}{\eta}$ характеризует деформацию металла в направлении толщины полосы и называется коэффициентом высотной деформации (коэффициентом обжатия); величина $\frac{b_1}{b_0} = \beta$ – деформацию в направлении ширины полосы и называется коэффициентом поперечной деформации (коэффициентом уширения); величина $\frac{l_1}{l_0} = \lambda$ – деформацию в направлении длины полосы и называется коэффициентом продольной деформации (коэффициентом вытяжки).

Используя указанные обозначения, получается

$$\eta \cdot \beta \cdot \lambda = 1, \quad (3.3)$$

После логарифмирования

$$\ln \eta + \ln \beta + \ln \lambda = 0. \quad (3.4)$$

Следовательно, алгебраическая сумма логарифмов коэффициентов деформации по трем взаимно перпендикулярным направлениям равна нулю.

При выполнении технологических расчетов используют следующие величины:

– абсолютное обжатие за проход $\Delta h = h_0 - h_1$,

или за несколько проходов $\Delta h_{\Sigma} = h_0 - h_n$;

– относительное обжатие за проход $\varepsilon = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \cdot 100\%$,

или за несколько проходов $\varepsilon_{\Sigma} = \frac{h_0 - h_n}{h_0} \cdot 100\%$;

– абсолютное уширение $\Delta b = b_1 - b_0$;

– коэффициент вытяжки за проход $\lambda = \frac{l_1}{l_0} = \frac{F_0}{F_1} = \frac{h_0 \cdot b_0}{h_1 \cdot b_1}$,

или за несколько проходов $\lambda_{\Sigma} = \frac{l_n}{l_0} = \frac{F_0}{F_n} = \frac{h_0 \cdot b_0}{h_n \cdot b_n}$;

– и уже названные коэффициенты $\frac{1}{\eta}$; β ; λ .

Изделия из металлов чаще всего получают пластической обработкой за несколько операций. Поэтому если технологический процесс включает несколько проходов полосы через валки, то в этом случае вводится понятие среднего коэффициента вытяжки в нескольких проходах. Под величиной среднего коэффициента вытяжки подразумевается такой коэффициент вытяжки, который был бы в том случае, если бы коэффициенты вытяжки во всех проходах были одинаковыми. Тогда можно записать

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\text{cp}} \cdot \lambda_{\text{cp}} \cdot \lambda_{\text{cp}} \cdot \dots \cdot \lambda_{\text{cp}} = \lambda_{\text{cp}}^n. \quad (3.5)$$

Из данной формулы получаем величину среднего коэффициента вытяжки

$$\lambda_{\text{cp}} = \sqrt[n]{\lambda_{\Sigma}}, \quad (3.6)$$

отсюда

$$n = \frac{\ln \lambda_{\Sigma}}{\ln \lambda_{\text{cp}}}. \quad (3.7)$$

В некоторых случаях при теоретическом анализе используют величину относительной высотной деформации, вычисляемую следующим образом:

$$\varepsilon' = \frac{h_0 - h_1}{h_1} \cdot 100\%. \text{ Наиболее точно высотную деформацию характеризует логарифмический показатель (истинный или интегральный), который определяют}$$

интегрированием бесконечно малых относительных изменений высоты полосы. Например, в рассматриваемом проходе логарифмический показатель высотной деформации

$$\delta_i = - \int_{h_{i-1}}^{h_i} \frac{dh_i}{h} \cdot 100\% = \ln h \Big|_{h_i}^{h_{i-1}} \cdot 100\% = \ln \frac{h_{i-1}}{h_i} \cdot 100\%. \quad (3.8)$$

Суммарный логарифмический показатель высотной деформации (за n проходов)

$$\delta_n = \ln \frac{h_0}{h_n}. \quad (3.9)$$

3.3 Оборудование, инструмент, образцы

Проверка опытным путем условия постоянства объема металла производится при прокатке на лабораторном стане продольной прокатки образцов прямоугольного сечения из свинца, имеющих следующие размеры: $h_0=2-5$ мм; $b_0=20-40$ мм; $l_0=100-200$ мм.

Измерение образцов до и после каждого прохода производят штангенциркулем. Расчетной длиной считают расстояние между рисками, нанесенными в 7-10 мм от торцов полосы (рисунок 3.1).

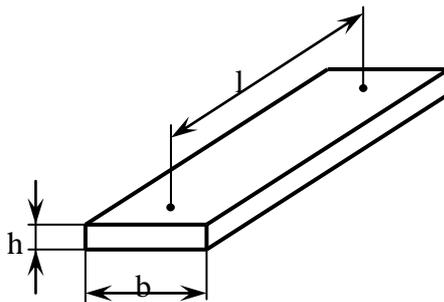


Рисунок 3.1 – Обозначение размеров образцов

3.4 Порядок проведения работы

Этапами работы являются:

- получение двух образцов различных размеров;
- разметка расчетной длины образцов;
- измерение исходных размеров образцов (по три измерения на размер), запись средних значений в таблицу 3.1;
- прокатка каждого образца за три прохода; при прокатке соблюдать правила техники безопасности;
- измерение размеров образцов после каждого прохода и запись средних значений в таблицу 3.1.

3.5 Обработка экспериментальных данных

Определение объема металла, а также коэффициентов деформации в каждом проходе вычисляют по формулам, приведенным в теоретическом введении. Расчет относительной погрешности определения объема в каждом проходе производят по выражению

$$\Delta_i = \frac{|V_{i-1} - V_i|}{V_{i-1}} \cdot 100\%,$$

где V_{i-1} – объем металла до деформации в соответствующем проходе, мм³;
 V_i – то же после деформации, мм³.

Значения относительной погрешности вносятся в таблицу 3.1.

Окончательные результаты работы по расчету параметров деформации представляют в таблице 3.2 и в тексте выводов по работе.

Таблица 3.1 – Определение объема образцов до и после деформации

| Номер образца | Номер прохода | Размеры и объем образца до деформации | | | | Размеры и объем образца после деформации | | | | Погрешность опыта Δ_i , % |
|---------------|---------------|---------------------------------------|----------------|----------------|-----------------------------|--|------------|------------|-------------------------|----------------------------------|
| | | h_{i-1} , мм | b_{i-1} , мм | l_{i-1} , мм | V_{i-1} , мм ³ | h_i , мм | b_i , мм | l_i , мм | V_i , мм ³ | |
| Образец 1 | 1 | | | | | | | | | |
| | 2 | | | | | | | | | |
| | 3 | | | | | | | | | |
| Образец 2 | 1 | | | | | | | | | |
| | 2 | | | | | | | | | |
| | 3 | | | | | | | | | |

Таблица 3.2 – Коэффициенты деформации

| Номер образца | Δh_i , мм | Δh_Σ , мм | Δb_i , мм | ε_i , % | ε_Σ , % | ε'_i , % | δ_i , % | $\frac{1}{\eta_i}$ | β_i | $\frac{l_i}{l_{i-1}}$ | $\frac{F_{i-1}}{F_i}$ | λ_Σ | λ_{cp} |
|---------------|-------------------|------------------------|-------------------|---------------------|--------------------------|----------------------|----------------|--------------------|-----------|-----------------------|-----------------------|------------------|----------------|
| Образец 1 | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| Образец 2 | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |

3.6 Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- цель работы;
- изложение теоретического введения;
- краткое описание методики выполнения работы;
- таблицы 3.1 и 3.2 с результатами эксперимента;
- выводы с анализом результатов работы.

3.7 Контрольные вопросы

- 1 При каких условиях наблюдается значительное изменение плотности деформируемого металла?
- 2 Происходит ли при горячей и холодной деформации заметное изменение плотности ранее деформированного металла?
- 3 В чем заключается условие постоянства объема при обработке металлов давлением?
- 4 Какое практическое использование находит условие постоянства объема?
- 5 Запишите известные Вам математические выражения, характеризующие условие постоянства объема металла при обработке металлов давлением.
- 6 Перечислите основные показатели деформации.
- 7 Что такое обжатие по высоте и коэффициент высотного обжатия?
- 8 Чем отличается относительная деформация от истинной относительной деформации?
- 9 Как Вы понимаете коэффициент продольной деформации и коэффициент вытяжки?

Лабораторная работа 4. Скоростные условия при прокатке

4.1 Цель работы

Закрепление знаний о скоростных условиях при прокатке; развитие навыков исследования процесса прокатки; обучение умению анализировать полученные результаты.

4.2 Теоретическое введение

Представление о характере движения металла в очаге деформации очень важно. Оно принимается за основу при выводе зависимостей между основными параметрами прокатки, при анализе силовых, скоростных и энергетических условий прокатки.

Распределение горизонтальных скоростей металла в очаге деформации можно получить, исходя из принципа постоянства секундных объемов, который формулируется следующим образом: через любое поперечное сечение очага деформации в единицу времени должно проходить одинаковое количество металла.

Объем металла, проходящий через любое поперечное сечение очага деформации в единицу времени (секунду), составляет

$$\frac{F_i \cdot l_i}{\tau} = F_i \cdot v_i, \quad (4.1)$$

где F_i – площадь поперечного сечения полосы в произвольном сечении, мм²;

l_i – продольное перемещение полосы через это сечение за время τ , мм;

v_i – скорость движения полосы в данном сечении, м/с.

Т.е. условие постоянства секундных объемов

$$F_i \cdot v_i = \text{const}, \\ F_0 \cdot v_0 = F_i \cdot v_i = F_1 \cdot v_1, \quad (4.2)$$

где v_0, v_1 – соответственно скорости движения полосы на входе и на выходе из валков, м/с.

Площади поперечного сечения полосы по мере продвижения ее от плоскости входа в валки к плоскости выхода из валков уменьшаются. Поэтому, чтобы сохранилось равенство секундных объемов, скорости частиц в соответствующих сечениях должны постепенно возрастать.

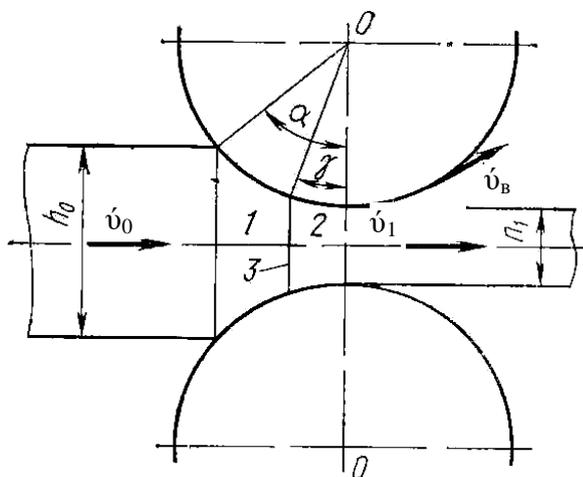
Из выражения (4.2) можно выразить

$$\vartheta_1 = \frac{F_0 \cdot \vartheta_0}{F_1},$$

$$\vartheta_1 = \lambda \cdot \vartheta_0. \quad (4.3)$$

Таким образом, скорость выхода полосы из валков больше скорости входа полосы в валки на величину коэффициента вытяжки.

