

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

**В. С. Бедарев**

## **ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ДАВЛЕНИЕМ**

Учебно-методическое пособие по выполнению лабораторных работ для  
студентов, обучающихся в бакалавриате по направлению подготовки  
15.03.01 Машиностроение

Калининград  
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»  
2024

УДК 67.05

Рецензент

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии продуктов питания ФГБОУ ВО «КГТУ» М. Н. Альшевская

Бедарев, В. С.

Технологии обработки деталей давлением: учебно-методическое пособие по выполнению лабораторных работ для студентов, обучающихся в бакалавриате по направлению 15.03.01 Машиностроение / В. С. Бедарев. – Калининград: Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ», 2024. – 46 с.

Учебно-методическое пособие является руководством по проведению цикла лабораторных работ по дисциплине «Технологии обработки деталей давлением» студентами, обучающимися по направлению подготовки 15.03.01 Машиностроение. Лабораторные работы предназначены для закрепления теоретического материала и приобретения навыков применения для получения, ремонта и восстановления деталей и узлов машиностроительного оборудования.

Табл. 5, рис. 22, список лит. – 8 наименований

Учебное пособие рассмотрено и рекомендовано к опубликованию кафедрой инжиниринга технологического оборудования 20 февраля 2024 г., протокол № 5

Учебно-методическое пособие по выполнению лабораторных работ рекомендовано к изданию в качестве локального электронного методического материала для использования в учебном процессе методической комиссией института агроинженерии и пищевых систем ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» 30 мая 2024 г., протокол № 5

УДК 67.05

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет», 2024 г.  
© Бедарев В. С., 2024 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	
Техника безопасности при проведении лабораторных работ.....	
Методические рекомендации по проведению лабораторных работ.....	
Лабораторная работа 1. Изучение оборудования прокатного стана, основных узлов и механизмов.....	
Лабораторная работа 2. Условие захвата металла валками и определение коэффициента трения.....	
Лабораторная работа 3. Исследование операций вытяжки.....	
Лабораторная работа 4. Исследование параметров деформирования металла при осадке.....	
Лабораторная работа 5. Определение операции вырубки.....	
Лабораторная работа 6. Исследование операции прессования.....	
Библиографический список.....	

## ВВЕДЕНИЕ

Методические указания содержат шесть лабораторных работ, в которых изложена физическая сущность наиболее распространенных операций обработки металлов давлением.

Излагаются технологические возможности рассматриваемых операций, приводятся теоретические зависимости для расчета основных технологических параметров, а также схемы операций обработки металлов давлением, задачи лабораторно-практических работ и порядок их выполнения.

Целью лабораторного практикума является:

- закрепление, углубление знаний студентов в области процессов обработки металлов давлением, закономерностей формообразования, причин возникновения и путей устранения дефектов изделий;
- формирование у студентов умений и навыков управления технологическими процессами, качеством продукции на основе оптимизации деформационных режимов и энергосиловых параметров процессов с использованием лабораторной и вычислительной техники;
- развитие навыков самостоятельной работы

Выполнение лабораторных работ позволяют повысить эффективность усвоения учебного материала за счет выработки практических навыков при выполнении самостоятельной работы с использованием имеющегося в лаборатории прессового оборудования, измерительного инструмента и лабораторных штампов.

В процессе освоения дисциплины «Технологии обработки деталей давлением» у обучающихся формируются навыки в области технологии конструкционных материалов, умений в выборе методов, способов формообразования деталей и изделий, получения неразъемных соединений, навыков использования полученных знаний в своей профессиональной деятельности. Наличие теоретической части значительно облегчает самостоятельную подготовку студента к лабораторным работам, обеспечивает более сознательное проведение экспериментальной части и правильную оценку полученных результатов. Студент допускается к выполнению экспериментальной части работы только после усвоения теоретической части работы по данному лабораторному практикуму.

В результате освоения лабораторного практикума обучающийся должен: уметь:

- выбрать вид и режимы пластической обработки в зависимости от строения исходной заготовки и назначить оптимальную степень ее деформации для получения заданного уровня служебных свойств конечного продукта;

– установить наиболее рациональную механическую схему деформации, обеспечивающую интенсификацию процесса при минимальных материальных и энергетических затратах;

– наметить ход решения задачи по определению напряженно-деформированного состояния обрабатываемой заготовки и энергосиловых показателей, рассматриваемого процесса ОМД;

– наметить путь решения конкретной технологической задачи по определению формоизменения;

владеть:

– способностью анализировать научно техническую информацию, изучать отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования;

– способностью принимать и обосновывать конкретные технические решения при создании объектов энергетического машиностроения;

– способностью к освоению новых технологических процессов и новых видов технологического оборудования.

– способностью и готовностью осваивать техническую документацию и осуществлять проектно-конструкторскую деятельность в соответствии с техническим заданием в области профессиональной деятельности;

– терминологией в области обработки металлов давлением;

– информацией о выборе режимов при изготовлении требуемой детали.

Также облегчают работу преподавателей и студентов благодаря наличию в них алгоритма выполнения практической части лабораторных работ, необходимых схем и рисунков. Может быть полезно учащимся учебных заведений системы профессионального технического образования, выполняющих учебно-технологический практикум по обработке металлов давлением.

Лабораторный практикум предусматривает использование активных методов обучения путем создания проблемных ситуаций, индивидуализации заданий за счет многовариантности работ.

