

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

Кафедра металлургических технологий и оборудования

Н.Г. Куницина

ТЕОРИЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

по дисциплинам «Теория обработки металлов давлением»,
«Основы теории обработки металлов давлением»
для студентов, обучающихся по направлению подготовки
22.03.02 Металлургия,
Профиль – Обработка металлов давлением,
всех форм обучения

Новотроицк – 2023

УДК 669.77
ББК 34.62
К 91

Рецензенты:

*Зам. начальника ЛПЦ-1 по технологии АО «Уральская Сталь»,
Я.Е. Кузьмин*

*Доцент кафедры металлургических технологий и оборудования
Новотроицкого филиала ФГАОУ ВО НИТУ «МИСИС», к.т.н.
А.Н. Шаповалов*

Куница Н.Г. Теория обработки металлов давлением: лабораторный практикум для студентов направления подготовки 22.03.02 Металлургия, профиль – Обработка металлов давлением, всех форм обучения. - Новотроицк: НФ НИТУ «МИСИС», 2023 – 80 с.

Лабораторный практикум 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.

Рекомендовано Методическим советом НФ НИТУ «МИСИС»

© ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский технологический
университет «МИСИС»,
Новотроицкий филиал, 2023.

Содержание

Введение.....	4
Основы техники безопасности при выполнении лабораторных работ.....	5
Правила подготовки, выполнения, оформления и порядок сдачи лабораторных работ.....	6
Лабораторная работа 1 Ознакомление с оборудованием прокатного стана	8
Лабораторная работа 2 Влияние неравномерности деформации при продольной прокатке на качество продукции.....	16
Лабораторная работа 3 Условие постоянства объема металла и коэффициенты деформации.....	26
Лабораторная работа 4 Закон наименьшего сопротивления в процессах ОМД	32
Лабораторная работа 5 Условие захвата металла валками.....	36
Лабораторная работа 6 Опережение и отставание при прокатке.....	41
Лабораторная работа 7 Исследование уширения металла при прокатке.....	47
Лабораторная работа 8 Влияние параметров деформации на сопротивление металла пластической деформации.....	54
Лабораторная работа 9 Испытание металлов на одноосное растяжение.....	61
Лабораторная работа 10 Испытание металлов на одноосное сжатие.....	70
Рекомендуемая литература.....	75
Приложение А. Эмпирические коэффициенты для определения сопротивления металла деформации.....	76

Введение

Лабораторный практикум составлен в соответствии с требованиями образовательного стандарта высшего образования НИТУ «МИСИС» по направлению подготовки бакалавров 22.03.02 Metallurgy.

Целями лабораторных работ являются:

- закрепление, углубление знаний обучающихся в области процессов обработки металлов давлением, закономерностей формообразования, причин возникновения и путей устранения дефектов изделий;
- освоение методики и техники проведения экспериментальных исследований;
- 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 десять лабораторных работ, которые проводятся в лабораториях обработки металлов давлением и прикладной механики, технической механики по форме «Групповые работы».

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

Перед выполнением лабораторных работ необходимо изучить теоретический материал, изложенный в данном практикуме. Во время выполнения работ необходимо вести записи полученных результатов, на основании которых будут выполнены необходимые расчеты и сделаны выводы.

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 обучающихся и преподавателя.

Каждый обучающийся 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.

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

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

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

- во время работы стана не производить регулировку нажимного устройства;
- запрещается смазывать механизмы стана при его работе, а также производить какой-либо ремонт стана;
- не обтирать валки во время их вращения со стороны входа в них металла;
- при прокатке коротких образцов для подачи их к валкам пользоваться деревянным толкателем для исключения попадания рук в валки;
- 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.

При работе с разрывной машиной необходимо руководствоваться следующими правилами:

- запрещается регулировать и ремонтировать машину во время ее работы, а также устранять неисправности электрооборудования машины, когда она под напряжением;
- не испытывать образцы, требующие нагрузки большей, чем указано в технической характеристике машины;
- не допускать перезагрузки машины при испытании;
- отключить машину от электрической сети после окончания работы.

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

Каждый обучающийся 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 защиты 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 обучающийся 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 обучающийся 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:

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

Для более рационального использования времени желательно, чтобы обучающиеся 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 обучающимся результаты, правильность ведения записей, обработки и оформления результатов. Обучающийся должен ответить на вопросы теоретического и практического характера, связанные с данной работой. При бригадном выполнении лабораторных работ отчет выполняется и защищается каждым обучающимся индивидуально.

В том случае, если обучающийся 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 и журнале кафедры делается соответствующая запись.

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

Лабораторная работа 1. Ознакомление с оборудованием прокатного стана

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. Все оборудование прокатного стана делят на две группы: основное оборудование и вспомогательное.

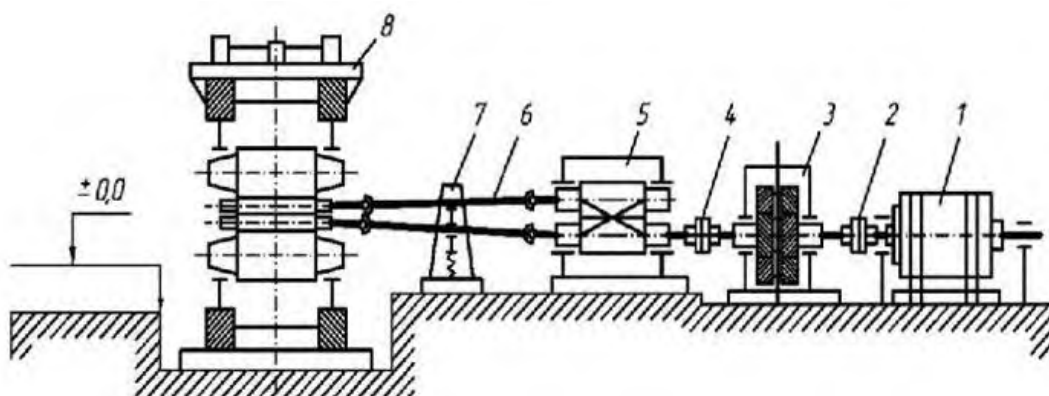
Оборудование, предназначенное для выполнения основной технологической операции – пластической деформации металла, называется основным оборудованием. Линия, по которой располагается основное оборудование, называется главной линией прокатного стана. Оборудование, предназначенное для выполнения всех остальных технологических операций, называют вспомогательным оборудованием.

К вспомогательным технологическим операциям относят нагрев металла в нагревательных печах; охлаждение проката на холодильниках различной конструкции; порезку металла на ножницах и пилах; правку проката в правильных машинах; рольганги для транспортировки полосы; манипуляторы для перемещения полосы вдоль валков; кантователи для поворота полосы вокруг продольной оси (кантовки) и др. Машины и агрегаты для выполнения вспомогательных операций весьма разнообразны; общая масса их значительно превышает массу машин и механизмов, входящих в главные линии стана.

На главной линии прокатного стана (рисунок 1.1) располагается основное оборудование: рабочая клеть; передаточные механизмы, служащие для передачи вращения валкам от двигателя; двигатель.

Рабочая клеть предназначена для пластической деформации металла между вращающимися валками. Соединительные шпиндели – для передачи вращения рабочим валкам от шестеренной клетки. Шестеренная клеть – для разделения крутящего момента между валками от одного двигателя. Коренная муфта – передает вращение валу ведущей шестерни шестеренной клетки от вала редуктора. Редуктор предназначен для изменения крутящего момента и числа оборотов двигателя при передаче вращения от двигателя к рабочим валкам. Моторная муфта соединяет вал двигателя с ведущим валком редуктора. Электродвигатель соз-

дает, необходимый для пластической деформации металла крутящий момент и мощность.

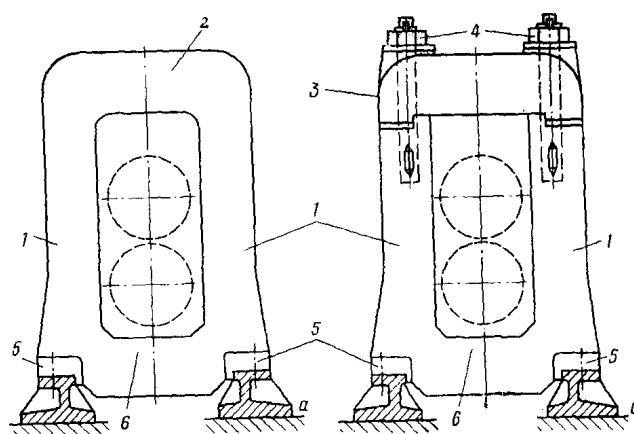


- 1 – электродвигатель; 2 – моторная муфта; 3 – редуктор; 4 – коренная муфта;
 5 – шестеренная клетка; 6 – шпиндели; 7 – уравнивание шпинделей;
 8 – прокатная клетка

Рисунок 1.1 – Схема главной линии прокатного стана

Рабочая клетка

Рабочая клетка прокатного стана является основным узлом, в котором производится прокатка металла. Рабочая клетка (рисунок 1.2) состоит из следующих элементов: двух станин (за исключением многовалковых и специальных клетей), скрепленных между собой и установленных на фундаментных плитах; валков с подушками и подшипниками; установочных механизмов для регулировки положения валков; валковой арматуры 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 жесткостью.



а – закрытые; б – открытые:

- 1 – вертикальная стойка; 2 – верхняя поперечина; 3 – крышка; 4 – болты;
 5 – горизонтальные лапы; 6 – нижняя поперечина

Рисунок 1.2 – Станины рабочей клетки

Прокатные валки

Основным рабочим органом (технологическим инструментом) прокатного стана являются валки, вращающиеся в подшипниках, установленных в рабочих клетях. 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 1.3): 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.

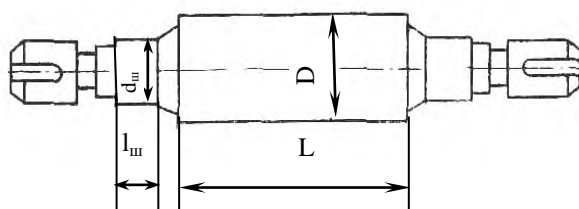


Рисунок 1.3 – Форма и основные элементы валка

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 трещовых шпинделей приводной конец (в этом случае его часто называют трещом) имеет вид крестовины и служит для соединения валка со шпинделем через промежуточную трещовую муфту.

Основными служебными свойствами прокатных валков являются износостойкость и прочность. Валки обжимных клетей сортовых станов и станов холодной прокатки изготавливают из литой или ковальной стали марки 45, 55Х, 60ХН, 90ХФ и др. Чугунные валки, в том числе легированные хромом и никелем, а также с отбеленным (закаленным) поверхностным слоем, применяют для сортовых и листовых станов горячей прокатки, когда требуется высокая износостойкость.

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, соответствующие профилю прокатываемого металла. Эти углубления называют ручьями (ручьи двух валков с зазором между ними образуют калибры), а валки – ручьевыми (калиброванными) (рисунок 1.4).

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

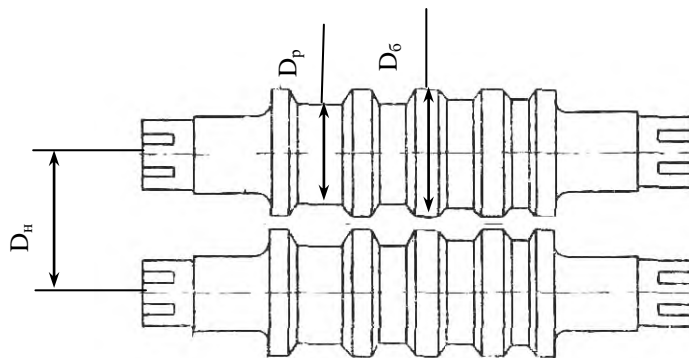


Рисунок 1.4 – Форма сортовых валков

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.

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 2800), поскольку от длины бочки зависит наибольшая ширина проката.

Подшипники прокатных валков

Валки прокатных станков своими шейками опираются на подшипники. Подушки валков с подшипниками устанавливаются в окна станин. Подшипники являются ответственной деталью в рабочей клетке стана, они испытывают нагрузки, в несколько раз превышающие допускаемую в подшипниках других машин, от их стойкости зависит точность прокатного профиля, производительность

стана, себестоимость продукции. Подшипники прокатных станков можно разделить на две группы: подшипники скольжения и качения.

На современных станках устанавливают роликовые подшипники качения или подшипники жидкостного трения (ПЖТ).

Роликовые многорядные подшипники просты в эксплуатации, не требуют герметизации и хорошо самоустанавливаются, имеют продолжительный срок службы.

Подшипники жидкостного трения состоят из конической втулки, плотно закрепленной на шейке вала, и вкладыша с тонким слоем баббитовой заливки, которая тщательно обрабатывается. В зазор между втулкой и вкладышем под давлением попадает жидкая очищенная смазка. Принцип работы этих подшипников заключается в том, что между шейкой вала и подшипником всегда сохраняется масляная пленка, благодаря чему шейка вала как бы плавает в подшипнике. Подшипники жидкостного трения обеспечивают точную настройку стана, имеют низкий коэффициент трения и практически не изнашиваются.