Кроме этого, исследования показывают, что при установившемся процессе прокатки скорость выхода полосы из валков больше окружной скорости валков, а скорость входа полосы в валки меньше окружной скорости валков. Это связано с тем, что при обжатии полосы по высоте частицы металла вынуждены перемещаться в продольном направлении. При этом некоторое количество металла выжимается вперед по ходу прокатки; скорость этих частиц, полученная в результате деформации, суммируется с окружной скоростью валков. Другая часть смещенного объема металла отжимается назад, против хода прокатки; скорость этих частиц вычитается из окружной скорости валков. Т.е. в очаге деформации есть зона попятного движения металла или зона отставания (где скорость полосы меньше окружной скорости валков) и зона попутного движения металла или зона опережения (где соотношение скоростей обратное) (рисунок 4.1).



1 – зона отставания; 2 – зона опережения; 3 – нейтральное сечение

Рисунок 4.1 – Зоны отставания и опережения в очаге деформации

Сечение, где скорости движения полосы и валков одинаковы, называется нейтральным сечением. Его положение в очаге деформации характеризуется величиной нейтрального угла.

Следовательно, опережение – это превышение скорости выхода металла из валков по сравнению с их окружной скоростью, а отставание – уменьшение скорости входа металла в валки по сравнению с их окружной скоростью. На рисун-

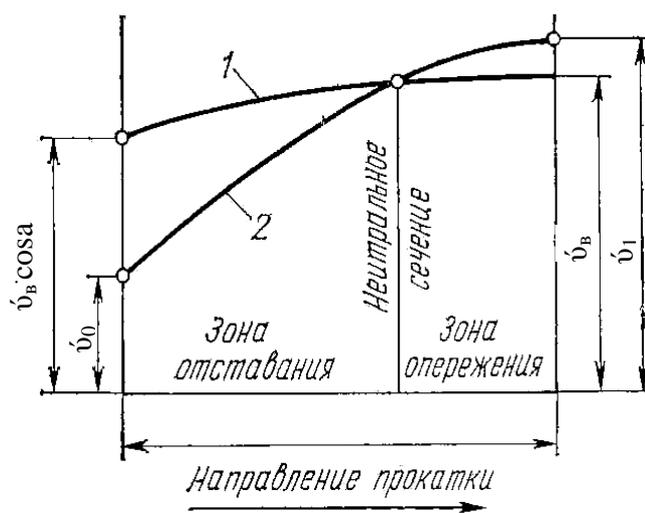
ке 4.2 представлена диаграмма, отражающая соотношение скоростей валков и металла на всем протяжении очага деформации.

Опережение и отставание принято подсчитывать как относительную величину (или в процентах) по следующим формулам.

Опережение

$$S_{h1} = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_B}{\vartheta_B}, \quad (4.4)$$

где S_{h1} – опережение.



1 – горизонтальная составляющая окружной скорости валков;

2 – скорость металла

Рисунок 4.2 – Соотношение скоростей валков и металла в очаге деформации

Опережение, как уже было сказано, можно выразить в процентах

$$S_{h1} = \frac{\vartheta_{пр} - \vartheta_B}{\vartheta_B} \cdot 100 \%$$

Обычно величина опережения составляет 2-6 %.

Отставание

$$S_{h0} = \frac{\vartheta_B \cdot \cos \alpha - \vartheta_0}{\vartheta_B \cdot \cos \alpha} = 1 - \frac{\vartheta_0}{\vartheta_B \cdot \cos \alpha}, \quad (4.5)$$

где S_{h0} – отставание;

α – угол захвата, град.

С учетом формул (4.3) и (4.4) формула (4.5) преобразуется к виду

$$S_{h0} = 1 - \frac{\vartheta_1}{\lambda} \cdot \frac{1 + S_{h1}}{\vartheta_1 \cdot \cos\alpha} = 1 - \frac{1 + S_{h1}}{\lambda \cdot \cos\alpha}. \quad (4.6)$$

В теории прокатки основное внимание уделяется исследованию опережения. Это объясняется тем, что опережение экспериментально и аналитически определяется проще, чем отставание. С другой стороны именно величина опережения необходима для решения ряда практических задач, когда требуется достаточно точно определить скорость выхода полосы из валков (скорость прокатки). Если же известно опережение, то отставание нетрудно рассчитать по формуле (4.6).

Опережение является чувствительным кинематическим показателем процесса прокатки. Изменение любого геометрического или физического фактора прокатки отражается на величине опережения. На величину опережения сказываются такие параметры, как диаметр валков, на которых осуществляется процесс прокатки; величина абсолютного обжатия; толщина полосы; угол захвата; коэффициент трения и пр.

Влияние всех этих параметров на опережение выражается формулой, по которой и производят расчет опережения процесса прокатки

$$S_{h1} = \frac{\gamma^2}{2} \cdot \left(\frac{D}{h_1} - 1 \right), \quad (4.7)$$

где γ – нейтральный угол (рисунок 4.1), град;

D – диаметр валков, мм.

Для нахождения нейтрального угла можно воспользоваться формулой

$$\gamma = \frac{\alpha}{2} \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{2 \cdot \beta} \right), \quad (4.8)$$

где β – угол трения, град, определяемый из выражения

$$\beta = \arctg f, \quad (4.9)$$

где f – коэффициент трения.

Величину опережения металла при прокатке экспериментально можно определить методом кернов. Для этого по окружности валка в одном из перпендикулярных его оси сечений наносят две метки на расстоянии L_v одна от другой.

После прокатки на полосе останутся отпечатки (бугорки) от меток. Если измерить расстояние между метками на полосе L_n , то величину опережения можно определить по формуле

$$S_{hl} = \frac{L_n - L_b}{L_b}, \quad (4.10)$$

где L_b – расстояние между метками на валке, мм;
 L_n – расстояние между метками на полосе, мм.

4.3 Оборудование, инструмент, образцы

Работа проводится на лабораторном двухвалковом одноклетевом стане. Используют образцы из свинца толщиной 2-3 мм, шириной 30-40 мм, длиной 100-200 мм. Для измерения образцов до и после прокатки применяют штангенциркуль.

Измерение толщины образцов производят в трех сечениях по длине и берут среднее арифметическое значение.

4.4 Порядок проведения работы

- производят измерение толщины исходных образцов;
- производят прокатку образцов при различных условиях трения: в сухих валках и в валках, смазанных мелом с различными степенями деформации;
- рассчитывают толщину образцов после прокатки, опережение, отставание, угол захвата и нейтральный угол (величина угла трения задана);
- все результаты заносят в таблицу 4.1.

4.5 Обработка экспериментальных данных

Производят расчет параметров, отраженных в таблице 4.1.

По результатам расчета строят графики зависимости опережения и отставания (опытных и расчетных) от толщины полосы для каждого из условий трения.

Делают анализ, в котором необходимо отразить влияние изменяемых в работе параметров прокатки на скоростные условия прокатки. Обосновать это влияние, а также технологическую и практическую значимость взаимосвязи рассматриваемых параметров.

Таблица 4.1 – Результаты исследования влияния условия трения, толщины полосы и обжатия на скоростные условия в очаге деформации

| Условия трения | Номер Образца | Номер прохода | Экспериментальные данные | | | | | | Расчетные данные | | | | |
|-----------------|---------------|---------------|--------------------------|------------|-----------------|------------|------------|--------------|------------------|------------------|------------------|--------------|--------------|
| | | | h_0 , мм | h_1 , мм | Δh , мм | L_n , мм | L_n , мм | S_{h1} , % | S_{h0} , % | α , град. | γ , град. | S_{h1} , % | S_{h0} , % |
| Сухие валки | Образец 1 | 0 | | | | | | | | | | | |
| | | 1 | | | | | | | | | | | |
| | | 2 | | | | | | | | | | | |
| | | 3 | | | | | | | | | | | |
| | Образец 2 | 0 | | | | | | | | | | | |
| | | 1 | | | | | | | | | | | |
| | | 2 | | | | | | | | | | | |
| | | 3 | | | | | | | | | | | |
| Смазанные мелом | Образец 1 | 0 | | | | | | | | | | | |
| | | 1 | | | | | | | | | | | |
| | | 2 | | | | | | | | | | | |
| | | 3 | | | | | | | | | | | |
| | Образец 2 | 0 | | | | | | | | | | | |
| | | 1 | | | | | | | | | | | |
| | | 2 | | | | | | | | | | | |
| | | 3 | | | | | | | | | | | |

4.6 Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- цель работы;
- конспект теоретического введения;
- краткое описание методики проведения эксперимента;
- результаты эксперимента и их анализ с включением в этот раздел таблицы и графиков с соответствующим расположением их по тексту раздела;
- выводы по работе.

4.7 Контрольные вопросы

- 1 Какое явление называют опережением и отставанием?
- 2 Что такое нейтральное сечение?
- 3 Какие факторы влияют на положение нейтрального сечения в очаге деформации при прокатке?

- 4 Как уширение влияет на величину опережения?
- 5 Каким соотношением связаны между собой опережение и отставание?
- 6 Приведите примеры практической значимости опережения при прокатке.
- 7 Определить максимально возможное значение нейтрального угла для свободной прокатки.
- 8 Как изменится опытная величина опережения при смещении кернов с середины полосы на ее край?

Лабораторная работа 5. Исследование уширения металла при прокатке

5.1 Цель работы

Изучение влияние ширины полосы и обжатия на величину абсолютного и относительного уширения при прокатке; исследование влияние ширины полосы на соотношение между продольной и поперечной деформацией.

5.2 Теоретическое введение

В процессе прокатки происходит постепенное уменьшение высоты полосы. Смещенный по высоте объем металла перемещается в длину и ширину. Смещение объема металла в продольном направлении приводит к увеличению длины полосы (продольная деформация), смещение объема металла в поперечном направлении – к уширению (поперечная деформация). Высотная, продольная и поперечная деформации связаны между собой условием постоянства объема металла при прокатке (выражение 3.1).

Из уравнения постоянства объема металла следует

$$\frac{h_0}{h_1} = \frac{b_1 \cdot l_1}{b_0 \cdot l_0} \quad (5.1)$$

или

$$\frac{1}{\eta} = \beta \cdot \lambda. \quad (5.2)$$

Следовательно, при данном обжатии продольная деформация тем больше, чем меньше уширение, и наоборот.