Студент в результате подготовки к выполнению работы должен усвоить назначение, сущность и особенности изучаемого процесса; цель работы; методику выполнения работы. Перед началом работы каждый студент подвергается опросу преподавателем для выяснения степени его теоретической подготовки. Студенты, допущенные к работе, приступают к ее выполнению в соответствии с последовательностью, изложенной в практикуме. Со всеми вопросами, возникающими в процессе работы, студент должен сразу же обращаться к преподавателю.

В лабораторном практикуме используются следующие типичные проблемные ситуации:

- необходимость выбора материала и оборудования;
- рационализация режимов и схем процессов деформирования;
- необходимость объяснения различия между теоретическими и экспериментальными данными;
- необходимость поиска причин и способов устранения возникавших дефектов;
- поиск путей интенсификации исследуемого процесса, экономии материала и энергии.

Отчет по выполненной работе должен содержать: цель работы, задание, расчеты, необходимые графики, диаграммы, таблицы, схемы, анализ полученных данных, выводы по результатам работы. Без сдачи оформленного отчета по выполненной работе студент не допускается к выполнению очередной работы. Каждую лабораторную работу (по мере выполнения) студент защищает в течение семестра, а в конце семестра при успешной защите всех работ получает зачет по лабораторному практикуму.

В инструкции для студентов изложены основы безопасной работы на лабораторном оборудовании, методы обработки экспериментальной информации, вопросы организации и планирования экспериментальных исследований.

## **ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

1. Вводный инструктаж по технике безопасности проводится преподавателем в часы выполнения лабораторной работы, о чем составляется соответствующий документ за подписью студентов и преподавателя, проводившего инструктаж.

2. Каждый студент должен следить за безопасностью выполнения порученной ему работ и своевременно принимать меры по устранению имеющейся опасности в работе и ставить об этом в известность преподавателя, ведущего лабораторные занятия.

3. Студент не имеет права трогать оборудование, которое на данном лабораторном занятии не используется.

4. При работе на прессах учебный мастер и студенты обязаны соблюдать следующие правила:

а) к работе на прессе допускаются лица, прошедшие инструктаж по технике безопасности;

б) перед началом работы необходимо ознакомиться с назначением кнопок пульта управления, обратить особое внимание на расположение кнопок «СТОП» и «АВАРИЙНЫЙ РАЗЪЕМ»;

в) запрещается работать на прессе в отсутствии учебного мастера;

г) после включения двигателя в начале работ следует убедиться в работоспособности пресса, сделав траверсой короткий ход вверх-вниз;

д) запрещается пользоваться кнопками пульта, кроме кнопок «пуск», «ползун», «ПОЛЗУН ВНИЗ», «СТОП» и в особых случаях – «АВАРИЙНЫЙ РАЗЪЕМ»;

е) при появлении каких-либо неисправностей в работе (стука, вибрации и т. п.) следует немедленно остановить пресс кнопкой «СТОП», сообщить о неисправности учебному мастеру;

ж) перед началом работы убрать все лишние предметы со стола пресса; сборку и разборку штампа производить на отдельном столе вне пресса при выключенном двигателе;

з) оснастку ставить строго на ось пресса, избегая эксцентричного нагружения траверсы пресса;

и) с целью исключения попадания рук работающего на прессе в штамповое пространство во время работы пресс снабжен двухкнопочным включением хода ползуна вниз; отключение одной из кнопок во время лабораторного занятия не допускается;

к) с целью исключения травмирования студентов, после установки оснастки на стол пресса следует закрыть штамповое пространство неподвижным ограждением и не открывать его до завершения опыта. Работать без закрытого ограждения запрещено;

л) во время испытания не допускается трогать приспособления, образец, узлы и детали машины;

м) в случае любых отклонений от нормального испытания нажать кнопку «СТОП», пригласить учебного мастера или преподавателя, ведущего занятия, для выяснения причин отклонений.

5. При работе с электрической аппаратурой необходимо соблюдать следующее правило:

а) без разрешения преподавателя не включать приборы и установки;

б) перед включением электрической аппаратуры (усилителя, осциллографа, АШ, выпрямителя) необходимо проверить ее заземление;

в) строго соблюдать правила, указанные в описании приборов;

г) при обнаружении неисправностей студент немедленно обязан доложить об этом преподавателю или учебному мастеру;

д) при включенной электроаппаратуре запрещено производить электромонтаж.

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

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ**

Лабораторный практикум охватывает основные разделы курса и включает пять работ. Каждая лабораторная работа описана по единому плану: цель работы, задачи, контрольные вопросы. В конце каждой работы даны контрольные вопросы для самоконтроля и закрепления изучаемого материала.

Порядок выполнения лабораторных работ.

Студент в результате подготовки к выполнению работы должен усвоить назначение, сущность и особенности изучаемого процесса; цель работы; методику выполнения работы. Перед началом работы каждый студент подвергается опросу преподавателем для выяснения степени его теоретической подготовки. Студенты, допущенные к работе, приступают к ее выполнению в соответствии с последовательностью, изложенной в практикуме. Со всеми вопросами, возникающими в процессе работы, студент должен сразу же обращаться к преподавателю.

Отчет по выполненной работе должен содержать: цель работы, задание, расчеты, необходимые графики, диаграммы, таблицы, схемы, анализ полученных данных, выводы по результатам работы. Без сдачи оформленного отчета по выполненной работе студент не допускается к выполнению очередной работы. Каждую лабораторную работу (по мере выполнения) студент защищает в течение семестра, а в конце семестра при успешной защите всех работ получает зачет по лабораторному практикуму.



# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1

## ИЗУЧЕНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ ПРОКАТНОГО СТАНА, ОСНОВНЫХ УЗЛОВ И МЕХАНИЗМОВ

**Цель работы:** получение практических умений и навыков работы с оборудованием прокатной лаборатории кафедры металлургических технологий и оборудования, изучение основного оборудования прокатного стана, его характеристик.

### Теоретическая часть

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

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

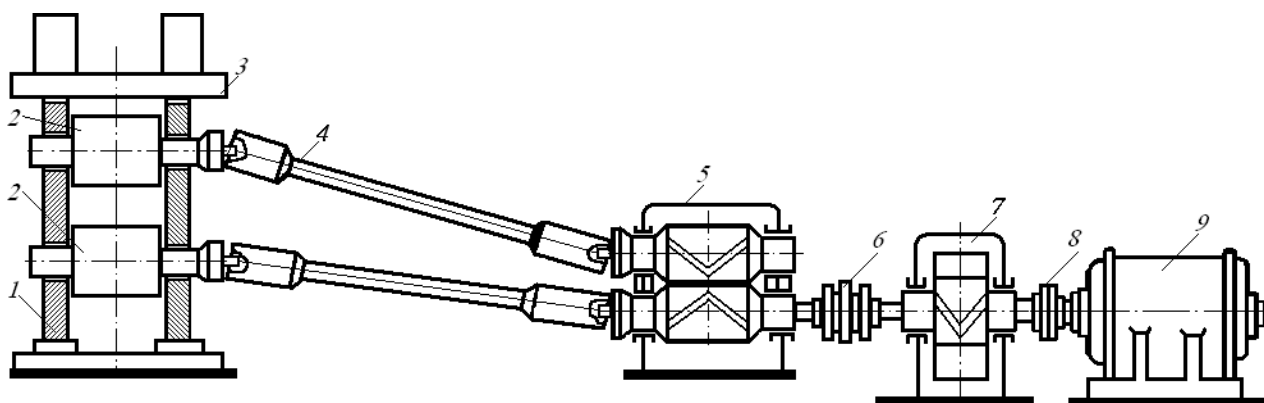


Рисунок 1.1 – Схема главной линии прокатного стана: 1 – станина; 2 – прокатные валки; 3 – поперечина; 4 – шпиндели; 5 – шестеренная клетка; 6, 8 – муфта; 7 – редуктор; 9 – электродвигатель

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

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

Рабочая клетка является основным устройством прокатного стана, так как в ней осуществляется собственно прокатка металла. Клетка представляет собой

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

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

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

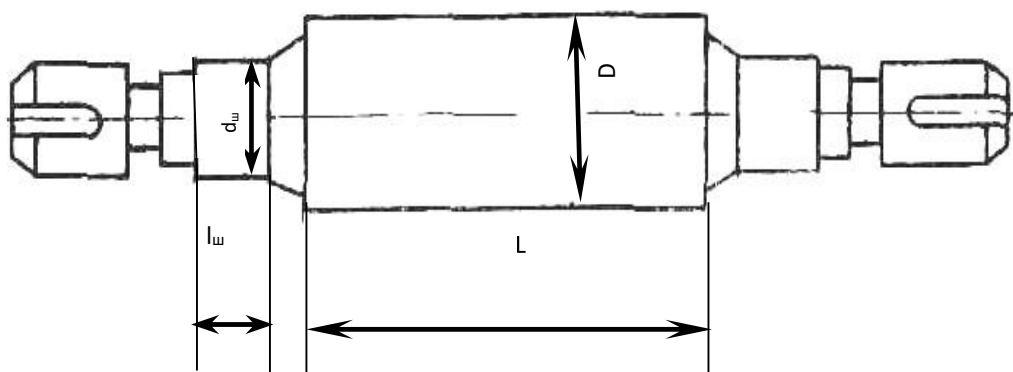


Рисунок 1.2 – Форма и основные элементы листового валка

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

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

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 1.3).

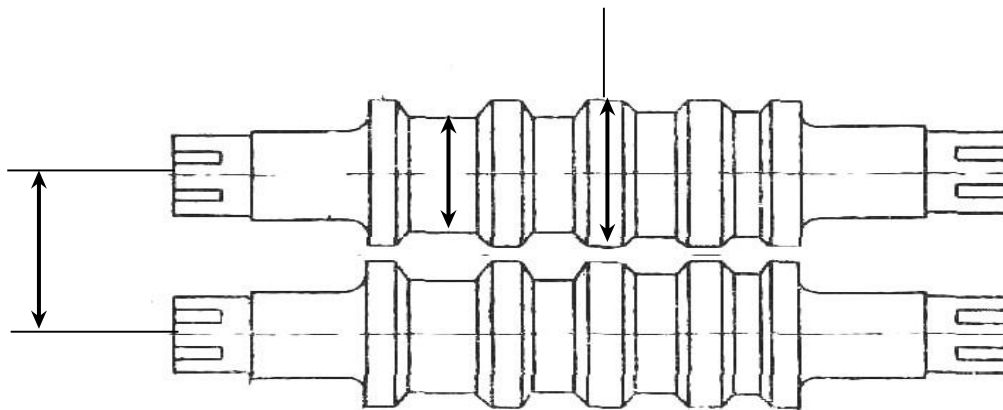


Рисунок 1.3 – Форма сортовых валков

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

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

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

в этом случае передаточным устройством являются универсальные шпиндели, промежуточные валы и муфты.