Механизмы и устройства для установки валков

Для обеспечения регулировки положения и установки валков рабочие клетки оснащены различными вспомогательными механизмами.

Для того, чтобы обеспечить необходимое обжатие в каждом проходе, необходимо устанавливать соответствующее расстояние (раствор) между валками. На прокатных станках, где производится по несколько проходов в одной клетке, это расстояние необходимо изменять от прохода к проходу. На станках, где в каждой клетке осуществляется только один проход (многоклетевые непрерывные и полунепрерывные станы и др.) в процессе прокатки нужно изменять настройку стана в связи с износом валков.

В двухвалковых клетях расстояние между валками изменяется либо перемещением верхнего вала, либо перемещением двух валков – нижнего и верхнего; в трехвалковых клетях (клетки трио) – перемещением верхнего и нижнего валков; в четырехвалковых клетях (клетки кварто) – перемещением верхнего вала.

Все виды механизмов для установки валков можно разделить на следующие группы:

- нажимные устройства;
- уравновешивающие устройства для верхних валков;
- устройства для осевой установки валков.

Вертикальную регулировку положения верхнего и нижнего валков рабочей клетки осуществляют с помощью нажимных механизмов. Нажимной механизм состоит из гайки, закрепленной в станине клетки, и нажимного винта, упирающегося в подушку верхнего вала. Нажимной механизм приводится от электродвигателя, установленного на станине, через червячный редуктор.

В осевом направлении положение валков регулируют с помощью планок с болтовыми соединениями или специальных рычажных приспособлений.

Постоянное прижатие подушек верхнего валка к нажимному винту обеспечивается уравнивающими устройствами, простейшие из которых осуществляют уравнивание с помощью пружин и тяг, проходящих через отверстие в станинах. Валки большого диаметра, а также шпиндели уравнивают грузовыми и гидравлическими устройствами.

Передаточные механизмы и устройства

Передаточные механизмы и устройства в зависимости от назначения и конструкции прокатного стана могут быть различными.

На крупных станах (толстолистовых), а также на станах, прокатывающих металл с большой скоростью, применяют индивидуальный привод рабочих валков от отдельных электродвигателей: в этом случае передачным 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. 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.

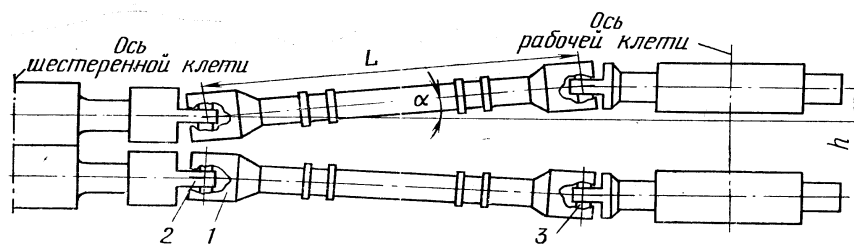
Если частота вращения электродвигателя не соответствует частоте вращения валков, то в линии привода валков устанавливают редуктор и коренную зубчатую муфту.

Главный электродвигатель прокатного стана является двигателем специального (металлургического) типа с воздушным продуваемым охлаждением. Для станов с постоянной скоростью прокатки (черновых клетей непрерывных станов) применяют синхронные (реже асинхронные) электродвигатели. Для станов 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.

Соединительные шпиндели

Соединительные шпиндели служат для передачи вращения валкам от шестеренной клетки. Кроме того, они могут передавать вращение от валков одной клетки к валкам другой при линейном расположении клетей.

На современных прокатных станах применяют универсальные шпиндели, устроенные по принципу шарнира Гука, и позволяют передавать вращения валкам при значительном отклонении осей шестеренных и прокатных валков, получающемся при подъеме верхнего валка (рисунок 1.5).



1 – головка шпинделя; 2 – лопасть на конце валка; 3 – бронзовый вкладыш

Рисунок 1.5 – Схема расположения универсальных шпинделей

Универсальные шпиндели работают плавно, без ударов. Шарнир шпинделя состоит из головки шпинделя, лопасти на конце рабочего или шестеренного валка, бронзовых вкладышей и сухаря, соединяющего их. Один из шарниров шпинделя закреплен на конце ведущего вала шестеренной клетки, а другой – со стороны валка и может перемещаться в осевом направлении при перемещении верхнего валка вниз или вверх.

1.3 Порядок проведения работы

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

1.5 Контрольные вопросы

- 1 Что называется 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?
- 8 Перечислите основные элементы рабочих клетей.
- 9 Чем отличаются станины открытого типа от станин закрытого типа?
- 10 Какие подшипники используют в прокатных станах?

Лабораторная работа 2. Влияние неравномерности 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

В процессах обработки давлением различные точки поперечного сечения заготовки, как правило, получают неодинаковые высотные деформации, т.е. имеет место неравномерность распределения деформаций. Неравномерность деформации при обработке металлов давлением нежелательна, так как приводит к неравномерности распределения механических свойств по сечению готового изделия, появлению дополнительных напряжений, которые могут привести к искажению формы готового изделия, что в значительной мере ухудшает качество металла. Неравномерное обжатие может привести также и к неоднородности структуры.

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, 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 сниматься 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.

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

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 пока-

заны 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.

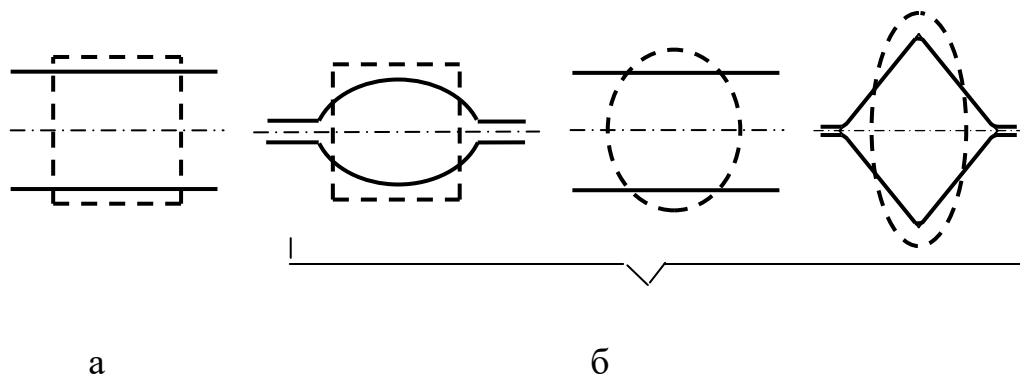


Рисунок 2.1 – Примеры равномерной (а) и неравномерной (б) деформации при прокатке (по И.М. Павлову)

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 неравномерность деформации. Допустим, что заготовка неравномерно нагрета 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 заготовки, большой степени деформации и малой пластичности металла дополнительные напряжения растяжения могут вызвать разрывы внутренних слоев. Если заготовка была нагрета по сечению равномерно, а затем охлаждена 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 сжа-

тия, 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.

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.

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.

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

Неравномерность деформации по ширине прокатываемой полосы:

Этот вид неравномерной деформации проявляется в неравномерном распределении обжатия по ширине полосы и вызывается следующими действующими совместно или порознь причинами:

- неодинаковым зазором между валками (перекос валков, неравномерный разогрев бочки валка, выработка валка, прогиб калибры на валках имеют разную высоту по ширине);

- неодинаковой исходной толщиной полосы по ширине.

Степень неравномерности деформации по ширине можно охарактеризовать диаграммами естественных вытяжек. За естественную принимается вытяжка, которую получила бы та или иная часть полосы, если бы она деформировалась отдельно, вне связи с другими частями. Естественные вытяжки сравниваются со средней вытяжкой, которая определяется как отношение сечений до прохода и после него. Чем больше разница между естественной и средней вытяжкой, тем больше неравномерность деформации.

Выравнивание вытяжек неизбежно приводит к различию уширения неравномерно обжимаемых участков полосы, что вытекает из закона постоянства объема. Удлинение частей полосы, получающих большее обжатие, меньше ожидаемого (естественного), поэтому уширение их больше величины естественного (свободного) уширения. Такое уширение называют вынужденным. Удлинение частей полосы, получивших меньшее обжатие, больше естественного удлинения. Вследствие этого ширина их уменьшается. Сужение полосы (отрицательное уширение) называют утяжкой.

При прокатке широких полос малой толщины, когда уширение практически отсутствует, выравнивания вытяжек не происходит. Каждая часть полосы получает естественную вытяжку и, если обжатия неравномерны, длина неравномерно обжимаемых участков будет неодинаковой. Но это возможно лишь при прокатке коротких полос. В большинстве случаев избыток длины сильно обжимаемых участков полосы образует волны, но если прочность и жесткость этих участков достаточно велики, то на слабо обжатых участках полосы образуются надрывы.

Выравнивание длин при неравномерной деформации по ширине приводит к появлению дополнительных напряжений. Те части, которые обжимались в большей степени, получают вытяжку меньше естественной, так как их сдерживают слабо обжимаемые участки. В результате в зонах повышенного обжатия возникают напряжения сжатия. Наоборот, части полосы, обжатые в меньшей степени, будут растягиваться под действием частей, получивших большее обжатие. Напряжения разных знаков взаимно уравновешиваются по отдельным зонам полосы и, следовательно, они являются напряжениями первого рода.

Напряжения сжатия могут привести к волнистости или коробоватости про-

катываемой полосы. Напряжения растяжения при превышении предела прочности металла могут привести к появлению трещин, рванин. Например, при прокатке полосы с утолщенными краями по краям возникают напряжения сжатия. При достаточной их ширине края могут получиться волнистыми. Средняя часть полосы получает напряжения растяжения. Если напряжения растяжения превысят предел прочности металла, посередине могут образоваться рванины.

Несимметричная неравномерность деформации большей частью приводит к искривлению прокатываемой полосы. Примером несимметричной неравномерности деформации по ширине может послужить прокатка полосы прямоугольного сечения в перекошенных валках. В данном случае обжатия от одной кромки к другой постепенно возрастают, соответственно увеличиваются и вытяжки. Разность вытяжек, образующаяся в очаге деформации, воздействует как на передний, так и на задний конец прокатываемой полосы. При этом передний конец получает плавное искривление в горизонтальной плоскости (серповидность), загибаясь в сторону меньше вытяжки. Задний конец поворачивается в сторону меньшего обжатия, приводя к смещению полосы вдоль бочки валка (полосу ведет) и даже выбрасыванию её за пределы рабочей части валков. Аналогичные явления наблюдаются в случае прокатки полосы клиновидного поперечного сечения при параллельном расположении валков.

Неравномерность деформации по ширине может привести к образованию такого дефекта, как порез. Он получается при прокатке тонких листов в сильно вогнутых валках. В этом случае края полосы на входе в валки «ведет» к середине, где лист собирается в складку, в результате чего в валки попадает тройная толщина листа. В этом месте лист сам себя режет, мнется и идет в брак.

При прокатке полосы в вогнутых валках неравномерность деформации способствует центрированию полосы относительно середины бочки валков. При смещении полосы вправо правая кромка получает повышенное обжатие, задний конец смещается влево и полоса возвращается в середину бочки.

Неравномерность деформации по толщине прокатываемой полосы:

Этот вид неравномерной деформации проявляется как неодинаковое обжатие отдельных горизонтальных слоев полосы. Одной из причин её может быть прокатка непрогретой заготовки (середина холоднее, поверхностные слои горячее). При прокатке такого металла в средней его части также возникают внутренние напряжения растяжения и, как следствие их, внутренние трещины.

При неравномерной деформации по толщине возможно образование трещин и на поверхности металла, если сопротивление деформации поверхностного слоя металла больше, чем в середине (например, на поверхности металл подстыл).

Неравномерность деформации по толщине может быть связана также со своеобразным распределением деформирующих напряжений. Если сжимающие

силы, действующие со стороны валков на полосу в очаге деформации, представить в виде силовых линий, то эти линии будут искривлены, и плотность их будет уменьшаться от контактной поверхности к середине полосы. В соответствии с этим и величина сжимающих напряжений будет уменьшаться в том же направлении. Степень искривления силовых линий зависит от соотношения между высотой и длиной очага деформации. Небольшая степень искривления силовых линий и, следовательно, небольшая разница в величине напряжений сжатия будут при большой высоте очага деформации и малой его длине. И, напротив, при малой высоте очага деформации и большой его длине можно считать, что силовые линии почти не искривлены и напряжения сжатия в любом горизонтальном слое очага деформации одинаковы.

При неравномерной деформации по толщине также, как и при неравномерной деформации по ширине, имеют место вынужденное уширение и утяжка. Слои металла, получившие большее обжатие, имеют вынужденное уширение, а слои, получившие меньшее обжатие, – утяжку.