Уширение при прокатке может быть свободным, ограниченным и вынужденным. Свободным называют уширение прямоугольной полосы, прокатываемой в валках с гладкой цилиндрической бочкой. При свободном уширении частицы металла, перемещающиеся в поперечном направлении, не встречают никаких внешних препятствий в виде стенок калибров (имеет место лишь обычное контактное трение). При ограниченном уширении поперечное перемещение прокатываемого металла ограничивается боковыми гранями калибра.

Вынужденным называют уширение, вызванное формой калибра, обуславливающей неравномерное обжатие прокатываемой полосы по ее ширине.

Уширение в большинстве случаев представляет собой отрицательное явление. Оно снижает общую вытяжку и вызывает в боковых кромках полосы значи-

тельные напряжения растяжения. Уширение имеет большое значение для процесса прокатки и поэтому должно приниматься во внимание. Особенно точно следует учитывать величину уширения при прокатке в калибрах, т.к. от этого зависит качество получаемого профиля.

Основная цель прокатки – удлинение металла. Поэтому нужно всемерно противодействовать уширению, способствуя максимальной продольной деформации.

Величина уширения при прокатке в гладких валках зависит от соотношения главных напряжений в очаге деформации (рисунок 5.1). Чем меньше поперечное напряжение σ_2 (по абсолютной величине), тем больше при прочих равных условиях уширение. При определенных соотношениях напряжений поперечная деформация может быть больше продольной.

На соотношение главных напряжений, а, следовательно, и на величину уширения оказывают влияние геометрические, физические и механические факторы. К геометрическим факторам относят величину обжатия, диаметр валков, ширину и толщину полосы. К механическим факторам относят наличие внешних зон прокатываемого металла, натяжение, подпор. К физическим – коэффициент трения. Все факторы, влияющие на коэффициент трения (температура, материал и шероховатость валков, скорость прокатки и т.п.), влияют тем самым на величину уширения.

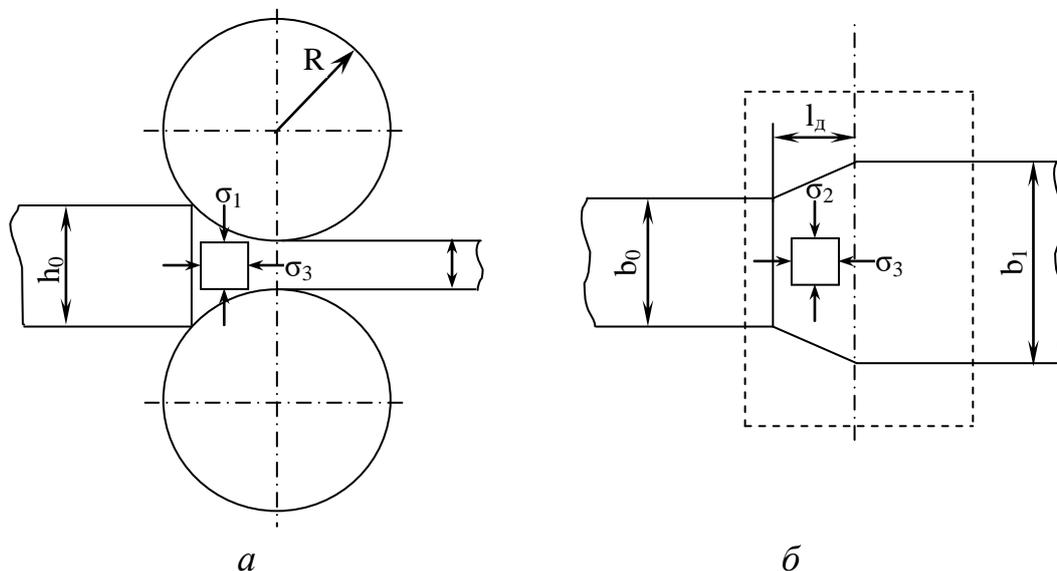


Рисунок 5.1 – Очаг деформации при прокатке в гладких валках (а) и схема главных напряжений (б)

Одним из основных параметров при прокатке, определяющих величину уширения, является обжатие, с его повышением уширение также повышается. Это объясняется тем, что при росте обжатий смещенный объем металла по высоте увеличивается и, соответственно, объем металла, смещенный в поперечном и продольном направлении, также возрастает. Кроме того, при увеличении обжа-

тия увеличивается длина очага деформации, определяемая по формуле

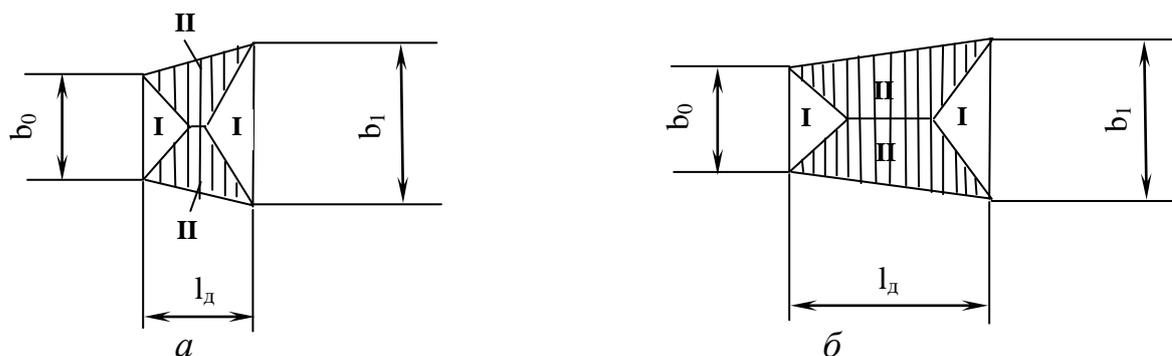
$$l_d = \sqrt{R \cdot \Delta h}, \quad (5.3)$$

где R – радиус валков, мм;

Δh – абсолютное обжатие, мм.

Следовательно, при увеличении длины очага деформации в соответствии с законом наименьшего сопротивления увеличиваются зоны стремления деформации металла к уширению (рисунок 5.2), и, соответственно, увеличивается сопротивление продольному перемещению (увеличивается величина подпирющих сил трения в продольном направлении).

Увеличение диаметра валков способствует росту протяженности очага деформации и увеличению сил трения в продольном направлении. Соответственно смещение металла в поперечном направлении будет увеличиваться. Таким образом, с увеличением диаметра валков уширение увеличивается.



I – зоны стремления деформации металла к удлинению; II – зоны стремления деформации металла к уширению; a – короткий очаг деформации;

b – длинный очаг деформации

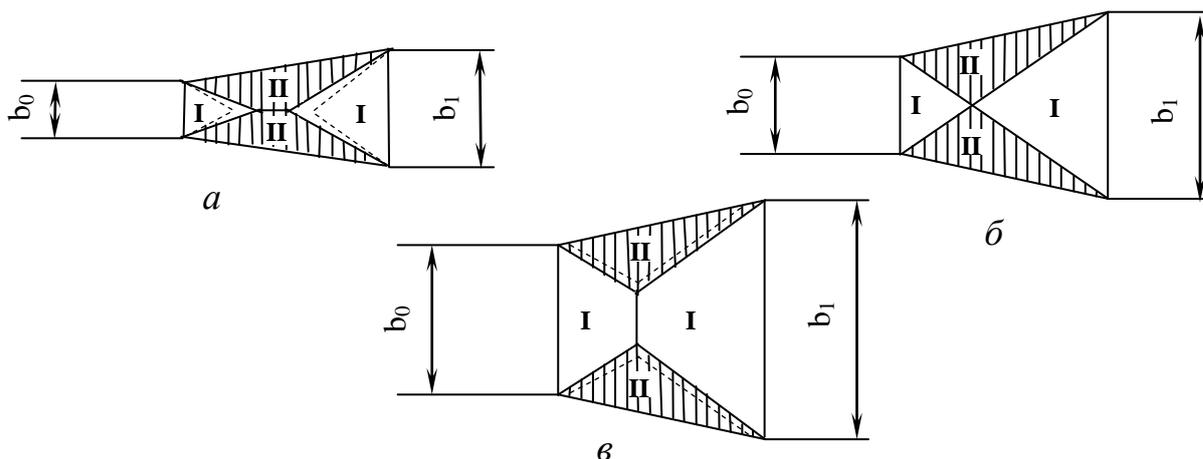
Рисунок 5.2 – Схемы очага деформации

Влияние ширины полосы на уширение неоднозначно и зависит от соотношения размеров очага деформации при прокатке.

Если ширина прокатываемой полосы меньше длины очага деформации, то такой очаг называется узким, и в соответствии с законом наименьшего сопротивления, зоны стремления деформации металла к уширению с обеих сторон полосы соприкасаются (рисунок 5.3, a).

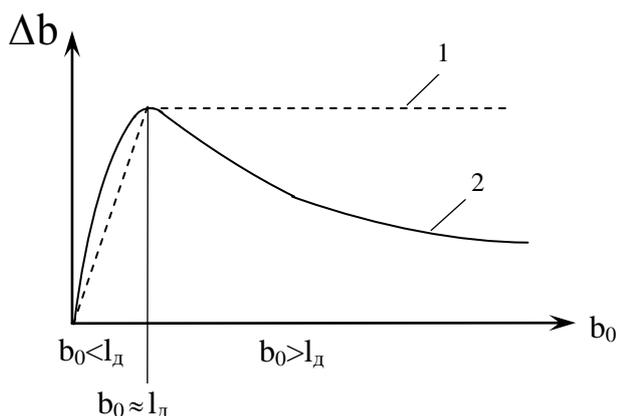
По мере роста ширины полосы площадь условных зон стремления металла к уширению (II) растет до своего максимума (рисунок 5.3, b) – критический очаг деформации и далее остается постоянной (рисунок 5.3, $в$) – широкий очаг деформации

Влияние ширины полосы на величину уширения без учета влияния внешних зон должно характеризоваться ломаной линией 1 на рисунке 5.4.



а) узкий очаг деформации ($b_0 < l_d$); б) критический очаг деформации ($b_0 \approx l_d$);
в) широкий очаг деформации ($b_0 > l_d$)

Рисунок 5.3 – Условное деление очага деформации на зоны



1 – без учета влияния внешних зон; 2 – с учетом влияния внешних зон

Рисунок 5.4 – Влияние ширины полосы на величину уширения

Однако реальный процесс прокатки протекает в условиях наличия внешних недеформированных зон, которые изменяют характер уширения.

Действие внешних зон на уширение состоит в стремлении выровнять вытяжки в продольном направлении в центральных и боковых частях прокатываемой полосы. Благодаря действию внешних зон дополнительные продольные напряжения растяжения возникают не только в боковых частях полосы в контактной зоне деформации, но и в тех боковых ее частях, которые находятся во внеконтактных зонах деформации на входе в валки и на выходе из них. В прилегающих к ним зонах по ширине полосы возникают дополнительные продольные напряжения сжатия, уравнивающие в каждом рассматриваемом сечении внешних зон тела напряжения растяжения.