На других станах предусмотрен общий привод рабочих валков от шестеренной клетки. В этом случае между электродвигателем и рабочей клетью в одну линию расположены моторная муфта, шестеренная клеть и универсальные шпиндели с устройством для их уравнивания. Шестеренные клетки предназначены для разделения крутящего момента и передачи вращения универсальным шпинделям от электродвигателя. Конструктивно оформляют шестеренную клеть 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.

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

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

### **Задание для 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.

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

Общие данные			
Назначение			
Тип			
Передаточные механизмы			
Редуктор	Назначение		
Шестеренная клеть	Назначение		
Шпиндели	Назначение		
Муфта	Назначение		
Элементы рабочей клетки			
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 станины	Назначение		

### Контрольные вопросы

1. Что называют прокатным станом?
2. Каково назначение и состав основного и вспомогательного оборудования прокатного стана?
3. Что такое главная линия прокатного стана?
4. Какие основные элементы входят в состав главной линии прокатного стана и каково их назначение?
5. Каковы основные способы привода рабочих валков?
6. Дайте классификацию рабочих валков в зависимости от производимой продукции и назовите их основные конструктивные элементы.
7. В каких случаях в главной линии прокатного стана не устанавливают редуктор и шестеренную клеть?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 УСЛОВИЕ ЗАХВАТА МЕТАЛЛА ВАЛКАМИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ

**Цель работы:** получение практических умений и навыков работы на прокатном оборудовании, знаний условий деформации металла в начальный момент при захвате металла валками; исследование эффективности смазки при прокатке.

**Приборы и материалы:** прокатный стан, свинцовый образец, штангенциркуль, мел.

### Теоретическая часть

Определяющим фактором процесса прокатки является коэффициент трения, влияющий на захватывающую способность валков, процесс прокатки, уширение и опережение, силовые условия и др.

Для экспериментального определения коэффициента трения используется несколько способов, простейшим из которых является способ максимального угла захвата.

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 2.1).

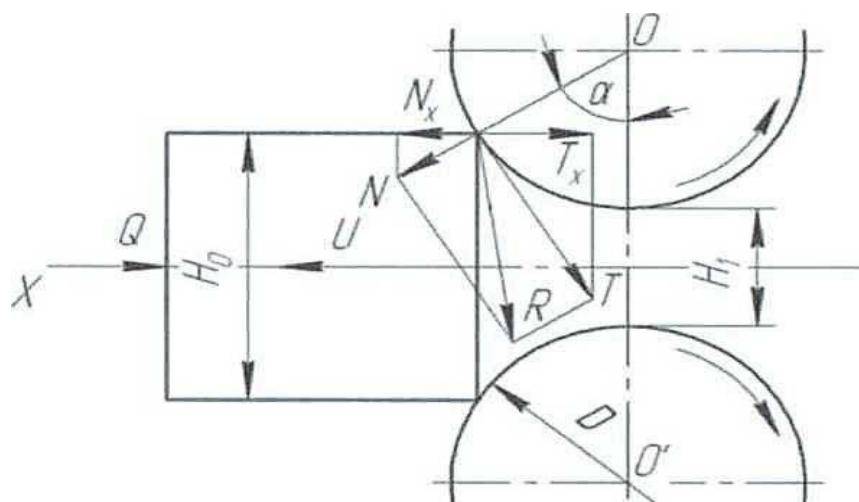


Рисунок 2.1 – Равновесие сил при естественном захвате

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

$$N_x = T_x.$$

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

$$T \cdot \cos \alpha > N \cdot \sin \alpha.$$

Угол  $\alpha$ , образованный направлением действия нормальной силы  $N$  и геометрической осью  $OO'$ , соответствующий углу, при котором осуществляется захват металла силами трения  $T$  и втягивание его в очаг деформации, называется углом захвата.

Для анализа условий захвата рассмотрим простой процесс прокатки, который характеризуется следующими условиями: оба валка приводные, имеют одинаковый диаметр и одинаковое число оборотов; прокатываемый материал однороден в отношении пластических свойств и на него действуют только силы, приложенные от валков ( $Q=U=0$ ).

Условия захвата металла валками

Из рисунка 2.1 видно, что горизонтальная составляющая силы трения  $T_x$  стремится втянуть металл в валки, горизонтальная составляющая нормальной силы  $N_x$  препятствует началу прокатки. Отсюда следуют три условия:

при  $N_x > T_x$  выталкивающие силы больше втягивающих – прокатка невозможна;

при  $N_x = T_x$  валки будут скользить (буксовать) по металлу – процесс равновесия;

при  $N_x < T_x$  втягивающие силы больше выталкивающих, металл захватывается валками – прокатка осуществляется.

Силы трения  $T$  при прокатке связаны с силами нормального давления  $N$  законом Кулона:

$$T = f \cdot N, \quad (2.1)$$

где  $f$  – коэффициент трения.

Для осуществления захвата металла валками и начала прокатки необходимо, чтобы  $T_x > N_x$ . Тогда, с учетом закона постоянства объема и (1) условие захвата металла валками запишется следующим образом:

$$\operatorname{tg} \alpha < f \quad (2.2)$$

Таким образом, захват металла валками в начальный момент прокатки произойдет при условии, когда тангенс угла захвата будет меньше коэффициента трения.