Так, при прокатке непрогретого металла получают выгнутые боковые кромки. Аналогично протекает деформация высокой полосы. То же самое можно наблюдать при прокатке биметаллической сталемедной проволоки. Медная оболочка, получая вынужденное уширение, как бы сползает со стального сердечника.

Выпуклая боковая кромка получается при горячей прокатке, когда металл с поверхности охлаждается благодаря попаданию охлаждающей валки воды и прикосновению с холодными валками.

Неравномерная деформация по толщине полосы приводит к появлению в металле дополнительных напряжений. В слоях полосы, получивших большие обжатия, возникают дополнительные напряжения сжатия, а в слоях, получивших меньшие обжатия, – напряжения растяжения. Дополнительные напряжения могут привести к дефектам. Наиболее частым дефектом при горячей прокатке, например, биметаллической проволоки, имеющей стальной сердечник и медную оболочку, является разрыв стального сердечника. Стальной сердечник, имея большее сопротивление деформации, меньше деформируется по сравнению с медной оболочкой. В результате в нем возникают дополнительные напряжения растяжения. Если эти напряжения превысят предел прочности сердечника, в нем возникают трещины.

Неравномерность деформации по длине прокатываемой полосы:

В каждый данный момент прокатки в стадии деформации находится лишь небольшая часть длины полосы (очаг деформации). Но даже в пределах этой небольшой части деформация не является равномерной. От плоскости входа в валки к плоскости выхода уменьшается скорость деформации, изменяется напряженное состояние и соотношение между продольной и поперечной деформация-

ми.

Взаимодействие переднего и заднего концов с деформируемой частью полосы накладывает свой отпечаток на напряженное состояние и характер перемещения частиц в очаге деформации.

Таким образом, процесс прокатки сам по себе служит примером резко выраженной неравномерности деформации по длине полосы, но неравномерность эта проявляется на прокатанной полосе весьма своеобразно. Вследствие регулярности процесса прокатки через очаг деформации последовательно проходят все участки длины полосы и каждый из них в равной мере испытывает неравномерность деформации. В результате размеры форма поперечного сечения, свойства металла и характер остаточных напряжений по все длине прокатанной полосы получаются одинаковыми. Исключение составляют лишь небольшие участки длины по концам полосы, прокатанные в условиях неустановившегося процесса. В связи с этим обычно считают, что деформация по длине прокатываемой полосы равномерна, если все поперечные сечения получают при прокатке одинаковое изменение формы и размеров, а описанную выше неравномерность учитывают лишь при анализе процессов, протекающих в очаге деформации.

Другой вид неравномерности деформации по длине полосы наблюдается при изменении расстояния между валками за время одного прохода из-за колебаний упругих деформаций валков и других деталей рабочей клетки, вследствие изменения усилия прокатки или из-за «биения» валков при отсутствии строгой соосности шеек и бочек. Сечение полосы, получаемой в результате такой прокатки, будет неодинаково по её длине, причем изменяться может не только толщина, но и ширина полосы, а иногда и свойства прокатываемого металла.

В большинстве случаев неравномерность деформации такого вида нежелательна, так как она снижает точность размеров прокатываемой полосы. Особенно сказывается её вредное влияние при прокатке тонких полос, когда упругие деформации деталей рабочей клетки становятся соизмеримыми с толщиной прокатываемой полосы.

Для повышения точности прокатки стараются избегать «биения» валков, применяют рабочие клетки повышенной жесткости или специальные клетки предварительно напряженной конструкции. Иногда неравномерность обжатия по длине полосы создают специально, например, при выравнивании неравномерности толщины исходной полосы, при получении периодических профилей или, как их ещё называют, профилей переменного сечения (например, круглого профиля с переменным по длине диаметром).

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.

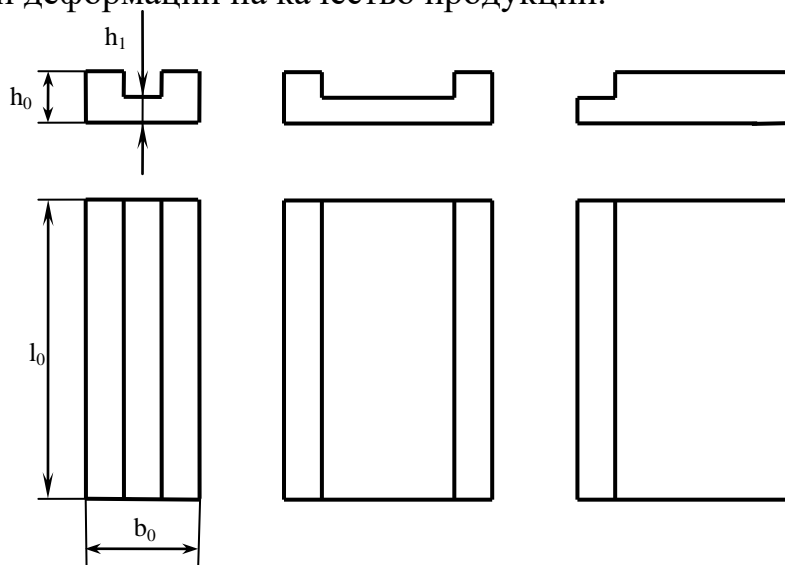


Рисунок 2.2 – Образцы для изучения неравномерности деформации при продольной прокатке

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 Дайте определение и пример равномерной пластической деформации.
- 3 Какие Вам известны причины неравномерности деформации?
- 4 Что такое макро- и микронеравномерность деформации?
- 5 Перечислите дефекты продукции, обусловленные неравномерностью деформации.
- 6 Назовите причины возникновения дополнительных напряжений.
- 7 К каким последствиям приводит неравномерность деформации при прокатке?
- 8 Приведите примеры технологических процессов, где проявляется влияние геометрических факторов, приводящих к неравномерной деформации.
- 9 Приведите примеры технологических процессов, где проявляется влияние контактных сил трения, приводящих к неравномерной деформации.
- 10 Приведите примеры образования дефектов в изделиях вследствие неравномерности деформаций.

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; обучение оцениванию погрешности измерений.

3.2 Теоретическое введение

Если деформация, вызванная внешними силами, исчезает при прекращении действия внешних сил и твердое тело полностью восстанавливает свои исходные форму и размеры, то такую деформацию называют упругой. Если же при прекращении действия внешних сил твердое тело не полностью восстанавливает свои исходные форму и размеры, то такую деформацию называют пластической. Как та, так и другая происходят без разрушения деформируемого тела или отдельных его участков, т.е. без нарушения сплошности. Пластическая деформация литого металла сопровождается незначительным (1-3 %) изменением объема, в результате чего плотность его несколько возрастает за счет ликвидации имеющихся в нем пустот. Это изменение не имеет практического значения при решении задач, связанных с определением напряжений и деформаций, поэтому им в технологических расчетах пренебрегают и считают, что объем тела до пластической деформации равен его объему после деформации. Математически условие постоянства объема можно записать в виде

$$V_0 = V_1 = h_0 \cdot b_0 \cdot l_0 = h_1 \cdot b_1 \cdot l_1 = \text{const}, \quad (3.1)$$

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.

Это выражение является частным случаем закона сохранения массы $m = \rho V = \text{const}$, когда плотность металла в процессе пластической деформации не изменяется. Условие постоянства объема неразрывно связано с рассматриваемым в некоторых случаях в теории ОМД условием несжимаемости, согласно которому алгебраическая сумма логарифмических степеней деформации по трем взаимно перпендикулярным направлениям равна нулю (см. ниже). При этом, по крайней мере одна из степеней деформации имеет знак, противоположный знаку двух других.

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: $\varepsilon' = \frac{h_0 - h_1}{h_1} \cdot 100\%$. 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)

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

Расчет обжатий по проходам следует строить таким образом, чтобы при необходимости сохранения постоянства вытяжки абсолютное обжатие снижалось пропорционально уменьшению толщины полосы. Если же требуется снижение вытяжки от прохода к проходу, то уменьшение абсолютного обжатия должно производиться в большей мере. В противном случае можно ожидать разруше-

рушения металла.

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).

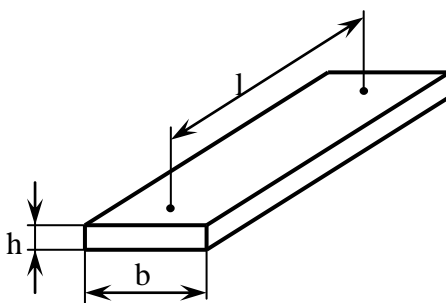


Рисунок 3.1 – Обозначение размеров образцов

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

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

29

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 В чем заключается условие постоянства объема при обработке металлов давлением?
- 2 Какое практическое использование находит условие постоянства объема?
- 3 Перечислите основные показатели деформации.
- 4 Что такое обжатие по высоте и коэффициент высотного обжатия?
- 5 Физический смысл логарифмических деформаций?
- 6 Как рассчитать степень деформации при осадке?
- 7 Когда деформации положительны, а когда отрицательны?
- 8 Запишите закон постоянства деформируемого объема.
- 9 Запишите условие постоянства объема через коэффициенты деформации.
- 10 Что такое смещенный объем при деформации?

Лабораторная работа 4. Закон наименьшего сопротивления в процессах ОМД

4.1 Цель работы

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

4.2 Теоретическое введение

При решении задач обработки металлов давлением необходимо знать перемещения металла и соотношения между этими перемещениями в разных направлениях. Качественно направление течения металла определяют на основании принципа наименьшего сопротивления, предложенного Г. Треска в 1695 г. «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 4.1): в результате действия внешней силы в вертикальном направлении высота деформируемого тела уменьшается, вследствие сплошности металла поперечное сечение в горизонтальной плоскости увеличивается.

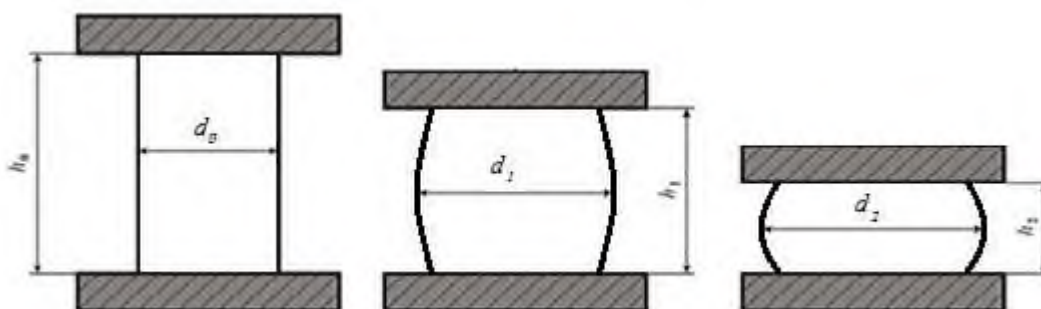


Рисунок 4.1 – Осадка цилиндрического образца

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 4.2).

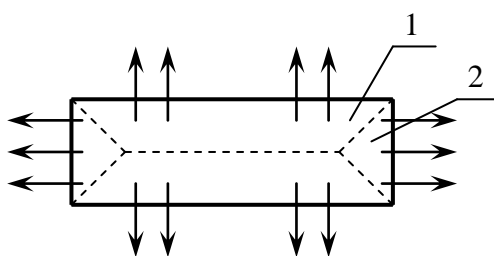


Рисунок 4.2 – Участки с возможными направлениями течения металла

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 нормальями в участках 1 и 2, перемещение точек участков 1 первоначально является преобладающим. По мере увеличения степени осадки образцы 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.

При осадке заготовки, имеющей форму прямоугольного параллелепипеда, плоскими бойками при отсутствии контактного трения движение частиц в плоскостях, нормальных к направлению действия внешней силы, носит радиальный характер. Поперечные сечения в процессе деформации будут оставаться подобными исходному сечению (рисунок 4.3).

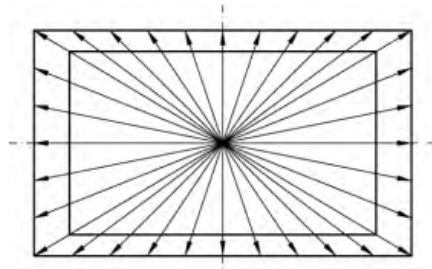


Рисунок 4.3 – Направление движения точек при осадке заготовки без трения

Из закона наименьшего сопротивления вытекает принцип минимума полной энергии деформации. Его можно сформулировать так: «Любое ограничение течению металла увеличивает энергию деформации, т.е. минимум энергии затрачивается тогда, когда формоизменение происходит без ограничения течению металла по линиям наименьшего сопротивления».

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

4.3 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.

4.4 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.