В результате часть металла боковых зон II (рисунок 5.3) смещается в на-

правлении длины, а часть металла из зоны I смещается в поперечном направлении, т.е. происходит перераспределение металла между зонами. Итоговый результат зависит от величины дополнительных напряжений и их соотношения с величиной контактных напряжений. В случае $b_0 < l_d$ площадь зон II возрастает, при $b_0 \approx l_d$ – остается примерно постоянной и при $b_0 > l_d$ площадь зон II уменьшается (границы раздела зон очага деформации показаны пунктиром).

С учетом влияния внешних зон зависимость уширения от ширины полосы характеризуется кривой 2 на рисунке 5.4.

Аналогичное влияние на уширение оказывают переднее и заднее натяжения, с повышением которых уширение уменьшается.

При повышении коэффициента трения возрастают как продольные, так и поперечные напряжения. Однако первые растут более интенсивно. Поэтому с увеличением коэффициента трения уширение также возрастает.

Температура, состав прокатываемой стали, скорость прокатки, материал и шероховатость валков оказывают влияние на уширение через коэффициент трения. При изменении этих факторов изменяется коэффициент трения, который в свою очередь, влияет на уширение.

Определение величины уширения с учетом всех факторов, влияющих на него, является сложной задачей. Поэтому большинство формул для подсчета уширения содержат только основные факторы, а действие остальных учитывается соответствующими коэффициентами.

5.3 Оборудование, инструмент, образцы

Исследование ширины полосы на уширение и соотношение между продольной и поперечной деформациями выполняют при прокатке на лабораторном двухвалковом стане цилиндрическими валками. Образцы из свинца толщиной 2-5 мм, шириной 20, 50 и 75 мм и длиной 100-200 мм. Предварительно на поверхность образцов наносят две поперечные параллельные риски, нанесенные в 7-10 мм от торцов полосы, которые служат для измерения длины образцов.

Изменение толщины и ширины образцов производят в трех сечениях по длине и берут среднее арифметическое значение. Размеры образцов измеряют штангенциркулем.

5.4 Порядок проведения работы

Последовательность действий при выполнении лабораторной работы следующая:

- производят измерение размеров образцов: h_0 – исходная толщина, b_0 – ис-

ходная ширина, l_0 – исходная длина и делают записи в таблице (по три измерения на размер).

- осуществляют последовательную прокатку образцов, начиная с самого широкого и кончая самым узким с одинаковым обжатием и заносят в таблицу 5.1 средние размеры, характеризующие толщину (h_1), длину (l_1) и ширину (b_1).

При проведении прокатки на лабораторном стане студенты обязаны соблюдать основы техники безопасной работы.

5.5 Обработка экспериментальных данных

Производят расчет и вносят в таблицу 5.1 следующие значения:

- абсолютное обжатие $\Delta h = h_0 - h_1$,
- относительное обжатие $\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0}$,
- абсолютное уширение $\Delta b = b_1 - b_0$,
- относительное уширение $\varepsilon_b = \frac{\Delta b}{b_0}$,
- коэффициент поперечной деформации $\beta = \frac{b_1}{b_0}$,
- коэффициент продольной деформации $\lambda = \frac{l_1}{l_0}$,
- коэффициент высотной деформации $\frac{1}{\eta} = \frac{h_0}{h_1}$.

По результатам опытных данных и расчета строят графики зависимости Δb , ε_b от относительной ширины полосы $\frac{b_0}{l_d}$.

По результатам экспериментов строят графики зависимости коэффициентов β , λ и η от ширины образцов.

Таблица 5.1 – Экспериментальные данные, полученные при прокатке полос различной ширины

| Номер образца | Эксперимент | | | | | | | | | | | | |
|---------------|-------------|------------|-----------------|-------------------|----------|------------|------------|-----------|------------|------------|-----------------|---------|---------------------|
| | h_0 , мм | h_1 , мм | Δh , мм | ε , % | $1/\eta$ | l_0 , мм | l_1 , мм | λ | b_0 , мм | b_1 , мм | Δb , мм | β | ε_b , % |
| Образец 1 | | | | | | | | | | | | | |
| Образец 2 | | | | | | | | | | | | | |
| Образец 3 | | | | | | | | | | | | | |

5.6 Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- цель работы;
- конспект теоретического введения;
- краткое описание методики проведения эксперимента по определению влияния ширины полосы на уширение;
- таблицу данных измерений и расчетов;
- графики, выполненные на миллиметровой бумаге: зависимости Δb , ϵ_b от $\frac{b_0}{l_d}$; β , λ , η от ширины образцов;
- выводы об изменении абсолютного и относительного уширения в зависимости от ширины полосы и выводы о связи коэффициента вытяжки и коэффициента уширения по мере изменения ширины полосы.

5.7 Контрольные вопросы

- 1 Как записывается уравнение постоянства объема?
- 2 Какие виды уширения при прокатке Вы знаете?
- 3 Какие причины вызывают уширение?
- 4 Является ли уширение желательным явлением с точки зрения качества продукции и эффективности процесса?
- 5 Какие факторы влияют на величину уширения?
- 6 Каково влияние ширины полосы на уширение?
- 8 Какое действие оказывают внешние зоны полосы на уширение?
- 7 Опишите влияние исходного профиля заготовки на величину уширения при прокатке широкого листа.

Лабораторная работа 6. Влияние параметров деформации на сопротивление металла пластической деформации

6.1 Цель работы

Закрепление знаний о влиянии термомеханических параметров деформации: температуры, скорости и степени на сопротивление металла деформации.

6.2 Теоретическое введение

Деформация металлов и сплавов определяется их свойствами, которые рассматриваются как технологические, т. к. они определяют технологический режим их обработки давлением.

Важной технологической характеристикой металлов является сопротивление пластической деформации. Эта характеристика дает количественную оценку податливости обрабатываемого металла и имеет большое значение при назначении технологических режимов прокатки металла, определяя силовые условия процесса. Чем выше сопротивление деформации металла, тем ниже его податливость обработке давлением и тем труднее его обрабатываемость. Металл, обладающий большим сопротивлением деформации, обрабатывают с меньшими обжатиями и при этом используют большие усилия и более мощное оборудование.

Сопротивление деформации при обработке давлением зависит от ряда факторов: химического состава металла, температуры, при которой деформируется металл, скорости и степени деформации металла.

В большей степени сопротивление пластической деформации зависит от химического состава стали. Влияние химического состава стали на сопротивление деформации складывается через изменение его механических свойств (пределов прочности и текучести), а также через изменение коэффициента трения.

Углерод принадлежит к активным элементам, влияющим на изменение сопротивления деформации. Особенно заметное влияние углерода на повышение сопротивления деформации начинается при содержании его 0,5 % и выше.

Тугоплавкие металлы имеют более высокие значения сопротивления пластической деформации, чем легкоплавкие.

Как правило, легирующие примеси повышают сопротивление деформации.

Температура также является сильно действующим фактором. Понижение сопротивления деформации с повышением температуры часто не имеет плавный характер.

При относительно низких температурах (ниже температуры рекристаллизации) существенное влияние на сопротивление деформации оказывает наклеп (упрочнение). При наклепе сопротивление деформации металлов повышается.

Это явление наблюдается при холодной деформации у большинства металлов, за исключением свинца и олова, температура рекристаллизации которых не превышает комнатную температуру.

При горячей обработке металлов влияние наклепа тесно связано с влиянием скорости деформации, т.е. приращением степени деформации за единицу времени. Сущность этого явления заключается в следующем. При деформировании металла притекающая в нем рекристаллизация осуществляется противоположно процессу наклепа. Однако скорость рекристаллизации в большинстве случаев отстает от скорости деформации и, тем самым, не полностью снимается наклеп металла. Следовательно, чем выше скорость деформации, тем меньше полнота протекания рекристаллизации, и тем выше сопротивление пластической деформации.

Исследования по определению сопротивления деформации сталей и сплавов проводят с применением специальных машин.

Существует несколько методов представления сопротивления деформации: графический, номографический, метод термомеханических коэффициентов и др.

Графический метод.

Сопротивление деформации представляют в виде графиков $\sigma_s = f(\xi)$ с указанием температуры или температуры и степени деформации; число кривых соответствует общему числу интервалов температуры и степени деформации (рисунок 6.1).

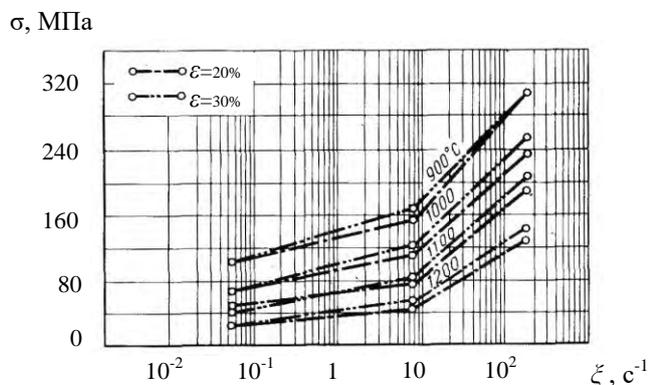


Рисунок 6.1 – Зависимость сопротивления деформации стали 45 от скорости

Номографический метод.

По существующим номограммам определяют сопротивление пластической деформации. Одна из таких номограмм приведена на рисунке 6.2. Способ пользования номограммой показан стрелками.

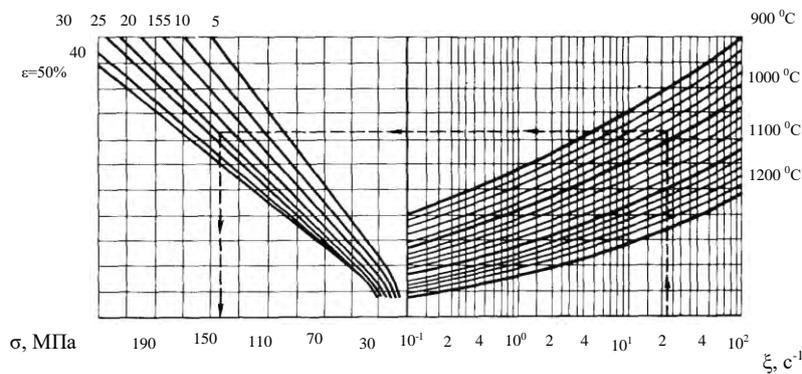


Рисунок 6.2 – Номограмма сопротивления деформации стали 15ХСНД

Все эти методы имеют определенные неудобства, заключающиеся в том, что в случае применения ЭВМ использовать графики нежелательно.