Коэффициент трения представляет собой тангенс угла трения:

$$f = \operatorname{tg} \beta, \quad (2.3)$$

где  $\beta$  – угол трения. Угол трения образован направлением нормальной силы  $N$  и силы  $R$ , являющейся результирующей (суммарной) для сил  $N$  и  $T$  (рисунок 2.1).

Из формул (2) и (3) следует, что условие захвата металла валками в начальный момент прокатки можно записать в виде:

$$\alpha < \beta$$

т. е. захват металла валками в начальный момент прокатки произойдет при условии, когда угол захвата будет меньше угла трения.

На рисунке 2.2 даны схемы взаимосвязи между углом захвата  $\alpha$  и углом трения  $\beta$ . Из схем видно, что начало прокатки возможно в случае, когда результирующая сила  $R$  отклонена от геометрической оси  $OO'$  в сторону направления прокатки, т. е. когда  $\alpha < \beta$ . Угол захвата  $\alpha$  определяется из геометрических соотношений:

$$\alpha = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h_{\max}}{D}\right), \quad (2.4)$$

где  $D$  – диаметр рабочих валков, мм.

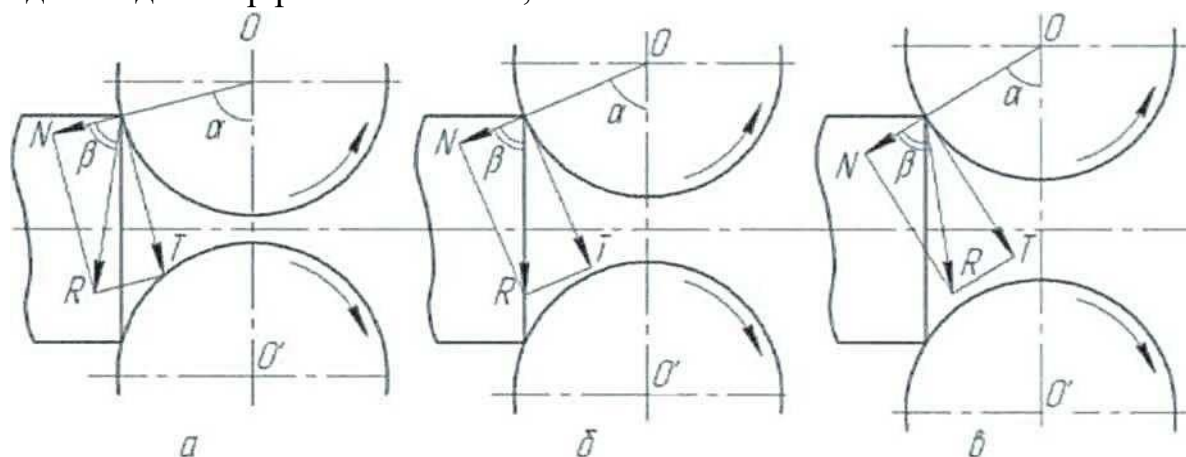


Рисунок 2.2 – Соотношение между углами трения и захвата в начальный момент прокатки:

а – захват невозможен ( $\alpha < \beta$ ); б – состояние равновесия ( $\alpha < \beta$ ); в – захват осуществляется ( $\alpha > \beta$ )

В случае установившегося процесса прокатки при рассмотрении условия захвата следует учитывать уже не полный угол захвата  $\alpha$ , а лишь ту его часть, под которой располагается равнодействующая элементарных реактивных сил, т. е.  $\alpha/2$  (рисунок 2.3). Тогда условие захвата приближенно характеризуется неравенством:  $\alpha < 2 \cdot \beta$ .

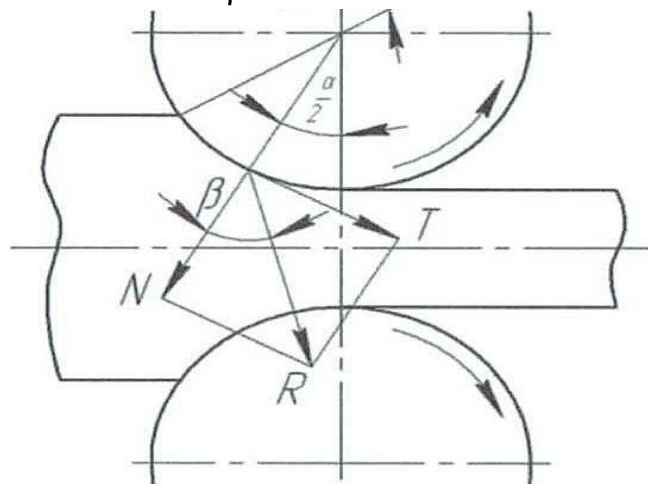


Рисунок 2.3 – Схема сил при установившейся прокатке



Таким образом, установившийся процесс прокатки осуществим легче, чем его начальная стадия (захват). Поскольку, однако, всякий случай прокатки должен начинаться со стадии естественного захвата полосы валками, то после заполнения зева валков металлом (установившийся процесс) образуется избыток сил трения, расходуемый на развивающееся в связи с этим опережение металла.

Искусственный захват может быть произведен либо вдавливанием слитка в валки внешней силой, либо задачей в валки конусного слитка, либо дополнительным сближением валков после естественного захвата.

### Задание для проведения работы

Исследуются два варианта прокатки: валки и образец сухие (обезжирены спиртом); валки и образец смазаны мелом. Последовательность операций при выполнении работы следующая.