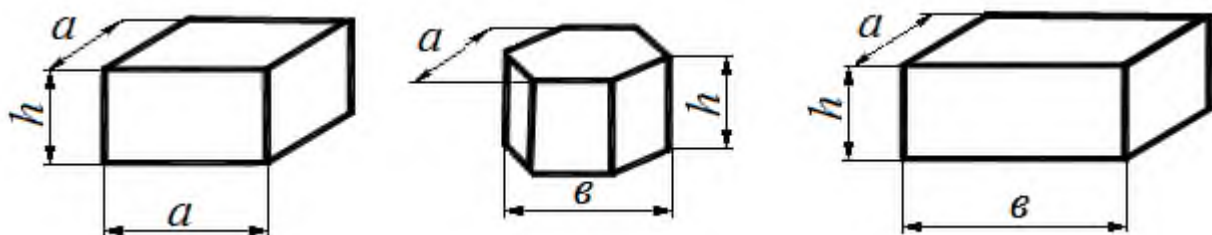


Рисунок 4.3 – Форма и размеры образцов

4.5 Обработка экспериментальных данных

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

4.6 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.

4.7 Контрольные вопросы

- 1 В чем физическая сущность принципа наименьшего сопротивления?
- 2 Какие следствия вытекают из принципа наименьшего сопротивления?
- 3 Какое практическое применение находит принцип наименьшего сопротивления?
- 4 При соблюдении каких условий можно наблюдать проявление принципа наименьшего сопротивления?
- 5 Какую роль выполняют силы внешнего трения при выполнении данного опыта?
- 6 Покажите на рисунке движение металла в очаге пластической деформации при прокатке толстых полос.
- 7 Как связано сопротивление перемещению и расстояние частицы от контура заготовки?
- 8 Приведите примеры использования принципа наименьшего сопротивления в процессах обработки металлов давлением.
- 9 Сформулируйте принцип минимума полной энергии деформации.
- 10 Изобразите линии раздела для образцов типа призм, имеющих квадратное, прямоугольное и шестиугольное сечения.

Лабораторная работа 5. Условие захвата металла валками

5.1 Цель работы

Закрепление знаний об условии захвата металла валками; анализ влияния различных условий трения на величину угла захвата.

5.2 Теоретическое введение

Определяющим фактором процесса прокатки является коэффициент трения, влияющий на захватывающую способность валков, процесс прокатки, уширение и опережение, силовые условия и др. При соприкосновении металла с валками на него действуют две силы N , нормально направленные к поверхности валков в точке соприкосновения металла с валками, и две силы трения T , направленные по касательной в точке соприкосновения (рисунок 5.1).

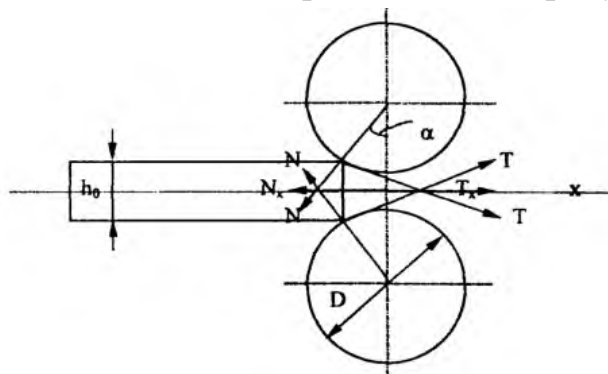


Рисунок 5.1 – Равновесие сил при естественном захвате

Проектируя силы N и T на ось прокатки x и, исходя из условия равновесия всех сил в зоне деформации, получим

$$N_x = T_x. \quad (5.1)$$

Сила $N_x = N \cdot \sin \alpha$ стремится вытолкнуть металл из валков, а сила $T_x = T \cdot \cos \alpha$ - втянуть металл в валки. Очевидно, что захват металла валками произойдет, если

$$T \cos \alpha \geq N \cdot \sin \alpha,$$

а т.к. $T = N \cdot f$, то $f \cdot \cos \alpha \geq \sin \alpha$ или

$$\operatorname{tg} \alpha \leq f, \quad (5.2)$$

где f - коэффициент трения между металлом и валками.

Следовательно, захват металла валками можно улучшить тремя путями:

- увеличивая коэффициент трения;
- уменьшая угол захвата;
- прикладывая горизонтальную вталкивающую силу.

При постоянном коэффициенте трения уменьшить угол захвата можно следующим образом:

- при заданном обжатии путем увеличения диаметра валков;
- при заданном диаметре валков путем уменьшения обжатия;
- при заданном обжатии и диаметре валков путем уменьшения исходной толщины заготовки.

Увеличивать коэффициент трения можно различными способами, некоторые из них используют на практике. Так, например, известно, что захват металла валками при прочих равных условиях лучше на шероховатых валках, чем на гладких; на горячих, чем на холодных и т.д.

Между углом захвата α , диаметром валков и обжатием существует зависимость

$$h_0 - h_1 = D \cdot (1 - \cos \alpha)$$

отсюда

$$\alpha = \arccos \left(1 - \frac{\Delta h}{D} \right). \quad (5.3)$$

где D - диаметр валков, мм.

В случае установившегося процесса (когда вся зона деформации заполнится металлом) при рассмотрении условий равновесия следует учитывать не полный угол захвата α (рисунок 5.2), а лишь ту его часть (угол φ), под которой располагается равнодействующая элементарных реактивных сил.

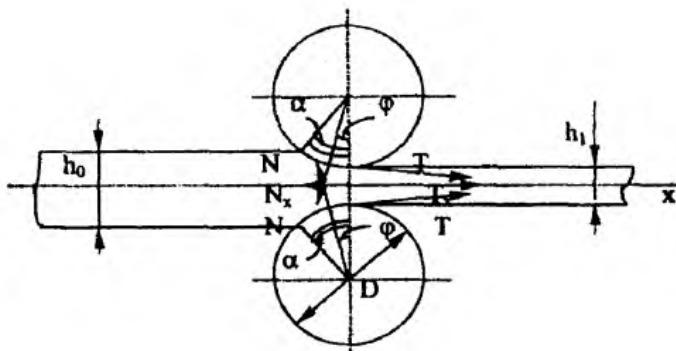


Рисунок 5.2 – Установившийся процесс прокатки

Так как соответствующий угол φ в первом приближении можно принять $\varphi = \alpha/2$, то условие равновесия характеризуется равенством $\varphi = \beta$, или $\alpha = 2\beta$. Таким образом, установившийся процесс прокатки осуществим легче, чем его началь-

ная стадия (естественный захват). Поскольку, однако, всякий случай прокатки должен начинаться со стадии «естественного захвата» металла валками, то после заполнения зоны деформации металлом образуется избыток сил трения, и тогда величину обжатий можно увеличить. Максимальный угол захвата при установившемся процессе определяют путем прокатки клиновых образцов (рисунок 5.3).

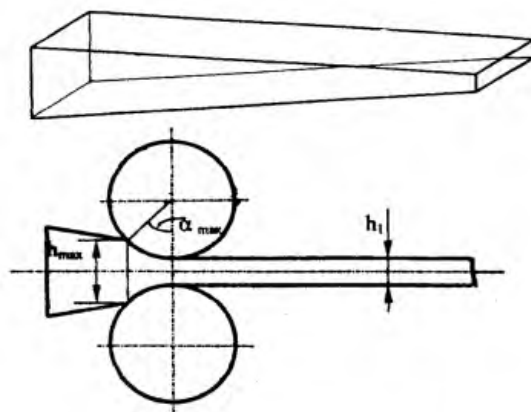


Рисунок 5.3 – Клин до и после прокатки

Между максимальным углом естественного захвата в начальный момент и максимальным углом при установившемся процессе существует определенная зависимость

$$\frac{\alpha'_{\max}}{\alpha_{\max}} = K. \quad (5.4)$$

Величина K больше единицы и характеризует увеличение обжатия после заполнения зоны деформации металлом. В литературе это явление называют «сверхобжатием».

5.3 Оборудование, инструмент, образцы

Работа проводится на лабораторном двухвалковом одноклетевом стане. Используют образцы из свинца размерами $10 \times 40 \times 70$ мм. Одна из граней 10×40 мм должна быть тщательно зашпигана под угольник. Для измерения образцов до и применяют штангенциркуль. Измерение толщины и ширины образцов производят в трех сечениях по длине и берут среднее арифметическое значение.

5.4 Порядок проведения работы

1 Определение максимального угла захвата и коэффициента трения в

начале прокатки

Образцы прокатывают на сухих, тщательно протертых ацетоном валках. Валки устанавливают так, чтобы зазор между ними был примерно равен 2 мм. Образец кладут на стол при помощи деревянного бруска, слегка прижимают его обработанной (10×40 мм) гранью к вращающимся валкам. Затем медленно поднимают верхний валок до тех пор, пока образец не захватится валками и прокатается.

Валки смазывают маслом и, аналогично описанному, прокатывают второй свинцовый образец. Измерив толщину образца (до и после прокатки) и диаметр валков, по формуле (5.3) определяют максимальный угол захвата в начальный момент α_{\max} , а по формуле (5.2) - коэффициент трения f . Все данные заносят в таблицу 5.1.

2 Определение максимального угла захвата при установившемся процессе

Устанавливают зазор между валками приблизительно 1-2 мм. Изготовленный из свинца клин (рисунок 5.3) прокатывают на сухих валках, пока не начнется буксование валков по металлу. После этого стан останавливают, поднимают верхний валок и извлекают недокатанный клин. Замерив толщину прокатанной части клина h_1 и толщину в месте буксования h_{\max} , по формуле (5.3) определяют максимальный угол захвата при установившемся процессе α'_{\max} и сравнивают его с начальным углом захвата α_{\max} по формуле (5.4). Все данные заносят в таблицу 5.2.

5.5 Обработка экспериментальных данных

Производят расчет параметров, отраженных в таблицах 5.1 и 5.2.

Делают анализ, в котором необходимо отразить влияние изменяемых в работе параметров на угол захвата при прокатке. Обосновать это влияние.

Таблица 5.1 – Результаты определения максимального угла захвата и коэффициента трения в начале прокатки

Состояние поверхности валков	h_0 , мм	h_1 мм	Δh , мм	$\cos \alpha$	α'_{\max}	f
Сухие						
Смазанные						

Таблица 5.2 – Результаты определения максимального угла захвата при установившемся процессе

Образец	h_{\max} , мм	h_1 мм	$\cos \alpha$	α'_{\max}	K
Клин					

5.6 Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- цель работы;
- конспект теоретического введения;
- краткое описание методики проведения эксперимента;
- результаты эксперимента и их анализ;
- выводы по работе.

5.7 Контрольные вопросы

- 1 Понятие угла захвата?
- 2 Какие силы действуют на металл во время прокатки со стороны валков?
- 3 Какая из сил, действующих на металл при прокатке, является вталкивающей, а какая – выталкивающей?
- 4 Какими способами можно улучшить захват металла валками?
- 5 Как можно уменьшить угол захвата?
- 6 Каким способом определяют на практике максимальный угол захвата?
- 7 Опишите явление «сверхобжатия».

Лабораторная работа 6. опережение и отставание при прокатке

6.1 Цель работы

Закрепление знаний о явлениях опережения и отставания при прокатке; развитие навыков исследования процесса прокатки; обучение умению анализировать полученные результаты.

6.2 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

$$\frac{F_i \cdot l_i}{\tau} = F_i \cdot v_i, \quad (6.1)$$

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

$$F_i \cdot v_i = \text{const}, \\ F_0 \cdot v_0 = F_i \cdot v_i = F_1 \cdot v_1, \quad (6.2)$$

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.

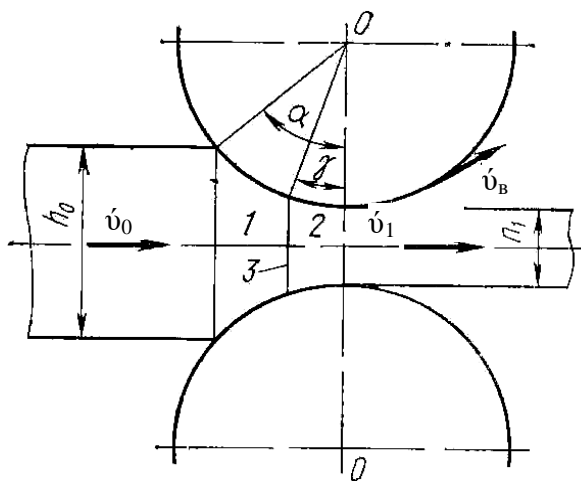
Из выражения (6.2) можно выразить

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

$$\vartheta_1 = \lambda \cdot \vartheta_0. \quad (6.3)$$

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 6.1).



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

Рисунок 6.1 – 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 рисунке 6.2 представлена диаграмма, отражающая соотношение скоростей валков и металла на всем протяжении очага деформации.