Метод термомеханических коэффициентов.

Сопротивление деформации определяют при средних значениях термомеханических параметров, а затем при помощи термомеханических коэффициентов распространяют на всю исследуемую область.

Расчетное значение сопротивления деформации в зависимости от различных значений температуры, скорости и степени деформации В.И. Зюзиным предложено определять по зависимости

$$\sigma_s = \sigma_0 \cdot k_t \cdot k_\epsilon \cdot k_\xi, \quad (6.1)$$

где σ_s – сопротивление металла пластической деформации, МПа;

σ_0 – базовое сопротивление деформации, МПа, рассчитанное при следующих условиях: $t = 1000^\circ\text{C}$, $\epsilon = 10\%$, $\xi = 10\text{c}^{-1}$;

k_t, k_ϵ, k_ξ – термомеханические коэффициенты при тех же условиях.

Метод термомеханических коэффициентов дает возможность расчленить многозначную функциональную зависимость $\sigma(t, \epsilon, \xi)$ на ряд зависимостей между тремя переменными $k_t(t)$, $k_\epsilon(\epsilon)$, $k_\xi(\xi)$.

Зависимость сопротивления деформации от температуры, выраженная коэффициентом k_t , может быть представлена в экспоненциальной форме

$$k_t = A_1 \cdot e^{-m_1 \cdot t}, \quad (6.2)$$

а зависимости коэффициентов k_ϵ , k_ξ от степени и скорости деформации можно представить в степенной форме

$$k_\epsilon = A_2 \cdot \epsilon^{m_2}, \quad (6.3)$$

$$k_{\xi} = A_3 \cdot \xi^{m_3}, \quad (6.4)$$

где $A_1, A_2, A_3, m_1, m_2, m_3$ – постоянные коэффициенты, зависящие от материала;

t – температура деформации, °С;

ε – степень деформации (относительное обжатие);

ξ – скорость деформации, c^{-1} .

С учетом формул (6.2), (6.3) и (6.4) уравнение (6.1) можно представить в виде

$$\sigma_s = \sigma_0 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot e^{-m_1 \cdot t} \cdot \varepsilon^{m_2} \cdot \xi^{m_3}. \quad (6.5)$$

Значения коэффициентов уравнения (6.5) приведены в приложении А.

Наибольшее расхождение значений сопротивления деформации, определенных по зависимости (6.5), составляет 8 % по сравнению с экспериментальными данными.

Эту зависимость удобно использовать при расчете параметров на ЭВМ. Основной недостаток данной зависимости – формула применима для очень ограниченного числа сплавов с известными значениями термомеханических коэффициентов. При этом нет данных для наиболее широко применяемых в черной металлургии сталей углеродистых обыкновенного качества, конструкционных и низколегированных. Еще один недостаток – ограничение скорости деформации величиной $100 c^{-1}$ (на современных станах она значительно выше).

В большинстве случаев предпочитают пользоваться простой формулой Андreyока Л.В. – Тюленева Г.Г.

$$\sigma_s = K \cdot \sigma_0 \cdot \xi^a \cdot (10 \cdot \varepsilon)^b \cdot \left(\frac{t}{1000} \right)^c, \quad (6.6)$$

где K, a, b, c – коэффициенты для конкретной марки стали (приложение А);

σ_0 – базовое сопротивление металла деформации, МПа, полученное методом растяжения при следующих условиях: $\varepsilon = 10\%$; $\xi = 1 c^{-1}$; $t = 1000^0 C$.

Однако влияние химического состава стали может быть учтено так же следующими эмпирическими зависимостями:

$$K \cdot \sigma_0 = 66,8 + 0,1 \cdot \left[\sum_{i=1}^{13} (K'_i \cdot x_i + K''_i \cdot x_i^{1,5}) \right], \quad (6.7)$$

$$a = 0,126 + 0,01 \cdot \left[\sum_{i=1}^{13} (l'_i \cdot x_i + l''_i \cdot x_i^{1,5}) \right], \quad (6.8)$$

$$b = 0,125 + 0,01 \cdot \left[\sum_{i=1}^{13} (m'_i \cdot x_i + m''_i \cdot x_i^{1,5}) \right], \quad (6.9)$$

$$c = -2,82 + 0,01 \cdot \left[\sum_{i=1}^{13} (n'_i \cdot x_i + n''_i \cdot x_i^{1,5}) \right], \quad (6.10)$$

где $K'_i, l'_i, m'_i, n'_i, K''_i, l''_i, m''_i, n''_i$ – эмпирические коэффициенты, значения которых представлены в приложении А;

x_i – содержание i -того элемента, %; $i=1-13$ (соответствует химическим элементам в последовательности углерод, марганец, кремний, хром, никель, вольфрам, молибден, ванадий, титан, алюминий, кобальт, ниобий, медь).

Диапазон действия зависимостей (6.6) – (6.10) составляет: $\varepsilon = 5 - 30\%$; $\xi = 0,01 - 150 \text{ с}^{-1}$; $t = 800 - 1300 \text{ }^\circ\text{C}$. При этом возможная ошибка определения сопротивления деформации не превышает 4 %. Для высоко легированных сталей и сплавов точность результатов выше, чем для углеродистых и низколегированных.

Есть и еще одна формула, по которой возможно определять сопротивление металла деформации при горячей обработке давлением

$$\sigma_s = [b - (b - a) \cdot e^{-B \cdot \varepsilon_n}] \cdot [1 - A_1 \cdot (1 - e^{-\lambda_1 \cdot \tau}) - A_2 \cdot (1 - e^{-\lambda_2 \cdot \tau}) - A_3 \cdot (1 - e^{-\lambda_3 \cdot \tau})], \quad (6.11)$$

где τ – время деформации от начала процесса, с;

ε_n – степень деформации от начала процесса;

A_i, λ_i, a, b, B – эмпирические коэффициенты, зависящие от химического состава, структуры сплава и температуры деформации (приведены в приложении А).

В результате экспериментального исследования при холодной деформации дано влияние обжатия на изменение условного предела текучести и временного сопротивления

$$\sigma_{0,2} = \sigma_{0,2\text{исх}} + 100 \cdot a_1 \cdot \varepsilon^{n_1}, \quad (6.12)$$

$$\sigma_B = \sigma_{B\text{исх}} + 100 \cdot a_2 \cdot \varepsilon^{n_2}, \quad (6.13)$$

где $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести, МПа;

σ_B – временное сопротивление, МПа;

a_1, a_2, n_1, n_2 – эмпирические коэффициенты (приложение А);

$\sigma_{0,2\text{исх}}, \sigma_{B\text{исх}}$ – исходные значения предела текучести и временного сопротивления, МПа.

Зная пределы текучести металла в исходном состоянии и после деформа-

ции, можно определить среднее сопротивление деформации.

Имеются и другие методики расчета сопротивления металлов в холодном состоянии. Так Андреюк Л.В. предложил следующее уравнение

$$\sigma_{0,2} = \sigma_0 + 10 \cdot k \cdot \varepsilon^a, \quad (6.14)$$

где k , a – постоянные коэффициенты (приложение А).

6.3 Оборудование, инструмент, образцы

Вся работа выполняется на ЭВМ с применением программ MatCad, Microsoft Office Excel.

6.4 Порядок проведения работы

Последовательность действий при выполнении лабораторной работы следующая:

- проведение расчета сопротивления деформации по предлагаемым преподавателем формулам при изменении температуры, степени и скорости деформации;
- составление программы расчета на ЭВМ по соответствующим формулам;
- построение графиков зависимости сопротивления деформации от параметров деформации.

6.5 Обработка экспериментальных данных

Результаты выполненной работы представляют в виде таблицы и графиков зависимости сопротивления пластической деформации от параметров деформации (температуры, степени и скорости деформации), а также выводов с объяснением зависимости σ_s от того или иного параметра.

Кроме того, необходимо проанализировать сопоставимость результатов расчета по различным формулам, но для одной и той же марки стали или сплава.

6.6 Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- цель работы;
- изложение теоретического введения;
- таблицу данных расчетов;
- графики зависимости сопротивления деформации от температуры, степени

и скорости деформации;
- выводы по работе.

6.7 Контрольные вопросы

1 Какие свойства металла определяют технологический режим их обработки давлением?

2 Что такое сопротивление пластической деформации?

3 От каких параметров деформации зависит сопротивление металлов деформации?

4 Каким образом влияют на сопротивление деформации температура и скорость деформации?

5 Какими методами возможно определение сопротивления металлов деформации?

6 В чем заключается сущность графического метода для определения сопротивления деформации?

7 В чем заключается сущность номографического метода для определения сопротивления деформации?

8 В чем заключается сущность метода термомеханических коэффициентов для определения сопротивления деформации?

Лабораторная работа 7. Влияние холодной обработки давлением на механические свойства металлов и сплавов

7.1 Цель работы

Закрепление знаний о явлениях, сопровождающих холодную пластическую деформацию; изучение влияния степени холодной деформации на механические свойства металлов.

7.2 Теоретическое введение

В процессе холодной деформации, когда температура деформации ниже температуры рекристаллизации, происходит значительное изменение механических свойств металла, называемое деформационным упрочнением или наклепом.

Как известно, энергия, затрачиваемая на осуществление холодной пластической деформации, всегда больше той энергии, которая выделяется в процессе самого деформирования (например, в виде тепла). Часть затраченной энергии накапливается в металле. Рентгеноструктурным и электронно-микроскопическим анализами установлено, что поглощенная металлом энергия расходуется на осуществление процессов пластической деформации и создание дополнительных искажений кристаллической решетки. Сталь в состоянии наклепа обладает более высоким уровнем энергии и повышенным количеством дефектов кристаллической решетки по сравнению со сталью в отожженном состоянии, вследствие чего увеличиваются ее прочностные свойства и понижаются пластические. Обычно о степени наклепа судят по изменению механических свойств металла в зависимости от величин обжатия.

Для осуществления процессов обработки металлов давлением важное значение имеют такие показатели механических свойств, как предел прочности σ_B , предел текучести σ_T , твердость НВ, относительное удлинение δ , относительное сужение ψ .

Характер изменения механических свойств в зависимости от величины холодной деформации для каждого металла различен.

На рисунке 7.1 приведена диаграмма изменения механических свойств стали с содержанием углерода 0,27 % при холодной пластической обработке – волочении.

Эта диаграмма показывает, что с увеличением деформации временное сопротивление и предел текучести возрастают, а относительное удлинение и сужение уменьшаются. Предел текучести возрастает в большей степени, чем временное сопротивление. Это означает, что с увеличением степени деформации интер-

вал между временным сопротивлением и пределом текучести уменьшается. Следовательно, в результате холодной обработки металл наклепывается.