1. Подготовить по одному образцу на каждый вариант прокатки – напильником снять заусенцы и запилить передний торец под угольник.
  2. Измерить начальную толщину  $h_0$  образцов.
  3. Подготовить поверхности валков и образцов согласно варианту прокатки (при прокатке на машинном масле передний торец образца не смазывать).
  4. Установить образец на стол стана.
  5. Свести валки до расстояния 0,5 мм, включить привод валков.
  6. С помощью деревянного бруска без нажима подвести образец его передним торцом к вращающимся валкам.
  7. Постепенно увеличивать раствор валков до момента, когда начнется легкое дрожание и подергивание образца, после чего осуществляется захват его валками и последующая прокатка.
  8. Измерить толщину  $h_i$  образца после прокатки.
- Опытные данные занести в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты измерений и расчетов

Вариант прокатки	Опыт	$h_0$ , мм	$h_i$ , мм	$\Delta h$ , мм	$sh\%$	$\alpha, ^\circ$	$\bar{\alpha}, ^\circ$	f
Сухие валки	1							
	2							
	3							
Валки с мелом	1							
	2							
	3							

Повторить пункты три раза для одного образца, последовательно обжимая его в каждом проходе.

Используя результаты измерений обжатий, занесенные в таблицу, вычислить величину относительного обжатия для каждого варианта прокатки

$$Sh = \frac{h_o - h_i}{h_o} = \frac{\Delta h}{h_o} \quad (2.4)$$

Рассчитать величины угла захвата по формуле (2.4) и среднее арифметическое значение угла захвата  $\alpha$ .

С учетом среднего значения угла захвата  $\alpha$  определить коэффициент трения  $f = \operatorname{tg} \alpha$ .

Содержание отчета: название работы; цель работы; краткие теоретические сведения; результаты измерений и расчетов (таблица); выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие силы действуют на металл в начальный момент прокатки?
2. Какой угол называется углом захвата? Углом трения?
3. Что такое простой процесс прокатки?
4. Какое соотношение контактных сил обеспечивает захват металла валками и почему?
5. Как выражается условие захвата через коэффициент и угол трения?
6. Каково соотношение между углами трения и захвата в начальный момент прокатки? В случае установившегося процесса прокатки?
7. Перечислите влияние технологической смазки на процесс прокатки.
8. В чем сущность практического определения угла захвата и коэффициента трения?
9. Какие возможны пути повышения величины угла захвата?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИЙ ВЫТЯЖКИ

**Цель работы:** определить последовательность операций вытяжки, определить напряжения в заготовке, получение практических умений и навыков расчёта коэффициента вытяжки для разных материалов и усилия вытяжки.

### Теоретическая часть

Операцией вытяжки называется технологический процесс получения полой пространственной детали (цилиндрической или коробчатой) из плоской листовой заготовки.

Плоская заготовка 3 укладывается на матрицу 4, имеющую отверстие со скругленными кромками и прижимается к ней прижимом 2 (рисунок 3.1, а). Цилиндрический пуансон 1 со скругленными кромками при своем движении вниз воздействует на центральную часть заготовки и заталкивает её в отверстие матрицы. При этом наружная часть заготовки втягивается в матрицу с образованием вертикальной цилиндрической стенки (рисунок 3.1, б). После того как вся заготовка будет втянута в матрицу (рисунок 3.1, в), процесс заканчивается, и полученная деталь снимается с пуансона. В результате операции из плоской заготовки получается цилиндрический стакан с доньшком.

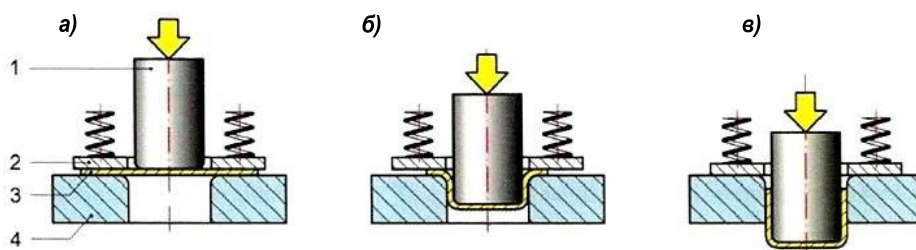


Рисунок 3.1 – Схема последовательного выполнения операции вытяжки

Существуют определенные условия, необходимые для нормального выполнения операции вытяжки. Несоблюдение этих условий может привести к браку получаемой детали (отрыв доньшка, складки на поверхности и др.). Поэтому, для того чтобы изготовить цилиндрический стакан заданных размеров, необходимо предварительно рассчитать размеры заготовки и определить напряжения и деформации, возникающие в опасных сечениях заготовки в процессе деформирования.

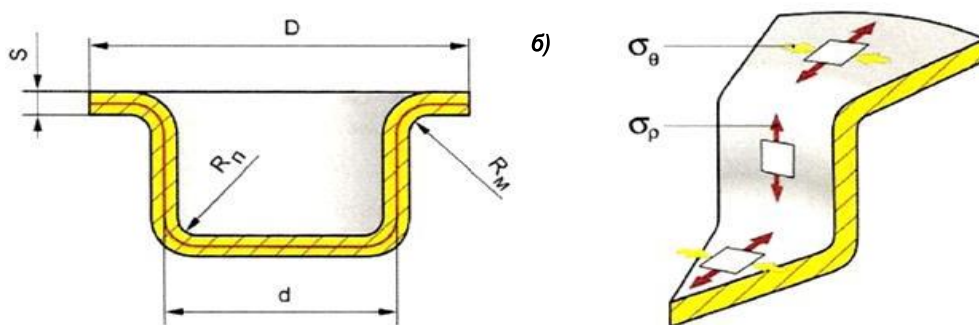


Рисунок 3.2. Обозначение размеров заготовок и напряжения, действующих в них

На рисунке 3.2, а показаны обозначения размеров, принятые в расчетных формулах, а на рисунке 3.2, б – часть заготовки на промежуточной стадии вытяжки с указанием напряжений, действующих в различных точках заготовки.