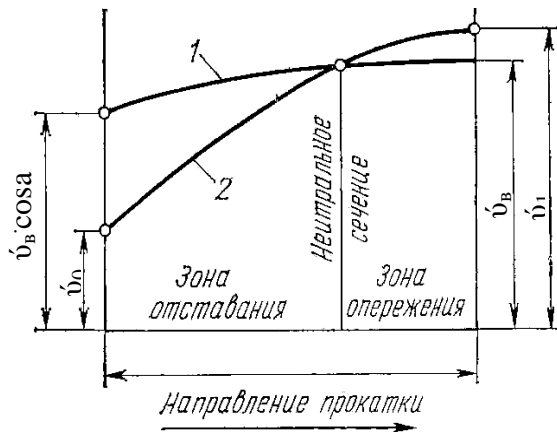
Опережение и отставание принято подсчитывать как относительную вели-

чину (или в процентах) по следующим формулам.

Опережение

$$S_{hl} = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_B}{\vartheta_B}, \quad (6.4)$$

где S_{hl} – опережение.



1 – горизонтальная составляющая окружной скорости валков;

2 – скорость металла

Рисунок 6.2 – Соотношение скоростей валков и металла в очаге деформации

Опережение, как уже было сказано, можно выразить в процентах

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

Обычно величина опережения составляет 2-6 %.

Отставание

$$S_{h0} = \frac{\vartheta_B \cdot \cos \alpha - \vartheta_0}{\vartheta_B \cdot \cos \alpha} = 1 - \frac{\vartheta_0}{\vartheta_B \cdot \cos \alpha}, \quad (6.5)$$

где S_{h0} – отставание;

α – угол захвата, град.

С учетом формул (6.3) и (6.4) формула (6.5) преобразуется к виду

$$S_{h0} = 1 - \frac{\vartheta_1}{\lambda} \cdot \frac{1 + S_{hl}}{\vartheta_1 \cdot \cos \alpha} = 1 - \frac{1 + S_{hl}}{\lambda \cdot \cos \alpha}. \quad (6.6)$$

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 опереже-

ния 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 (6.6).

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

$$S_{h1} = \frac{\gamma^2}{2} \cdot \left(\frac{D}{h_1} - 1 \right), \quad (6.7)$$

где γ – нейтральный угол (рисунок 6.1), град;

D – диаметр валков, мм.

Для нахождения нейтрального угла можно воспользоваться формулой

$$\gamma = \frac{\alpha}{2} \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{2 \cdot \beta} \right), \quad (6.8)$$

где β – угол трения, град, определяемый из выражения

$$\beta = \arctg f, \quad (6.9)$$

где f – коэффициент трения.

Опережение может быть найдено также опытным путем. 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_b 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

$$S_{h1} = \frac{L_n - L_b}{L_b}, \quad (6.10)$$

где L_b – расстояние между метками на валке, мм;

L_n – расстояние между метками на полосе, мм.

6.3 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.

6.4 Порядок проведения работы

- производят измерение толщины исходных образцов;
- производят прокатку образцов при различных условиях трения: в сухих валках и в валках, смазанных маслом 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 6.1.

6.5 Обработка экспериментальных данных

Производят расчет параметров, отраженных в таблице 6.1.

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 6.1 – Результаты исследования влияния условия трения, толщины полосы и обжатия на величину опережения и отставания

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} , %	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Сухие валки	Образец 1	0												
		1												
		2												
		3												

Продолжение таблицы 6.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Сухие валки	Образец 2	0												
		1												
		2												
		3												
Смазанные валки	Образец 1	0												
		1												
		2												
		3												
	Образец 2	0												
		1												
		2												
		3												

6.6 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.

6.7 Контрольные вопросы

- 1 Какое явление называют опережением?
- 2 Какое явление называют отставанием?
- 3 Что такое нейтральное сечение?
- 4 Какие факторы влияют на положение нейтрального сечения в очаге деформации при прокатке?
- 5 Как уширение влияет на величину опережения?
- 6 Каким соотношением связаны между собой опережение и отставание?
- 7 Приведите примеры практической значимости опережения при прокатке.
- 8 Определить максимально возможное значение нейтрального угла для свободной прокатки.
- 9 Как изменится опытная величина опережения при смещении кернов с середины полосы на ее край?
- 10 Как определяют опережение на практике?

Лабораторная работа 7. Исследование уширения металла при прокатке

7.1 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.

7.2 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.

Из уравнения постоянства объема металла следует

$$\frac{h_0}{h_1} = \frac{b_1 \cdot l_1}{b_0 \cdot l_0} \quad (7.1)$$

или

$$\frac{1}{\eta} = \beta \cdot \lambda. \quad (7.2)$$

Следовательно, при данной 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 значительные 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 7.1). 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.

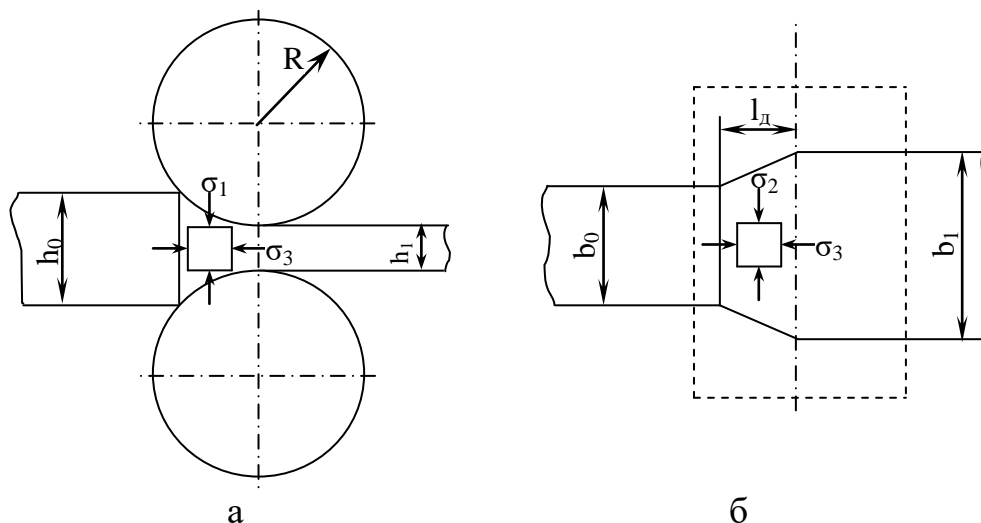


Рисунок 7.1 – Очаг деформации при прокатке в гладких валках (а) и схема главных напряжений (б)

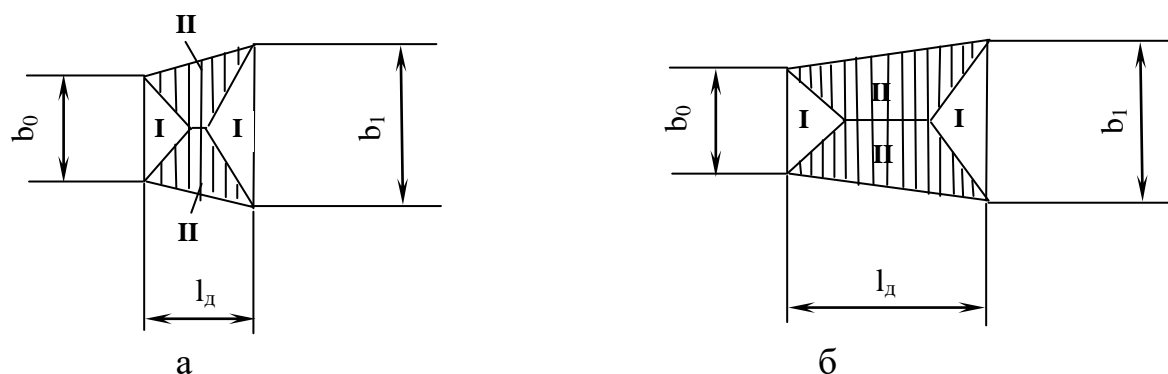
Одним из основных параметров при прокатке, определяющих величину уширения, является обжатие, с его повышением уширение также повышается. Это объясняется тем, что при росте обжатий смещенный объем металла по высоте увеличивается и, соответственно, объем металла, смещенный в поперечном и продольном направлении,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

$$l_d = \sqrt{R \cdot \Delta h}, \quad (7.3)$$

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 7.2), 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.



а – короткий очаг деформации; б – длинный очаг деформации:

I – зоны стремления деформации металла к удлинению; II – зоны стремления деформации металла к уширению

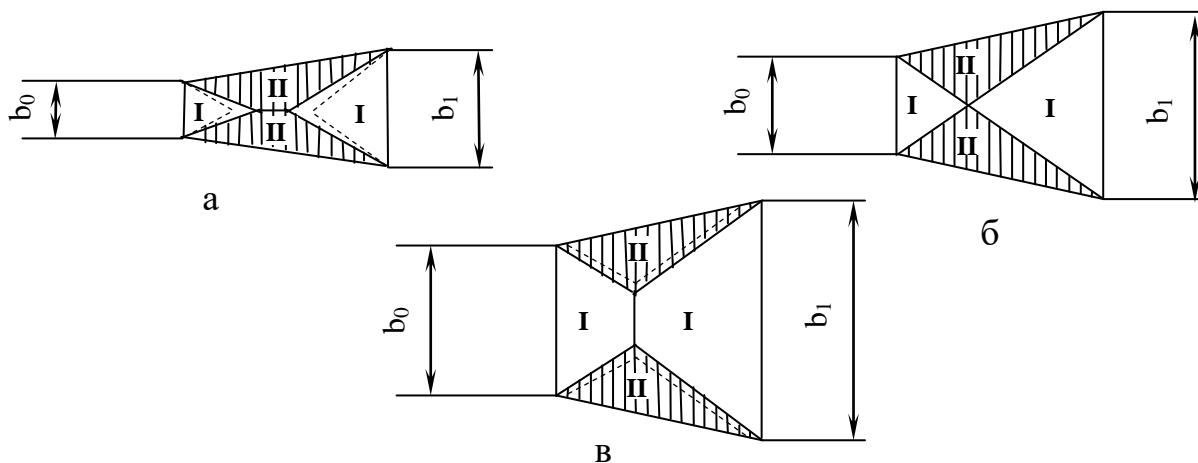
Рисунок 7.2 – Схемы очага деформации

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 7.3, а).

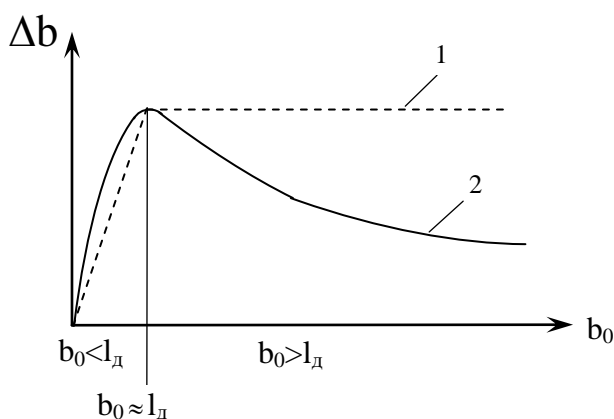
По мере роста ширины полосы площадь условных зон стремления металла к уширению (II) растет до своего максимума (рисунок 7.3, б) – критический очаг деформации и далее остается постоянной (рисунок 7.3, в) – широкий очаг деформации

Влияние ширины полосы на величину уширения без учета влияния внешних зон должно характеризоваться ломаной линией 1 на рисунке 7.4.



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 7.3 – Условное деление очага деформации на зоны



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

Рисунок 7.4 – 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 7.3) смещается в направлении 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 7.4.

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.

7.3 Оборудование, инструмент, образцы

Исследование ширины полосы на уширение и соотношение между продольной и поперечной деформациями выполняют при прокатке на лабораторном двухвалковом стане с 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.

7.4 Порядок проведения работы

Последовательность действий при выполнении лабораторной работы следующая:

- производят измерение размеров образцов: h_0 – исходная толщина, b_0 – исходная 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 7.1 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.

7.5 Обработка экспериментальных данных

Производят расчет и вносят в таблицу 7.1 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 7.1 – Экспериментальные данные, полученные при прокатке полос различной ширины

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

7.6 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.

7.7 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.
- 8 Каково влияние коэффициента трения на величину уширения?
- 9 Как влияет на величину уширения металла при прокатке диаметр валков?

Лабораторная работа 8. Влияние параметров деформации на сопротивление металла пластической деформации

8.1 Цель работы

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

8.2 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 8.1).

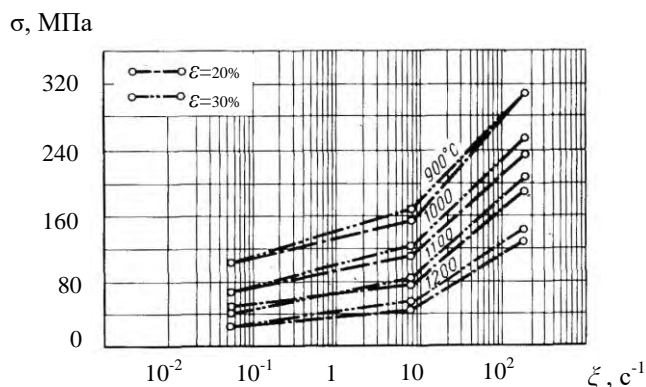


Рисунок 8.1 – Зависимость сопротивления деформации стали 45 от скорости

Номографический метод.