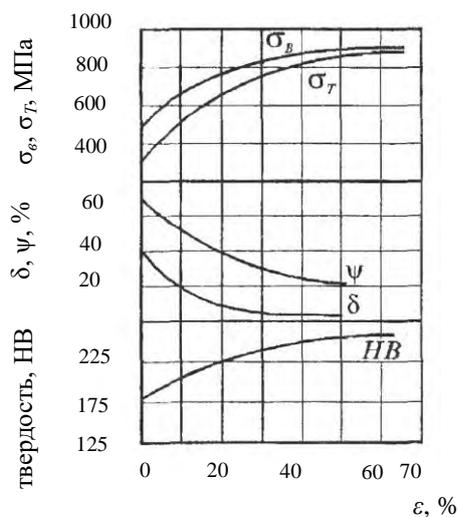


Рисунок 7.1 – Диаграмма изменения механических свойств стали, содержащей 0,27 % углерода при холодном волочении

Из приведенной диаграммы видно, что упрочнение металла при холодной обработке протекает особенно интенсивно при малых степенях деформации. По мере роста деформации (50-65 %) интенсивность изменения свойств заметно снижается; металл при этом почти полностью утрачивает пластические свойства, и дальнейшее его формоизменение затруднено и может вызвать разрушение.

Таким образом, способность металлов упрочняться при деформации иллюстрируется кривыми деформационного упрочнения, которые выражают зависимость истинного напряжения от степени деформации. В некоторых случаях наклеп сопровождается повышением прочностных характеристик в несколько раз. Диаграмма деформационного упрочнения показывает состояние металла после каждой стадии деформации, что необходимо знать для правильного выбора технологического процесса.

Способность металлов упрочняться зависит от типа их кристаллической решетки, что связано с количеством возможных систем скольжения. Установлено, что металлы с гранцентрированной кубической кристаллической решеткой упрочняются сильнее, чем металлы с объемцентрированной кубической кристаллической решеткой.

Наиболее полно объяснит эти факты можно при рассмотрении дислокационного механизма пластической деформации. Степень деформационного упрочнения зависит не просто от наличия дислокаций в металле, а от поведения их скоплений, которое в свою очередь зависит от способов взаимного расположения и взаимодействия дислокаций. Установлено, что различные монокристаллы одного и того же материала, деформированные при одной и той же степени де-

формации, упрочняются различно. Это обусловлено ориентацией монокристалла, точнее, его систем скольжения относительно внешних сил.

На начальных стадиях деформации монокристалла, когда перемещение дислокаций происходит в близких по ориентации системах скольжения, т.е. наблюдается «легкое скольжение», деформация монокристалла сопровождается его незначительным упрочнением. При этом не возникает существенных препятствий, задерживающих их перемещение. Если ориентация монокристалла такова, что деформация в нем осуществляется по нескольким системам скольжения, в том числе и пересекающимся, то такой монокристалл быстро и сильно наклепывается. Это связано с тем, что при перемещении дислокаций в пересекающихся плоскостях скольжения происходит их взаимная блокировка, препятствующая их дальнейшему перемещению. Такое скольжение называют турбулентным и оно сопровождается энергичным упрочнением.

Таким образом, чем больше систем скольжения участвуют в деформации, тем сильнее упрочнение металла.

Изменение прочностных и пластических характеристик в процессе наклепа происходит неодинаково. Как было сказано выше, по сравнению с временным сопротивлением предел текучести с увеличением обжатия растет быстрее и при высоких обжатиях он становится почти равен временному сопротивлению.

Значения σ_b , σ_T и НВ в зависимости от степени деформации обычно определяются на основании соответствующих экспериментальных данных или с использованием ряда эмпирических формул.

Одним из наиболее широко распространенных, быстрых и легко осуществимых методов определения изменения механических свойств является измерение твердости металла, т.е. его способности противодействовать механическому проникновению в него более твердого тела. При вдавливании в металл более твердого предмета в нем возникают местные пластические деформации, сопровождающиеся при дальнейшем увеличении нагрузки местным разрушением.

Наиболее широкое распространение получили показатели твердости по Бринеллю и Роквеллу. В первом случае в поверхность исследуемого образца вдавливаются стальные шарики различных диаметров, во втором – или шарик, или алмазная пирамидка. По диаметру и глубине полученного отпечатка судят о твердости материала и, следовательно, об изменении комплекса механических свойств в результате холодного деформирования.

В данной работе для измерения твердости используется метод Бринелля.

В этом случае стальной шарик диаметром D вдавливают в испытуемый образец под нагрузкой P , приложенной в течение определенного времени, и после снятия нагрузки измеряют диаметр оставшегося на поверхности образца отпечатка d . В поверхностном слое под индентором (шариком) идет интенсивная пластическая деформация, а диаметр отпечатка получается тем меньше, чем вы-

ше сопротивление материала образца деформации, производимой индентором.

Число твердости по Бринеллю определяется из выражения

$$HB = \frac{P}{F} = \frac{P}{\frac{\pi \cdot D}{2} \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} = \frac{P}{D^2} \cdot \left[\frac{\frac{2}{\pi}}{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2}} \right], \quad (7.1)$$

где P – нагрузка, действующая на шаровой индентор, МПа;

F – площадь шаровой поверхности отпечатка, мм²;

D – диаметр индентора, мм;

d – диаметр отпечатка на поверхности образца, мм.

При испытании минимальная толщина испытуемого образца должна быть не меньше десятикратной глубины отпечатка. Расстояние от центра отпечатка до края образца должно быть не менее $2,5 \cdot d$, а расстояние между центрами двух соседних отпечатков – не менее $4 \cdot d$. Рекомендуемое время выдержки образца под нагрузкой для сталей 10 с, для цветных металлов и сплавов 30 с или 60 с. Зная заданные при испытании P и D , и измерив, находят число твердости HB по стандартным таблицам.

Однако необходимо иметь в виду, что твердость не может характеризовать уровень таких механических свойств, как временное сопротивление и предел текучести, т.к. при их определении реализуется различное напряженно-деформированное состояние металла.

7.3 Оборудование, инструмент, образцы

Основное оборудование для проведения работы – лабораторный прокатный двухвалковый стан и прибор для измерения твердости по Бринеллю.

В качестве образцов используются полосы размерами 2-10×30×100 мм из свинца. Предварительно на поверхность образцов наносят две поперечные параллельные риски, нанесенные в 7-10 мм от торцов полосы, которые служат для измерения длины образцов.

Измерение толщины и ширины образцов производят в трех сечениях по длине и берут среднее арифметическое значение. Размеры образцов измеряют штангенциркулем.

7.4 Порядок проведения работы

Последовательность действий при выполнении лабораторной работы сле-

дующая:

- производят измерение толщины исходных образцов;
- измеряют твердость по Бринеллю каждого образца (испытание необходимо повторить не менее трех раз и далее определить среднюю величину твердости; если один из результатов сильно отличается от других, то испытание следует повторить);
- производят прокатку образцов с различными степенями деформации;
- рассчитывают толщину образцов после прокатки и твердость;
- все результаты заносят в таблицу 7.1.

7.5 Обработка экспериментальных данных

Производят расчет и заносят в таблицу 7.1 следующие данные:

- относительное обжатие $\varepsilon = \frac{h_0 - h_1}{h_0}$;
- измеренное значение твердости по Бринеллю;

По результатам расчета строят график зависимости НВ от степени деформации.

Таблица 7.1 – Результаты исследования механических свойств образцов

| Номер образца | h_0 , мм | ε , % | Твердость по Бринеллю, НВ | | | |
|---------------|------------|-------------------|---------------------------|---|---|------------------|
| | | | Номер испытания | | | Среднее значение |
| | | | 1 | 2 | 3 | |
| Образец 1 | | | | | | |
| Образец 2 | | | | | | |
| Образец 3 | | | | | | |

7.6 Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- цель работы;
- изложение теоретического введения;
- краткое описание методики проведения эксперимента;
- таблицу данных измерений и расчетов;
- график зависимости твердости НВ от степени деформации;
- выводы по работе.

7.8 Контрольные вопросы

1 Какие факторы определяют уровень прочности сталей и сплавов?

2 Что такое наклеп, каковы его природа и механизм?

3 Каково изменение структуры стали при холодной обработке давлением?

4 Каково изменение прочностных свойств металлов при холодной обработке давлением?

5 Каково изменение пластических свойств металлов при холодной обработке давлением?

6 Охарактеризовать методы, применяемые для определения механических свойств металлов и сплавов.

7 Как определить твердость по Бринеллю?

Лабораторная работа 8. Изучение течения металла при осадке

8.1 Цель работы

Закрепление знаний о влиянии внешнего трения на процесс деформации; анализ роли условий процесса деформации на характер течения металла.

8.2 Теоретическое введение

Осадка – технологическая операция, которая характеризуется уменьшением размеров заготовки в направлении действующей силы с соответственным увеличением размеров заготовки в плоскости, перпендикулярной действующей силе. В технологии кузнечно-штамповочного производства осадка является как самостоятельной формообразующей операцией, так и вспомогательной для решения промежуточных задачковки.

При свободной осадке течение металла ограничено только направлением действия приложения нагрузки. Характер возможного перемещения точек деформируемого тела при этих условиях деформации определяется законом наименьшего сопротивления, сформулированного С.И. Губкиным: «В случае возможности перемещения точек деформированного тела в различных направлениях каждая его точка перемещается в направлении наименьшего сопротивления».

Наиболее наглядное проявление принципа наименьшего сопротивления наблюдается при осадке металлического образца между параллельными плитами (рисунок 8.1): в результате действия внешней силы в вертикальном направлении высота деформируемого тела уменьшается, вследствие сплошности металла поперечное сечение в горизонтальной плоскости увеличивается.

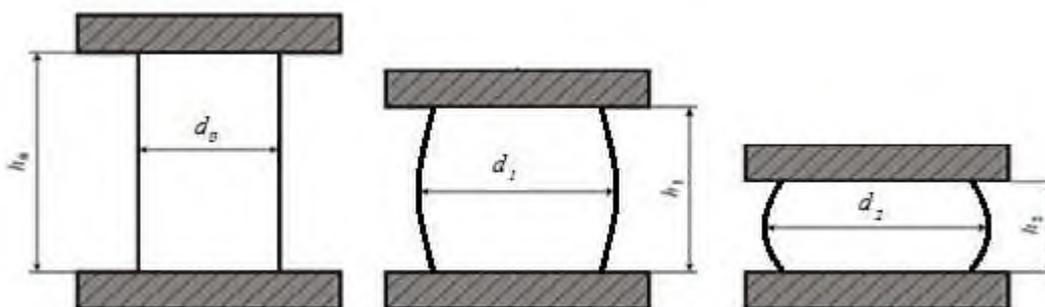


Рисунок 8.1 – Осадка цилиндрического образца

После осадки цилиндра поперечное сечение его остается круглым, однако вследствие неоднородности деформации из-за контактного трения элементы торцевых поверхностей деформируются меньше. Поэтому поперечные сечения заготовки сохраняют круглую форму, а меридиональные сечения приобретают

бочкообразную форму.