Перемещение средней части заготовки при вытяжке вызывает появление в ее наружной части (фланце) растягивающих радиальных  $\sigma_r$  и сжимающих тангенциальных  $\sigma_\theta$  напряжений. Под действием сжимающих напряжений  $\sigma_\theta$  на фланце могут образовываться складки, которые способны перейти и на цилиндрическую вертикальную стенку стакана, что является признаком брака. Чем больше толщина заготовки и меньше ширина кольцевого фланца, тем меньше вероятность потери устойчивости фланца и образования складок.

Для того чтобы избежать появления складок при вытяжке применяют прижим заготовки. Необходимость использования режима можно определить по упрощенной эмпирической формуле

$$D - d \leq 18 S. \quad (3.1)$$

Если это соотношение выдерживается, то в процессе вытяжки фланец не теряет устойчивости, складки не образуются и вытяжку можно производить без прижима.

Наиболее опасным сечением является зона перехода от вертикальной стенки стакана к доньшку, где растягивающие напряжения  $\sigma_r$  достигают наибольших значений. В этом месте может произойти отрыв доньшка от стенки.

Для нормального протекания процесса вытяжки необходимо, чтобы максимальное растягивающее напряжение  $\sigma_{r\max}$ , действующее в опасном сечении, не превышало предела текучести материала:  $\sigma_r < \sigma_t$ .

Значение силы вытяжки определяется формулой

$$P = \sigma_{r\max} \pi d S, \quad (3.2)$$

где  $d$  – средний диаметр вытягиваемого стакана;  $S$  – толщина заготовки.

Для теоретического расчета силы вместо  $\sigma_{r\max}$  следует подставлять  $\sigma_t$  – предел текучести материала заготовки.

В процессе вытяжки толщина заготовки увеличивается от исходной  $S$  до  $S_{\max}$  у края вытянутого стакана:

$$S_{\max} = S\sqrt{(D/d)} \quad (3.3)$$

Одним из основных факторов, определяющих возможность выполнения операции вытяжки, является коэффициент вытяжки:

$$K_{\max} = D/d \quad (3.4)$$

Установлено, что предельным значением коэффициента вытяжки для разных материалов является значение  $K_{\max} = 1,8-2,0$ .

Таким образом, зная диаметр стакана  $d$ , который необходимо вытянуть, можно рассчитать необходимый диаметр заготовки:

$$D = dK_{\max} \quad (3.5)$$

Исходя из равенства площади поверхности заготовки и площади поверхности детали (рассчитанной по среднему диаметру  $d$ ) можно определить высоту стакана  $H$ .

При вытяжке без фланца высота стакана (без учета радиуса скругления) определяется по формуле

$$H = \frac{A_z - A_d}{\pi d} \quad (3.6)$$

$$A_z = \pi D^2 / 4 \quad A_d = \pi d^2 / 4$$

где  $A_z$  – площадь заготовки;  $A_d$  – площадь доньшка стакана.

Отсюда следует, что высоту получаемого при вытяжке стакана без фланца можно определить по формуле:

$$H = \frac{D^2 - d^2}{4d} \quad (3.7)$$

Обычно при вытяжке высота стакана получается меньше его диаметра. Для того чтобы получить значительную высоту стакана, вытяжку производят в несколько приемов, т. е. за несколько переходов. При этом должно быть соблюдено правило: на каждом переходе коэффициент вытяжки не должен превышать предельное значение  $K_{\max}$ .

Для этого общий коэффициент вытяжки  $K_{\max}$  разбивают на несколько, так, чтобы соблюдалось равенство:

$$K_{\max} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3, \quad (3.8)$$

где каждый из коэффициентов  $K_i$  не превышает допустимого значения.

Например, необходимо изготовить стакан с размерами  $H_3$  и  $d_3$ . Из равенства площадей поверхностей детали и заготовки определяется диаметр исходной заготовки  $D$ . Если при этом значение коэффициента вытяжки  $K = D/d_3$  превысит предельное значение  $K_{\max}$ , то определяют количество необходимых переходов вытяжки, на каждом из которых назначают допустимый коэффициент вытяжки:

$$K \cdot K \cdot K \cdot K = \frac{D}{d_1} \cdot \frac{d_1}{d_2} \cdot \frac{d_2}{d_3} = \frac{D}{d_3} \quad (3.9)$$

Деталь изготавливают за несколько переходов, перекладывая заготовку из первой матрицы во вторую, затем в третью, и т. д. (рисунок 3.3).