По существующим номограммам определяют сопротивление пластической деформации. Одна из таких номограмм приведена на рисунке 8.2. Способ пользования номограммой показан стрелками.

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

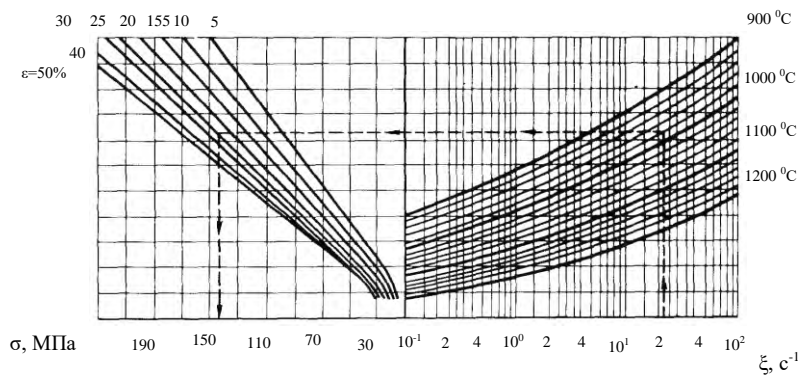


Рисунок 8.2 – Номограмма сопротивления деформации стали 15ХСНД

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

$$\sigma_s = \sigma_0 \cdot k_t \cdot k_\varepsilon \cdot k_\xi, \quad (8.1)$$

где σ_s – сопротивление металла пластической деформации, МПа;

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

$k_t, k_\varepsilon, k_\xi$ – термомеханические коэффициенты при тех же условиях.

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

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

$$k_t = A_1 \cdot e^{-m_1 \cdot t}, \quad (8.2)$$

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

$$k_\varepsilon = A_2 \cdot \varepsilon^{m_2}, \quad (8.3)$$

$$k_\xi = A_3 \cdot \xi^{m_3}, \quad (8.4)$$

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, с⁻¹.

С учетом формул (8.2), (8.3) и (8.4) уравнение (8.1) можно представить в виде

$$\sigma_s = \sigma_0 \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot e^{-m_1 \cdot t} \cdot \varepsilon^{m_2} \cdot \xi^{m_3}. \quad (8.5)$$

Значения коэффициентов уравнения (8.5) приведены в приложении А.

Наибольшее расхождение значений сопротивления деформации, определенных по зависимости (8.5), 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 с⁻¹ (на современных станах она значительно выше).

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

$$\sigma_s = K \cdot \sigma_0 \cdot \xi^a \cdot (10 \cdot \varepsilon)^b \cdot \left(\frac{t}{1000} \right)^c, \quad (8.6)$$

где K, a, b, c – коэффициенты для конкретной марки стали (см. приложение А);
 σ_0 – базовое сопротивление металла деформации, МПа, полученное методом растяжения при следующих условиях: $\varepsilon = 10\%$; $\xi = 1 \text{ с}^{-1}$; $t = 1000^\circ \text{С}$.

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

$$K \cdot \sigma_0 = 66,8 + 0,1 \cdot \left[\sum_{i=1}^{13} (K'_i \cdot x_i + K''_i \cdot x_i^{1,5}) \right], \quad (8.7)$$

$$a = 0,126 + 0,01 \cdot \left[\sum_{i=1}^{13} (l'_i \cdot x_i + l''_i \cdot x_i^{1,5}) \right], \quad (8.8)$$

$$b = 0,125 + 0,01 \cdot \left[\sum_{i=1}^{13} (m'_i \cdot x_i + m''_i \cdot x_i^{1,5}) \right], \quad (8.9)$$

$$c = -2,82 + 0,01 \cdot \left[\sum_{i=1}^{13} (n'_i \cdot x_i + n''_i \cdot x_i^{1,5}) \right], \quad (8.10)$$

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 (8.6) – (8.10) составляет: $\varepsilon = 5 - 30\%$; $\xi = 0,01 - 150\text{c}^{-1}$; $t = 800 - 1300^\circ\text{C}$. 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

$$\sigma_s = [b - (b - a) \cdot e^{-B \cdot \varepsilon_n}] \cdot [1 - A_1 \cdot (1 - e^{-\lambda_1 \cdot \tau}) - A_2 \cdot (1 - e^{-\lambda_2 \cdot \tau}) - A_3 \cdot (1 - e^{-\lambda_3 \cdot \tau})], \quad (8.11)$$

где τ – время деформации от начала процесса, с;

ε_n – степень деформации от начала процесса;

A_1, λ_1, 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

$$\sigma_{0,2} = \sigma_{0,2\text{исх}} + 100 \cdot a_1 \cdot \varepsilon^{n_1}, \quad (8.12)$$

$$\sigma_B = \sigma_{B\text{исх}} + 100 \cdot a_2 \cdot \varepsilon^{n_2}, \quad (8.13)$$

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

σ_B – временное сопротивление, МПа;

a_1, a_2, n_1, n_2 – эмпирические коэффициенты (см. 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 деформации, можно определить среднее сопротивление деформации.

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

$$\sigma_{0,2} = \sigma_0 + 10 \cdot k \cdot \varepsilon^a, \quad (8.14)$$

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

8.3 Оборудование, инструмент, образцы

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

8.4 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.

8.5 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.

8.6 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.

8.7 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?
- 9 Какие химические элементы в составе стали влияют на сопротивление металлов деформации?
- 10 Каковы особенности разработки режима деформации при обработке давлением сталей с высоким сопротивлением деформации?

Лабораторная работа 9. Испытания металлов на одноосное растяжение

9.1 Цель работы

Изучение методики испытания прочности и пластичности материалов при растяжении и ознакомление с методикой оценивания сопротивления материалов растягивающим статическим нагрузкам по результатам испытания.

9.2 Теоретическое введение

Целью механических испытаний материалов является определение тех свойств, которые с наибольшей полнотой будут характеризовать надежность работы соответствующих изделий в заданных условиях эксплуатации. Совокупность таких механических свойств можно называть конструктивной прочностью.

В качестве критериев оценки конструктивной прочности принимают разные сочетания механических свойств. Можно выделить следующие группы критериев:

- оценки прочностных свойств материалов, определяемые часто независимо от особенностей изготавливаемых из них изделий и условий их эксплуатации;
- оценки свойств материалов непосредственно связанных с условиями эксплуатации изделий и определяющие их долговечность и надежность (усталостная прочность, контактная выносливость, износостойкость, коррозионная стойкость и др.);
- оценки прочности конструкций в целом, определяемые при стендовых и эксплуатационных испытаниях. При таких испытаниях выявляется влияние не только материала, но и всех технологических операций изготовления изделий и конструктивных факторов.

В лабораторной работе основное внимание будет уделено оценке прочностных свойств материалов, которые обычно определяют в условиях растяжения при статическом нагружении (пределы прочности, текучести, пропорциональности, а также характеристики пластичности).

Прочностью материала называют его способность сопротивляться деформации и разрушению при действии механических сил. Пластичность материала представляет его склонность приобретать остаточную деформацию без разрушения под действием механических сил.

Для испытания на растяжение используют разрывные испытательные машины. В лаборатории кафедры металлургических технологий и оборудования для этой цели используется разрывная машина МИ 40КУ.

Для испытаний используют образцы пропорциональные цилиндрические (рисунок 9.1) или плоские (рисунок 9.2). Для плоских образцов соотношение

между шириной и толщиной в рабочей части не должно превышать 8:1.

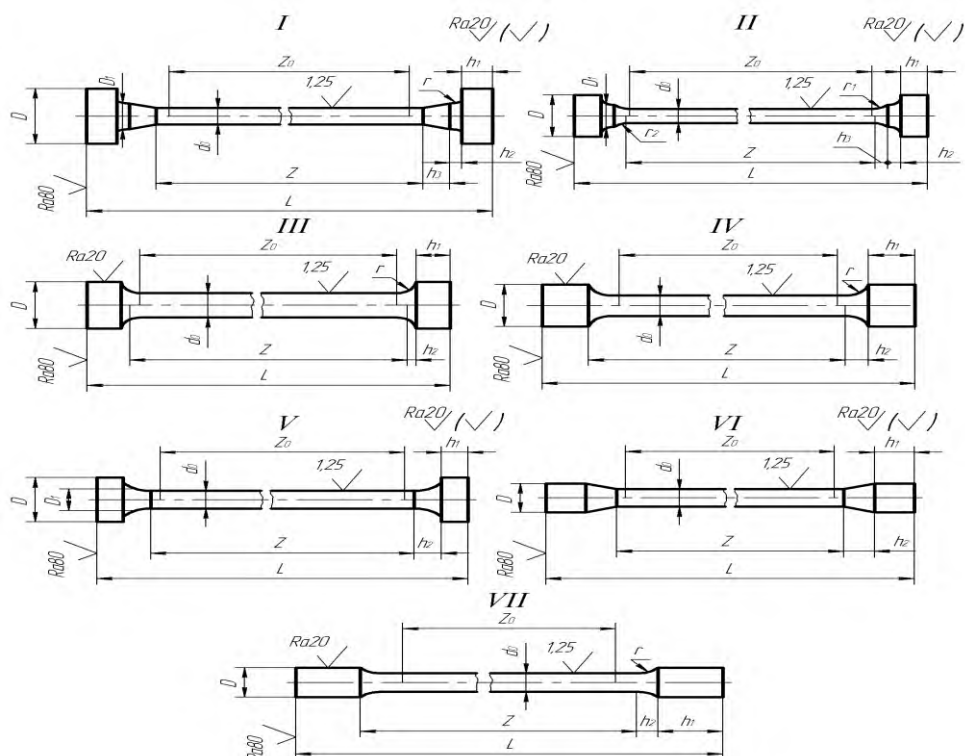
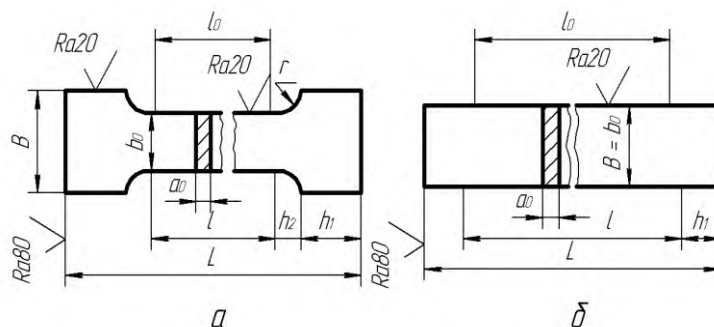


Рисунок 9.1 – Типы пропорциональных цилиндрических образцов для испытаний на растяжение (ГОСТ 1497-84)



а — тип I, плоские образцы с головками; б — тип II, плоские образцы без головок
Рисунок 9.2 – Типы пропорциональных плоских образцов (ГОСТ 1497-84)

При растяжении образца до разрушения графически фиксируют зависимости между приложенным усилием и удлинением образца, получая диаграммы деформации (рисунок 9.3). Диаграммой деформации (растяжения) называется график, показывающий функциональную зависимость между нагрузкой и деформацией при статическом растяжении образца до его разрыва. Эта диаграмма вычерчивается автоматически на разрывной машине специальным приспособлением.

Деформация образца при нагружении сначала является макроупругой, а затем постепенно и в разных зернах при неодинаковой нагрузке переходит в пластическую, происходящую путем сдвигов по дислокационному механизму. Накопление дислокаций в результате деформации ведет к упрочнению металла,

но при значительной их плотности, особенно в отдельных участках, возникают очаги разрушения, приводящие, в конечном счете, к полному разрушению образца в целом.

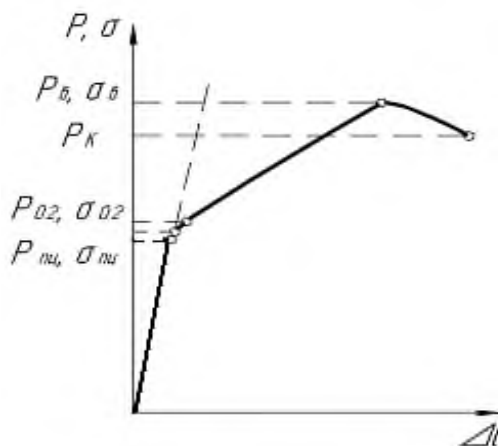


Рисунок 9.3 – Диаграмма деформации материала

При испытании на растяжение согласно ГОСТ 1497-84 определяют следующие характеристики:

1 Предел пропорциональности $\sigma_{пц}$ – отвечает напряжению, при котором отклонение от линейной зависимости между нагрузкой и удлинением достигает такой величины, что тангенс угла наклона, образованного касательной к кривой нагрузка-удлинение в точке $P_{пц}$ с осью нагрузок увеличивается на 50 % от своего значения на упругом (линейном) участке. На рисунке 9.4 показано определение предела пропорциональности графическим способом.