В случае действия трения по контактной поверхности образца и инструмента сопротивление течению какой-либо частицы металла в горизонтальной плоскости будет различным. Согласно правилу А.Ф. Головина, перемещение любой точки тела в плоскости, перпендикулярной к действию внешней силы, происходит по кратчайшей нормали к периметру сечения. Следовательно, максимальную конечную деформацию тело получит в тех направлениях, по которым будет передвигаться наибольшее количество точек.

При осадке призмы с квадратным основанием точки, лежащие на биссектрисах углов основания, равноудалены от боковых сторон, поэтому биссектрисы являются линиями раздела, от которых металл перемещается в двух взаимно перпендикулярных направлениях. У призмы с прямоугольным основанием линиями раздела служат биссектрисы углов и прямая, соединяющая вершины углов, образуемая биссектрисами (рисунок 8.2).

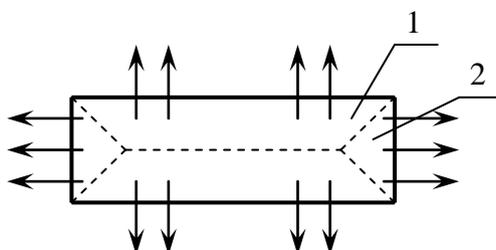


Рисунок 8.2 – Участки с возможными направлениями течения металла

Эта линия и биссектрисы являются геометрическим местом точек, соответствующих началу нормалей одинаковой длины, следовательно, линиями раздела участков с разными возможными направлениями течения частиц.

Принимая во внимание количество точек с кратчайшими нормальными в участках 1 и 2, перемещение точек участков 1 первоначально является преобладающим. По мере увеличения степени осадки образца периметры его поперечных сечений стремятся к эллипсам, а затем эллипсы преобразуются в круги и далее движение точек происходит по радиусам.

Эта закономерность выражена правилом наименьшего периметра: любая форма поперечного сечения призматического или цилиндрического тела при осадке с наличием контактного трения стремится принять форму, имеющую при данной площади наименьший периметр, т.е. в пределе стремится к кругу.

Следует иметь в виду, что кратчайшая нормаль является направлением наименьшего сопротивления только при условии значительного по действию контактного трения.

Принцип наименьшего сопротивления и правило наименьшего периметра используют при назначении режимов деформации промышленных процессов. Например, штамповка круглой в плане поковки может быть осуществлена из за-

готовки с квадратным в плане сечением. При продольной прокатке поперечная деформация (уширение) тем больше, чем меньше ширина контактной поверхности и больше длина очага деформации; наоборот, продольная деформация тем больше и меньше уширение, чем меньше диаметр валков.

8.3 Оборудование, инструмент, образцы

Опыты выполняют на прессе. Для деформации применяют три металлических образца в виде призм с квадратным, шестигранным и прямоугольным основаниями. Размеры образцов определяют штангенциркулем.

8.4 Порядок проведения работы

Работу выполняют в следующей последовательности:

- эскизирование (обводка по периметру) образцов до деформации;
- последовательная осадка заготовок с постепенно возрастающим усилием;
- обводка периметра образцов после каждого обжатия на отдельном листе бумаги с указанием схемы течения металла.

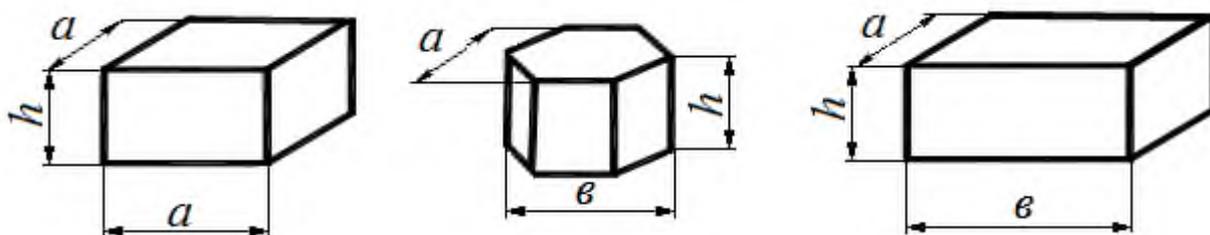


Рисунок 8.3 – Форма и размеры образцов

8.5 Обработка экспериментальных данных

Результаты работы представляют в виде схем течения металла на эскизах образцов и текстом выводов по работе.

8.6 Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- цель работы;
- изложение теоретического введения;
- краткое описание методики выполнения работы;
- эскизы образцов до и после деформации с указанием схемы течения металла;
- выводы с анализом результатов работы.

8.7 Контрольные вопросы

1 Что такое осадке и где она применяется?

2 В чем физическая сущность принципа наименьшего сопротивления?

3 Какие следствия вытекают из принципа наименьшего сопротивления?

4 Какое практическое применение находит принцип наименьшего сопротивления?

5 При соблюдении каких условий можно наблюдать проявление принципа наименьшего сопротивления?

6 Какую роль выполняют силы внешнего трения при выполнении данного опыта?

7 Вы изобрели смазку, при которой коэффициент трения достигает нулевого значения; эту смазку Вы нанесли на поверхность инструмента и образца. Какую картину Вы будете наблюдать в этом случае?

8 Изобразите линии раздела для образцов типа призм, имеющих квадратное, прямоугольное и шестиугольное сечения.

Рекомендуемая литература

1 Куницина Н.Г. Теория и технология процессов обработки металлов давлением: учебное пособие. – Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС», 2015.

2 Обработка металлов давлением / Ю.Ф. Шевакин, В.Н. Чернышев, Р.Л. Шата-лов, Н.А. Мочалов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2005.

3 Зотов В.Ф. Производство проката. – М.: Интермет Инжиниринг, 2000.

**Приложение А. Эмпирические коэффициенты для определения
сопротивления металла деформации**

Таблица А1 – Значения постоянных коэффициентов для определения сопротивления деформации по уравнению (6.5)

| Сталь | $A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot \sigma_0$, МПа | m_1 | m_2 | m_3 |
|----------|--|--------|-------|-------|
| 45 | 1330 | 0,0025 | 0,252 | 0,143 |
| 12Х13А | 2300 | 0,0029 | 0,252 | 0,143 |
| 40Х13 | 4300 | 0,0033 | 0,280 | 0,087 |
| 14Х17Н2 | 7050 | 0,0037 | 0,280 | 0,087 |
| 12Х18Н9Т | 3250 | 0,0028 | 0,280 | 0,087 |
| ХН78Т | 8900 | 0,0032 | 0,350 | 0,098 |
| ХН75МБТЮ | 11000 | 0,0032 | 0,350 | 0,098 |
| ХН70Ю | 13300 | 0,0033 | 0,350 | 0,098 |
| ХН50МКВЮ | 15000 | 0,0032 | 0,350 | 0,098 |

Примечание: Значения термомеханических параметров таковы: $\varepsilon = 5 - 40\%$, $\xi = 0,1 - 100 \text{ с}^{-1}$ для сталей 45, 12ХН3А, 14Х17Н2, 12Х18Н9Т; $\varepsilon = 5 - 25\%$ для остальных сталей; $t = 1000 - 1200^\circ\text{C}$ для сталей 45 и ХН50МКВЮ и $t = 900 - 1200^\circ\text{C}$ для остальных сталей и сплавов.

Таблица А2 – Значения коэффициентов к формуле (6.6)

| Марка стали | K | σ_0 , МПа | a | b | $-c$ |
|-------------|-------|------------------|-------|-------|------|
| СтЗсп | 0,960 | 90,7 | 0,124 | 0,167 | 2,54 |
| 10 | 0,934 | 87,6 | 0,125 | 0,266 | 2,46 |
| 15Г | 0,842 | 103 | 0,126 | 0,188 | 2,74 |
| 35ГС | 0,975 | 89,6 | 0,136 | 0,187 | 2,79 |
| 30ХГСА | 0,996 | 92,4 | 0,134 | 0,250 | 3,34 |
| 15ХСНД | 0,880 | 93,2 | 0,122 | 0,226 | 2,90 |
| 45 | 1,000 | 87,4 | 0,143 | 0,173 | 3,05 |
| 38ХМЮА | 1,016 | 100 | 0,114 | 0,273 | 3,72 |
| 12ХН3А | 1,002 | 88,2 | 0,095 | 0,261 | 2,84 |
| У7А | 0,948 | 78,3 | 0,159 | 0,197 | 2,87 |
| У10А | 0,995 | 80,5 | 0,163 | 0,194 | 3,57 |
| У12А | 1,057 | 70,0 | 0,173 | 0,180 | 3,26 |
| 60С2 | 0,921 | 105 | 0,153 | 0,197 | 3,46 |
| ШХ15 | 1,010 | 79,6 | 0,137 | 0,220 | 4,07 |
| 15Х13 | 0,950 | 145 | 0,102 | 0,125 | 3,50 |
| 20Х13 | 0,900 | 136 | 0,132 | 0,210 | 3,26 |
| Х17Н2 | 0,866 | 126 | 0,130 | 0,063 | 4,72 |
| 15Х25Т | 1,028 | 58,5 | 0,124 | 0,052 | 3,70 |

Таблица А3 – Значения эмпирических коэффициентов к формулам (6.7) - (6.10)

| <i>i</i> | Коэффициенты | | | | | | | |
|----------|--------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|
| | <i>K'</i> | <i>K''</i> | <i>l'</i> | <i>l''</i> | <i>m'</i> | <i>m''</i> | <i>n'</i> | <i>n''</i> |
| C | -65,7 | 141 | 9,17 | -5,24 | 23 | -18,6 | -63 | 43,1 |
| Mn | 134 | -36,2 | -0,314 | 0,107 | 2,37 | -0,591 | -25,6 | 8,07 |
| Si | 31,9 | -37,8 | -4,98 | 3,57 | 5,3 | -3,39 | 59,3 | -45,5 |
| Cr | 155 | -31,3 | -0,29 | 0,0612 | 1,32 | -0,385 | -15,9 | 2,66 |
| Ni | 70,6 | -5,04 | -0,315 | 0,0319 | 0,45 | -0,037 | 7,28 | -0,633 |
| W | -155 | 40,1 | 0,0559 | -0,148 | 1,90 | -0,549 | -29,3 | 11 |
| Mo | -371 | 175 | 3,07 | -1,07 | -2,64 | 0,428 | 16,5 | -5,56 |
| V | 2204 | 1521 | -20,8 | 19,3 | -28,9 | 24 | 286 | -495 |
| Ti | 757 | -625 | -8,44 | 5,56 | -0,0365 | -6,19 | -44,7 | 28,3 |
| Al | 1303 | -908 | 15,2 | 9,55 | 60,6 | -36,5 | -804 | 503 |
| Co | 1874 | -412 | 23,1 | -5,63 | 63,9 | -15,2 | -1155 | 270 |
| Nb | -291 | 219 | -7,09 | 5,3 | 56,3 | -63,9 | -1529 | 1610 |
| Cu | -84 | 127 | 4,96 | -2,62 | -7,59 | 6,43 | -242 | 124 |