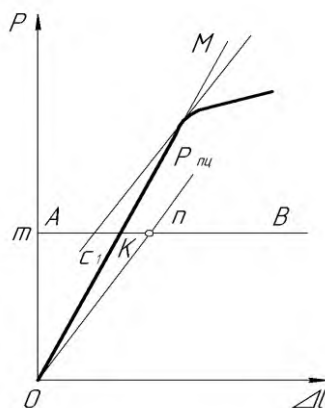


Рисунок 9.4 – Схема определения предела пропорциональности $\sigma_{пц}$ при растяжении

В этом случае из начала координат диаграммы растяжения, записанной от электрического силоизмерителя и измерителя деформации, проводят прямую, совпадающую с начальным линейным участком этой диаграммы. Затем на произвольном уровне проводят прямую АВ, параллельную оси абсцисс, и на ней откладывают отрезок mn равный половине отрезка mr . Через точку n и начало координат проводят прямую Op и параллельно ей – касательную CD к диаграмме

растяжения. Точка касания определяет нагрузку $P_{\text{пл}}$ в ньютонах, отвечающую пределу пропорциональности:

$$\sigma_{\text{пл}} = \frac{P_{\text{пл}}}{F_0}, \quad (9.1)$$

где F_0 – начальное поперечное сечение образца, мм^2 .

2 Предел упругости $a_{0,05}$ – напряжение, при котором остаточное удлинение достигает 0,05 % длины участка рабочей части образца, равного базе тензометра. Определяют предел упругости расчетным (по разгрузке и нагрузке) и графическим способами. При использовании способа нагрузки с допуском на величину полного удлинения (упругого + остаточного) образец после установки на него тензометра нагружают равными ступенями до нагрузки, соответствующей напряжению 70-80 % от предполагаемого предела упругости $\sigma_{0,05}$. Дальнейшее нагружение проводят более мелкими ступенями с выдержкой не более 7 с.

Вычисляют величину допуска на полное удлинение суммированием определенного среднего упругого удлинения и рассчитанного остаточного удлинения.

Определяют нагрузку $P_{0,05}$, соответствующую установленному допуску на полное удлинение образца. Для уточнения значения $P_{0,05}$ допускается применение метода линейной интерполяции.

Графическим способом предел упругости $\sigma_{0,05}$ определяют по начальному участку диаграммы растяжения, записанной от электрических силоизмерителя и измерителя деформации (рисунок 9.5). Удлинение определяется на участке, равном базе измерителя деформации.

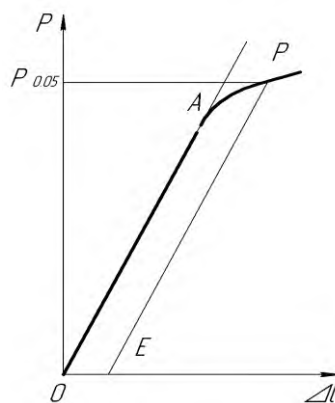


Рисунок 9.5 – Схема определения предела упругости $\sigma_{0,05}$ при растяжении

Для определения нагрузки $P_{0,05}$ вычисляют соответствующее остаточное удлинение с учетом базы измерителя деформации. Найденное значение увеличивают пропорционально масштабу диаграммы по оси абсцисс вправо от начала координат O. Из точки E проводят прямую EP, параллельную прямой OA. Точка пересечения P с диаграммой растяжения определяет искомую нагрузку $P_{0,05}$.

Масштаб по оси удлинения должен быть не менее 100:1 при базе измерителя деформации 50 мм и более и не менее 200:1 при базе измерителя менее 50 мм; по оси нагрузки 1 мм диаграммы должен соответствовать не более 10 МПа.

Предел упругости $\sigma_{0,05}$ вычисляют по формуле

$$\sigma_{0,05} = \frac{P_{0,05}}{F_0}. \quad (9.2)$$

3 Модуль упругости E – отношение приращения напряжения к соответствующему приращению удлинения в пределах упругой деформации; модуль упругости определяют расчетным способом с помощью тензометров и графическим способом по начальному участку диаграммы растяжения, записанной от электрических силоизмерителя и измерителя деформации.

Модуль упругости вычисляют по формуле

$$E = \frac{\Delta P \cdot l_0}{\Delta l_{cp} \cdot F_0} \quad (9.3)$$

где ΔP – приращение нагрузки, Н;

Δl_{cp} – среднее приращение удлинения, мм;

l_0 – начальная расчетная длина образца, мм;

F_0 – начальная площадь поперечного сечения, мм².

4 Предел текучести физический (нижний предел текучести) – наименьшее напряжение, при котором образец деформируется без заметного увеличения растягивающей нагрузки.

Верхний предел текучести $\sigma_{тв}$ – напряжение, соответствующее верхнему пику нагрузки, зарегистрированному до начала текучести рабочей части образца.

Предел текучести (условный) – напряжение при котором остаточное удлинение достигает 0,2 % длины участка образца на его рабочей части, удлинение которого принимается в расчет при определении указанной характеристики. Упомянутые пределы текучести определяют по диаграмме растяжения, полученной на испытательной машине, если 1 мм диаграммы по оси нагрузок соответствует не более 10 МПа:

$$\sigma_{т,тв,тн} = \frac{P_{т,тв,тн}}{F_0}. \quad (9.4)$$

Соответствующие нагрузки P_t , $P_{тв}$, $P_{тн}$ для различных видов диаграммы растяжения представлены на рисунке 9.6.

Предел текучести условный $\sigma_{0,2}$ определяют расчетным способом с применением тензометров также, как и предел упругости $\sigma_{0,05}$. Для определения $\sigma_{0,2}$

графическим методом сначала вычисляют величину остаточного удлинения с учетом установленного допуска исходя из рабочей длины образца. Найденное значение увеличивают пропорционально масштабу диаграммы растяжения и полученный отрезок длины откладывают по оси удлинения от точки О до точки Е (рисунок 9.6).

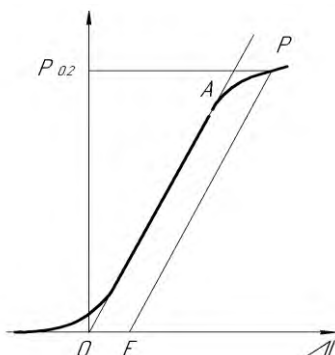


Рисунок 9.6 – Схема определения предела текучести при растяжении

Из точки Е проводят прямую параллельно прямой ОА. Точка пересечения Р с диаграммой растяжения определяет нагрузку $P_{0,2}$, соответствующую условному пределу текучести $\sigma_{0,2}$

$$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0}. \quad (9.5)$$

Условный предел текучести определяют только при отсутствии на диаграмме растяжения площадки текучести.

5 Временное сопротивление (предел прочности) σ_b – напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке $P_{\text{тах}}$, предшествующей разрыву образца. Временное сопротивление вычисляют по формуле

$$\sigma_b = \frac{P_{\text{тах}}}{F_0}. \quad (9.6)$$

6 Относительное удлинение (после разрыва) – одна из характеристик пластичности материалов, равная отношению приращения расчетной длины образца после разрушения l_k к начальной расчетной длине l_0

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\%. \quad (9.7)$$

7 Относительное равномерное удлинение δ_p – отношение приращения длины участков в рабочей части образца после разрыва к длине до испытания, выраженное в процентах.

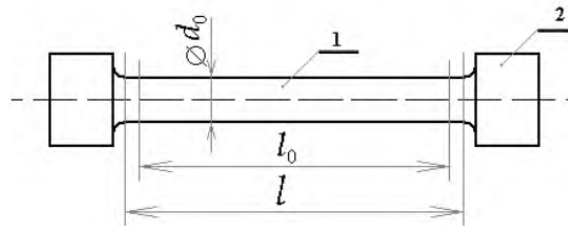
8 Относительное сужение после разрыва ψ , как и относительное удлине-

ние – характеристика пластичности материала и определяется как отношение разности F_0 и минимальной F_k площади поперечного сечения образца после разрушения к начальной площади поперечного сечения F_0 , выраженное в процентах

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100\% . \quad (9.8)$$

9.3 Оборудование, инструмент, образцы

Работа выполняется на разрывной машине МИ 40КУ с использованием штангенциркуля и стальных образцов (рисунок 9.7).



1 – рабочая часть образца; 2 – головка образца

Рисунок 9.7 – Эскиз образца

9.4 Порядок проведения работы

Перед испытанием штангенциркулем измеряют начальные размеры образца: длина l_0 , диаметр d_0 . За начальную площадь поперечного сечения образца принимают $F_0 = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4}$.

Работа выполняется в следующей последовательности.

- установить фиксирующие схваты через переходники на активной и пассивной траверсах;
- установить образец в схваты, проверив надежность его крепления. При необходимости переместить траверсу с помощью кнопок «ВВЕРХ», «ВНИЗ» на пульте местного управления нагружающего устройства;
- установить на нагружающее устройство защитный экран;
- подготовить управляющую программу для работы машины на растяжение образца, для чего на панелях управления рабочего окна программы ввести следующие значения параметров: в диалоговом окне задать тип испытаний – растяжение, а также параметры образца – диаметр и длину рабочей части, вид материала. После нажатия кнопки «ОК» становятся активными панели управления рабочего окна для задания условий испытания, в которых установить:
 - усилие, Н, – в зависимости от материала образца установить в диапазоне 25-30 кН;

– скорость, мм/мин, – задать скорость перемещения подвижной траверсы в диапазоне 2-10 мм/мин.

После включения опции «Образец установлен», нагружающее устройство подключается к блоку управления и появляется возможность управления машиной с экрана монитора с помощью клавиш «СТОП», «ВНИЗ», «ВВЕРХ».

- с помощью клавиши «ВВЕРХ» привести в движение активную траверсу. На экране монитора будет строиться диаграмма растяжения. Перемещение траверсы продолжать до разрыва образца. В случае возникновения аварийной ситуации нажать кнопку «АВАРИЙНЫЙ СТОП» на пульте местного управления, расположенного на правой стойке нагружающего устройства, в случае невозможности пользования пультом нажать клавишу «СТОП» на экране монитора;

- прекратить работу машины, нажав кнопку «СТОП» на экране монитора;

- сохранить в файл диаграмму растяжения и распечатать ее на печатающем устройстве;

- после разрыва образца машина выключается.

9.5 Обработка экспериментальных данных

На диаграмме растяжения определяются точки, соответствующие нагрузкам $P_{\text{пц}}$ и $P_{\text{т}}$. Точка, соответствующая нагрузке $P_{\text{пц}}$, определяется как место отклонения начального участка диаграмм от линейного вида (рисунок 9.1). Точка, соответствующая нагрузке $P_{\text{т}}$, находится по началу перегиба кривой на диаграмме преобразования площадки текучести.

Затем измеряются с погрешностью 0,1 мм ординаты $Y_{\text{пц}}$ и $Y_{\text{т}}$ найденных на диаграмме точек и с учетом соответствующего масштаба K вычисляются значения нагрузок $P_{\text{пц}}$ и $P_{\text{т}}$

$$P_{\text{пц}} = K \cdot Y_{\text{пц}};$$

$$P_{\text{т}} = K \cdot Y_{\text{т}}.$$

После подстановки найденных значений F_0 , $P_{\text{пц}}$, $P_{\text{т}}$, $P_{\text{в}}$ в формулы (9.1), (9.4), (9.6) определяются характеристики прочности материала.

У разрушенного образца обе его части плотно складываются так, чтобы их оси образовали прямую линию, измеряется конечная расчетная длина $l_{\text{к}}$. Затем определяются конечные наименьшие размеры поперечного сечения образца $d_{\text{к}}$ и вычисляется конечная площадь поперечного сечения образца $F_{\text{к}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{к}}^2}{4}$.

После подстановки найденных значений $l_{\text{к}}$ и $F_{\text{к}}$ в (9.7) и (9.8) определяются характеристики пластичности материала δ и ψ с погрешностью округления 1 %.

Полученные результаты необходимо занести в таблицу 9.1.

Таблица 9.1 – Результаты определения механических характеристик

Размеры образца				Нагрузка, МН			Напряжения, МПа			Относительная деформация, %	
до испытания		после испытания		$R_{пц}$	R_T	R_B	$\sigma_{пц}$	σ_T	σ_B	δ	ψ
l_0 , мм	F_0 , мм ²	l_k , мм	F_k , мм ²								

9.6 Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- цель работы;
- изложение теоретического введения;
- краткое описание методики проведения эксперимента;
- таблицу данных измерений и расчетов;
- выводы по работе.

9.7 Контрольные вопросы

1 Какие образцы используют для испытания на механические характеристики согласно ГОСТ1497-84?

2 Что называется диаграммой растяжения, как она вычерчивается и с какой целью?

3 Что называется пределом пропорциональности?