Таблица А4 – Значения коэффициентов к формуле (6.11)

| Сталь | <i>t</i> , °C | λ_1, c^{-1} | λ_2, c^{-1} | λ_3, c^{-1} | <i>A</i> ₁ | <i>A</i> ₂ | <i>A</i> ₃ | <i>B</i> | <i>a</i> , МПа | <i>b</i> , МПа |
|--------|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------|----------------|----------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| Ст 3 | 900 | 268 | 7,97 | 0,0182 | 0,460 | 0,232 | 0,109 | 3,70 | 182,0 | 441,4 |
| | 1000 | 246 | 8,18 | 0,0148 | 0,477 | 0,238 | 0,108 | 3,19 | 166,3 | 358,6 |
| | 1100 | 268 | 8,11 | 0,0168 | 0,495 | 0,258 | 0,130 | 3,30 | 126,1 | 303,8 |
| | 1200 | 289 | 8,54 | 0,0220 | 0,545 | 0,241 | 0,121 | 1,86 | 112,3 | 306,3 |
| 45 | 900 | 279 | 9,30 | 0,0175 | 0,495 | 0,164 | 0,082 | 6,22 | 108,9 | 427,3 |
| | 1000 | 315 | 11,40 | 0,0115 | 0,630 | 0,157 | 0,058 | 4,41 | 56,4 | 385,5 |
| | 1100 | 334 | 8,58 | 0,0138 | 0,578 | 0,166 | 0,097 | 5,05 | 67,0 | 443,1 |
| | 1200 | 328 | 11,82 | 0,0049 | 0,675 | 0,152 | 0,080 | 2,17 | 79,1 | 39,03 |
| 18ХНВА | 900 | 277 | 9,46 | 0,0291 | 0,325 | 0,164 | 0,159 | 3,19 | 201,2 | 494,7 |
| | 1000 | 257 | 7,96 | 0,0115 | 0,387 | 0,210 | 0,088 | 3,57 | 166,8 | 378,5 |
| | 1100 | 277 | 7,76 | 0,0162 | 0,408 | 0,241 | 0,177 | 4,27 | 104,8 | 299,2 |
| | 1200 | 247 | 7,15 | 0,0559 | 0,456 | 0,298 | 0,098 | 3,36 | 96,8 | 252,9 |
| 38ХМЮА | 900 | 197 | 8,14 | 0,0179 | 0,419 | 0,198 | 0,103 | 3,16 | 237,5 | 494,2 |
| | 1000 | 290 | 7,16 | 0,0208 | 0,374 | 0,254 | 0,155 | 7,02 | 142,6 | 374,7 |
| | 1100 | 269 | 9,37 | 0,0175 | 0,590 | 0,239 | 0,122 | 4,84 | 109,0 | 344,3 |
| | 1200 | 240 | 8,03 | 0,0156 | 0,463 | 0,279 | 0,165 | 2,30 | 97,6 | 282,8 |
| 60С2 | 900 | 216 | 7,80 | 0,0149 | 0,256 | 0,143 | 0,095 | 3,52 | 147,6 | 312,6 |
| | 1000 | 244 | 8,19 | 0,0152 | 0,383 | 0,195 | 0,107 | 6,22 | 106,3 | 301,4 |
| | 1100 | 248 | 8,57 | 0,0223 | 0,351 | 0,194 | 0,161 | 4,61 | 76,5 | 171,3 |
| | 1200 | 226 | 7,08 | 0,0177 | 0,442 | 0,273 | 0,151 | 3,94 | 58,3 | 194,1 |
| ШХ15 | 900 | 218 | 7,48 | 0,0232 | 0,434 | 0,261 | 0,151 | 3,66 | 318,3 | 542,6 |
| | 1000 | 246 | 8,64 | 0,0211 | 0,485 | 0,247 | 0,153 | 4,31 | 202,9 | 434,8 |
| | 1100 | 279 | 8,62 | 0,0206 | 0,546 | 0,222 | 0,142 | 2,18 | 178,4 | 465,8 |
| | 1200 | 302 | 8,48 | 0,0205 | 0,524 | 0,293 | 0,118 | 2,46 | 123,1 | 340,5 |

Продолжение таблицы А4

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|----------|------|-----|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| У12А | 900 | 246 | 10,20 | 0,0082 | 0,447 | 0,179 | 0,048 | 4,07 | 189,4 | 400,0 |
| | 1000 | 299 | 6,75 | 0,0178 | 0,381 | 0,271 | 0,142 | 2,03 | 139,4 | 435,6 |
| | 1100 | 255 | 8,03 | 0,0154 | 0,458 | 0,024 | 0,131 | 3,55 | 106,7 | 284,8 |
| | 1200 | 200 | 8,87 | 0,0139 | 0,452 | 0,232 | 0,148 | 3,80 | 82,3 | 198,9 |
| 12Х18Н9Т | 900 | 266 | 7,72 | 0,0201 | 0,244 | 0,143 | 0,098 | 1,91 | 306,9 | 611,9 |
| | 1000 | 259 | 7,70 | 0,0176 | 0,285 | 0,180 | 0,101 | 1,31 | 248,5 | 622,9 |
| | 1100 | 269 | 7,72 | 0,0135 | 0,334 | 0,163 | 0,082 | 3,20 | 152,3 | 871,2 |
| | 1200 | 245 | 7,67 | 0,0161 | 0,381 | 0,220 | 0,136 | 2,92 | 115,7 | 310,8 |
| 5ХНТ | 900 | 256 | 8,42 | 0,0168 | 0,306 | 0,182 | 0,0915 | 1,85 | 255,6 | 527,5 |
| | 1000 | 265 | 8,30 | 0,0147 | 0,333 | 0,206 | 0,109 | 4,08 | 145,1 | 314,4 |
| | 1100 | 263 | 8,11 | 0,0143 | 0,408 | 0,241 | 0,132 | 1,54 | 143,1 | 354,0 |
| | 1200 | 259 | 8,83 | 0,0112 | 0,478 | 0,252 | 0,106 | 2,17 | 91,8 | 264,9 |
| 9ХС | 900 | 246 | 7,07 | 0,0219 | 0,264 | 0,227 | 0,146 | 2,40 | 242,3 | 443,6 |
| | 1000 | 232 | 7,28 | 0,0207 | 0,335 | 0,279 | 0,187 | 4,21 | 168,4 | 330,9 |
| | 1100 | 219 | 7,47 | 0,0188 | 0,371 | 0,282 | 0,197 | 4,31 | 113,7 | 258,3 |
| | 1200 | 222 | 7,54 | 0,0142 | 0,466 | 0,274 | 0,172 | 4,60 | 67,0 | 207,2 |
| 30ХГСН2А | 900 | 238 | 8,06 | 0,0182 | 0,375 | 0,204 | 0,0829 | 4,32 | 232,7 | 537,3 |
| | 1000 | 268 | 9,19 | 0,0182 | 0,459 | 0,199 | 0,0996 | 3,29 | 194,5 | 489,8 |
| | 1100 | 248 | 8,85 | 0,0055 | 0,487 | 0,244 | 0,263 | 0,961 | 175,9 | 639,8 |
| | 1200 | 260 | 8,50 | 0,0056 | 0,538 | 0,263 | 0,0482 | 1,21 | 133,8 | 432,7 |

Таблица А5 – Значения коэффициентов к формулам (6.12), (6.13)

| Сталь | $\sigma_{0,2исх}$, МПа | a_1 | n_1 | $\sigma_{в.исх}$, МПа | a_2 | n_2 |
|----------|-------------------------|-------|-------|------------------------|-------|-------|
| 08кп | 230 | 3,46 | 0,60 | 325 | 1,48 | 0,75 |
| 10 | 300 | 2,95 | 0,64 | 570 | 2,78 | 0,62 |
| 20 | 375 | 3,16 | 0,64 | 510 | 0,58 | 0,98 |
| 40 | 350 | 8,36 | 0,48 | 600 | 1,40 | 0,82 |
| 45 | 350 | 8,66 | 0,48 | 585 | 1,44 | 0,83 |
| 65Г | 400 | 17,6 | 0,35 | 780 | 1,90 | 0,78 |
| 25ХГСА | 380 | 5,70 | 0,57 | 580 | 1,70 | 0,76 |
| 30ХГСА | 475 | 8,60 | 0,45 | 640 | 3,40 | 0,61 |
| У10А | 400 | 6,40 | 0,60 | 600 | 2,70 | 0,77 |
| 08Х13 | 325 | 7,20 | 0,45 | 500 | 1,70 | 0,71 |
| 17Х18Н9Т | 410 | 2,40 | 0,91 | 680 | 0,62 | 1,24 |
| ХН78Т | 500 | 7,30 | 0,65 | 800 | 1,30 | 0,87 |

Таблица А6 – Значения коэффициентов к формуле (6.14)

| Сталь | σ_0 , МПа | k | a |
|-------|------------------|-------|------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 10 | 252 | 69,67 | 0,64 |
| 20 | 297 | 81,16 | 0,61 |

Продолжение таблицы А6

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------|-----|--------|------|
| 40 | 365 | 96,78 | 0,50 |
| 45 | 364 | 105,54 | 0,54 |
| 65Г | 495 | 125,90 | 0,35 |
| ШХ15 | 373 | 120,64 | 0,30 |
| 12Х18Н10Т | 252 | 167,50 | 0,81 |

КУНИЦИНА НАТАЛЬЯ ГЕННАДЬЕВНА

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Лабораторный практикум

для студентов направления подготовки 22.03.02 «Металлургия»,
всех форм обучения

| | | |
|---|----------------------------------|-----------------|
| Подписано в печать 20.11.2019 | | |
| Формат 60x90 $\frac{1}{16}$ Рег. № 123 | Печать цифровая Тираж 10 экз. | Уч.-изд.л. 3,94 |

ФГАОУ ВО

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Новотроицкий филиал

462359, Оренбургская обл., г. Новотроицк, ул. Фрунзе, 8.

E-mail: nfmisis@yandex.ru

Контактный тел. 8 (3537) 679729.