4 Что называется пределом упругости?

5 Что называется пределом текучести?

6 Что называется площадкой текучести?

7 Что называется пределом прочности?

8 Назовите параметры, характеризующие пластичность материала.

9 Как определить параметры, характеризующие пластичность материала?

10 Из каких основных частей состоит испытательная машина?

11 Что влияет на погрешность определения характеристик прочности и пластичности?

Лабораторная работа 10. Испытания металлов на одноосное сжатие

10.1 Цель работы

Освоение методики исследования механических свойств металлов в условиях испытаний на сжатие цилиндрических образцов, закрепление знаний об определении основных характеристик прочности при сжатии.

10.2 Теоретическое введение

Испытания на сжатие проводятся реже, чем испытания на растяжение, потому что при сжатии невозможно получить все показатели, характеризующие механические свойства материалов. Так, пластичный материал при сжатии не разрушается, а превращается в диск, что не позволяет определить напряжение, соответствующее разрушающей силе, и параметры, аналогичные характеристикам пластичности.

Испытания на одноосное сжатие также, как и на растяжение, позволяют построить зависимость сопротивления деформированию от степени деформации.

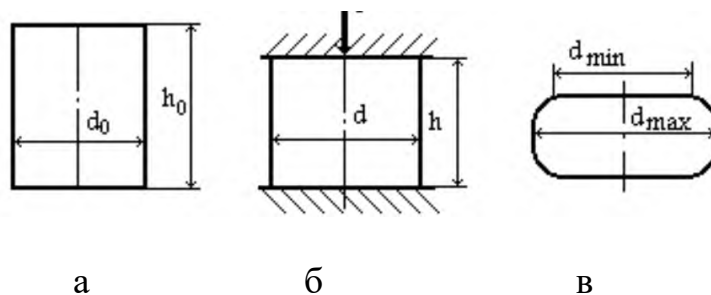
При схеме напряженного состояния с растягивающими напряжениями металл обладает малыми пластическими свойствами, поэтому по испытаниям на растяжение можно построить кривую упрочнения только для относительно небольших степеней деформации, обычно значительно меньших, чем в операциях обработки давлением. Кроме того, после образования шейки деформация локализуется, и напряженное состояние становится объемным. Осевое напряжение в шейке перестает быть равным интенсивности напряжений. Поэтому после образования шейки интенсивность напряжений определяют уже по теоретическим зависимостям, что снижает ценность полученных результатов.

При опытах на одноосное сжатие локализации очага пластической деформации не происходит, а сжимающие напряжения в схеме напряженного состояния повышают пластичность материала, что позволяет достигнуть больших деформаций до момента разрушения. Это имеет большое значение для решения технологических задач обработки давлением, где пластические деформации велики. Однако практически реализовать одноосное сжатие сложно, поскольку трение на контактных поверхностях при осадке делает напряженное состояние объемным. Кроме того, при осадке высоких образцов ($h/d > 2,5$) когда трение сказывается минимально, происходит потеря устойчивости заготовки (искривление оси).

При испытаниях на сжатие применяются короткие образцы цилиндрической формы из стали и чугуна. Для уменьшения влияния изгиба рекомендуется применять образцы, длина которых не более чем в два раза превышает их попе-

речные размеры.

Пластическая деформация при сжатии проявляется в укорочении и расширении образца (рисунок 10.1). На торцах образца при сжатии возникают силы трения, направленные радиально от периферии к центру, в результате чего образец принимает бочкообразную форму. Для уменьшения влияния сил трения на результаты испытаний вводятся различные смазки. Полностью устранить силы трения и обеспечить в образце при испытании линейное напряженное состояние невозможно, что является принципиальным недостатком испытания на сжатие.

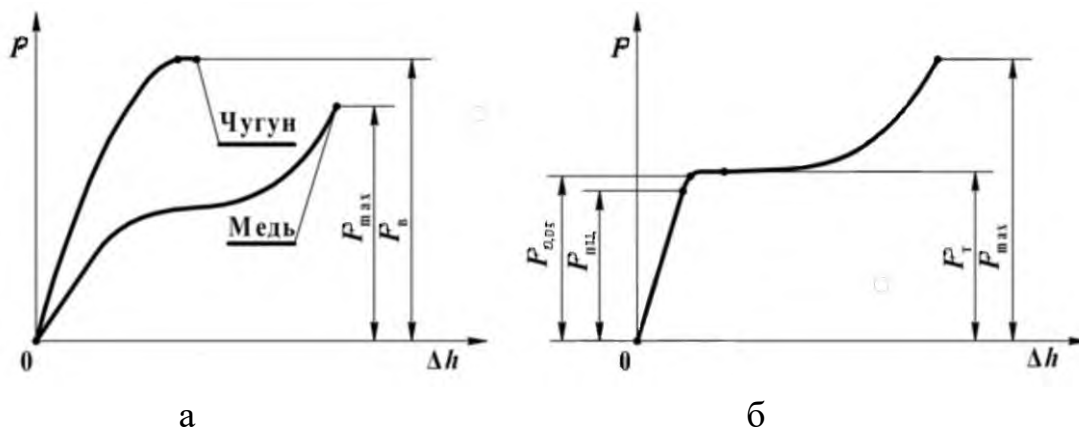


а – размеры до деформации; б – промежуточный момент нагружения;
в – формирование бочки при сжатии

Рисунок 10.1 – Схема испытания на сжатие

Испытания на сжатие проводятся в соответствии с ГОСТ 25.503-97. При испытании автоматически вычерчивается диаграмма сжатия – график зависимости между усилием P и деформацией Δh . Кривые упрочнения пластичных материалов, построенные при одноосном растяжении и сжатии, зачастую почти совпадают, это служит основанием для принятия одного из основополагающих допущений теории пластичности – гипотезы о единой кривой упрочнения.

Вид диаграмм сжатия для хрупких и пластичных материалов различен (рисунок 10.2). По показателям диаграммы определяются прочностные характеристики материала при сжатии. Методика их определения аналогична методике при растяжении.



а – хрупких и пластичных материалов; б – малоуглеродистой стали

Рисунок 10.2 – Диаграммы сжатия

На начальном участке диаграмма сжатия не отличается от диаграммы растяжения и пределы пропорциональности, упругости и текучести определяются по формулам (9.1), (9.2) и (9.4). На диаграмме явно выраженной площадки текучести не наблюдается, с дальнейшим ростом деформации имеет место процесс упрочнения материала. В отличие от диаграммы растяжения на диаграмме сжатия нет спадающей ветви диаграммы. Происходит это потому, что площадь поперечного сечения сжатого образца постоянно увеличивается. Поэтому пластичные материалы при сжатии не имеют предела прочности. При сжатии хрупких образцов не наблюдается линейная зависимость между сжимающей силой и деформацией, но в инженерных расчетах принимается, что до нагрузки $0,5P$ материал подчиняется закону Гука. Отношение разрушающей нагрузки P_{\max} к начальной площади поперечного сечения образца F_0 определяет предел прочности хрупкого материала при сжатии.

10.3 Оборудование, инструмент, образцы

Работа выполняется на разрывной машине МИ 40КУ с использованием штангенциркуля и стальных образцов, аналогичных показанным на рисунке 10.1,а.

10.4 Порядок проведения работы

Перед испытанием штангенциркулем измеряют начальные размеры образца: толщину h_0 , диаметр d_0 . За начальную площадь поперечного сечения образца принимают $F_0 = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4}$.

Работа выполняется в следующей последовательности.

- установить образец. При необходимости переместить траверсу с помощью кнопок «ВВЕРХ», «ВНИЗ» на пульте местного управления нагружающего устройства;

- установить на нагружающее устройство защитный экран;

- подготовить управляющую программу для работы машины на сжатие образца, для чего на панелях управления рабочего окна программы ввести следующие значения параметров: в диалоговом окне задать тип испытаний – сжатие, а также параметры образца – диаметр и толщину, вид материала. После нажатия кнопки «ОК» становятся активными панели управления рабочего окна для задания условий испытания, в которых установить:

– усилие, Н, – в зависимости от материала образца установить в диапазоне 25-30 кН;

– скорость, мм/мин, – задать скорость перемещения подвижной травер-

сы в диапазоне 2-10 мм/мин.

После включения опции «Образец установлен», нагружающее устройство подключается к блоку управления и появляется возможность управления машиной с экрана монитора с помощью клавиш «СТОП», «ВНИЗ», «ВВЕРХ».

- с помощью клавиши «ВНИЗ» привести в движение активную траверсу. На экране монитора будет строиться диаграмма растяжения. Перемещение траверсы продолжать до сплющивания образца. В случае возникновения аварийной ситуации нажать кнопку «АВАРИЙНЫЙ СТОП» на пульте местного управления, расположенного на правой стойке нагружающего устройства, в случае невозможности пользования пультом нажать клавишу «СТОП» на экране монитора;

- прекратить работу машины, нажав кнопку «СТОП» на экране монитора;

- сохранить в файл диаграмму сжатия и распечатать ее на печатающем устройстве.

10.5 Обработка экспериментальных данных

На диаграмме сжатия определяются точки, соответствующие нагрузкам $P_{\text{пц}}$, $P_{0,05}$ и P_T . Затем измеряются с погрешностью 0,1 мм ординаты $Y_{\text{пц}}$, $Y_{0,05}$ и Y_T найденных на диаграмме точек и с учетом соответствующего масштаба K вычисляются значения нагрузок

$$P_{\text{пц}} = K \cdot Y_{\text{пц}};$$

$$P_{0,05} = K \cdot Y_{0,05};$$

$$P_T = K \cdot Y_T.$$

После подстановки найденных значений F_0 , $P_{\text{пц}}$, $P_{0,05}$, P_T , P_B в формулы (9.1), (9.2), (9.4), (9.6) определяются характеристики прочности материала при сжатии.

Затем определяются характеристики пластичности материала δ и ψ с погрешностью округления 1 % по формулам

$$\delta = \frac{h_0 - h_k}{h_0} \cdot 100\%; \quad (10.1)$$

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100\% .$$

Полученные результаты необходимо занести в таблицу 10.1.

Таблица 10.1 – Результаты определения механических характеристик при сжатии

Размеры образца				Нагрузка, МН				Напряжения, МПа				Относительная деформация, %	
до испытания		после испытания		$P_{пц}$	$P_{0,05}$	P_T	P_B	$\sigma_{пц}$	$\sigma_{0,05}$	σ_T	σ_B	δ	ψ
h_0 , мм	F_0 , мм ²	h_k , мм	F_k , мм ²										

10.6 Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- цель работы;
- изложение теоретического введения;
- краткое описание методики проведения эксперимента;
- таблицу данных измерений и расчетов;
- выводы по работе.

10.7 Контрольные вопросы

1 В чем состоит отличие поведения пластичных и хрупких материалов при испытаниях на сжатие?

2 Какие механические характеристики можно определить из испытаний на сжатие пластичных материалов?

3 Чем объясняется бочкообразная форма стального образца при сжатии?

4 Как исключить влияние контактного трения на результаты испытаний на сжатие?

5 Какие функции используются для аппроксимации диаграмм сжатия?

6 В чем заключается гипотеза единой кривой?

7 Какими преимуществами и недостатками обладает осадка как метод построения кривых упрочнения?

8 Почему при одноосном растяжении пластичность материала меньше, чем при одноосном сжатии?

Рекомендуемая литература

1 Коликов А.П., Романцев Б.А. Теория обработки металлов давлением: учебник. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2015.

2 Громов Н.П. Теория обработки металлов давлением: учебник. – М.: Металлургия, 1978.

3 Обработка металлов давлением / Ю.Ф. Шевакин, В.Н. Чернышев, Р.Л. Шаталов, Н.А. Мочалов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2005.

4 Основы теории обработки металлов давлением / И.И. Иванов, А.В. Соколов, В.С. Соколов, А.Е. Шелест. – М.: Инфра-М. 2007.

5 Кузнецов Е.В., Галкин С.П. Технологические процессы обработки металлов давлением. – М.: МИСиС, 2002

Приложение А
Эмпирические коэффициенты для определения сопротивления
металла деформации

Таблица А1 – Значения постоянных коэффициентов для определения сопротивления деформации по уравнению (8.5)

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 (8.6)

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 (8.7) - (8.10)

<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 (8.11)

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 (8.12), (8.13)

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 (8.14)

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

ТЕОРИЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Лабораторный практикум

по дисциплинам «Теория обработки металлов давлением»,
«Основы теории обработки металлов давлением» для студентов, обучающихся
по направлению подготовки 22.03.02 Metallurgy,
Профиль – Обработка металлов давлением,
всех форм обучения

Подписано в печать 23.11.2023 г.		
Формат 60x90 $\frac{1}{16}$ Рег. № 257	Печать цифровая Тираж 10 экз.	Уч.-изд.л. 5,0

ФГАОУ ВО

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Новотроицкий филиал

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

E-mail: nf@misis.ru

Контактный тел. 8 (3537) 679729.