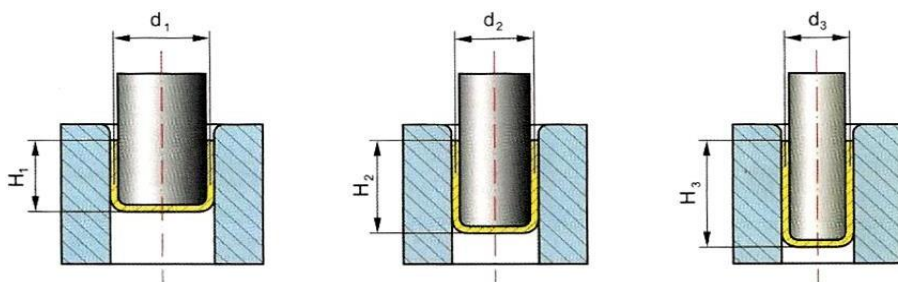


Рисунок 3.3. Получение стакана значительной высоты за несколько переходов

### Задание для проведения работы

В ходе лабораторной работы необходимо определить:

- предельный коэффициент вытяжки  $K_{вmax}$ . Для этого стакан заданного диаметра  $d$  вытягивают из разных заготовок, постепенно увеличивая их диаметр  $D$ . Тем самым изменяется коэффициент вытяжки  $K = D/d$ . Коэффициент вытяжки, при котором произойдет отрыв доньшка стаканчика, соответствует предельному коэффициенту вытяжки  $K_{вmax}$  для данного материала. Опыт может быть повторен для заготовок из другого материала;

- усилие и работу деформирования при вытяжке. Усилие деформирования при вытяжке определяется по показаниям датчика усилия и записывается на компьютер в функции времени. Одновременно датчиком перемещения записываются данные о перемещении пуансона в функции времени. Исключая из этих двух графиков параметр времени, получают график силы в функции перемещения. Площадь этого графика (интегрирование) определяет работу деформирования.

- максимальные растягивающие напряжения  $\sigma_r$ , действующие в опасном сечении. Они находятся из формулы усилия вытяжки при подстановке в нее экспериментального значения силы деформирования;

- необходимость применения прижима фланца. Определяется визуально по наличию или отсутствию складок на стаканчике. Толщину краевой части вытянутого стакана сравнивают с расчетным значением.

### Приборы, оборудование и материалы

Оборудование: пресс, номинальной силой 100 Кн.

Инструмент: специальный штамп для вытяжки с матрицей и пуансоном для изготовления стаканчика наружным диаметром 30 мм (рисунок 3.4).

Образцы: круглые заготовки диаметром 40, 45 и 50 мм, толщиной 2 мм из листовой малоуглеродистой стали, мягкой отожженной меди или мягких алюминиевых сплавов.

Измерительный инструмент: штангенциркуль, микрометр, линза с пятикратным увеличением.

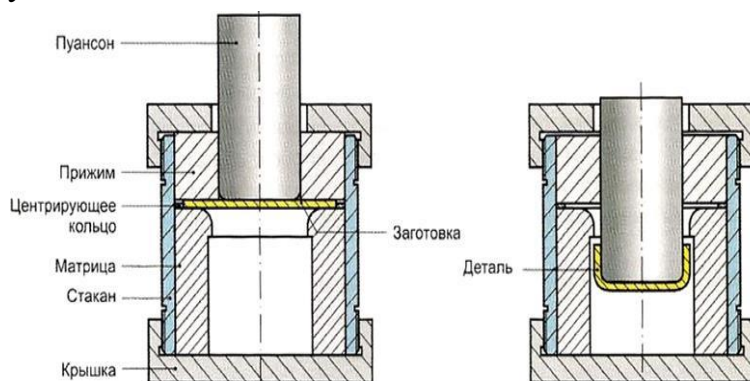


Рисунок 3.4 – Штамп для вытяжки

### Ход работы

Выполнить теоретические расчеты:

- для заданного диаметра  $d$  вытягиваемого стакана определить диаметр  $D$  заготовок, принимая коэффициент вытяжки  $K_v$  в пределах 1,6–1,9;
- проверить необходимость применения прижима;
- определить ожидаемую максимальную толщину стенки  $S_{max}$  краевой части вытягиваемого стакана;
- определить максимальную силу вытяжки  $P_{max}$  – принимая максимальные растягивающие напряжения  $\sigma_{max}$  равными пределу текучести  $\sigma_T$  материала.

Выполнить экспериментальные работы:

- разобрать штамп для вытяжки, сняв пуансон, фланец и прижим.; - установить в матрицу центрирующее кольцо и заготовку меньшего диаметра  $D$ , предварительно смазав плоскость и кромку отверстия матрицы машинным маслом;
- собрать штамп, обеспечив касание прижима и заготовки с минимальным усилием;
- установить штамп в рабочую зону пресса и произвести вытяжку стакана с записью силы деформирования и перемещения пуансона;
- зобрать штамп, извлечь вытянутый стакан;
- измерить диаметр  $d$  стакана и толщину  $S_{max}$  его краевой части;
- повторить опыты по пп. 2–4, увеличивая диаметр  $D$  заготовок до появления трещин в детали. Определить предельный коэффициент вытяжки, соответствующий разрушению детали;
- повторить опыты по пп. 2–5 для заготовок из другого материала (с другим пределом текучести).

Произвести обработку полученных данных: используя запись силы и перемещения во времени, построить зависимость силы деформирования по ходу

вытяжки  $P = (S)$ , сделать вывод о характере этой зависимости, определить работу деформирования.

Используя экспериментальное значение силы деформирования  $P$ , рассчитать фактические максимальные растягивающие напряжения  $\sigma_{\text{max}}$ , действующие в заготовке и сравнить с принятыми. Сравнить теоретические и фактические силы вытяжки.

Сравнить теоретические и фактические значения толщины краевой части вытянутого стакана. Оценить величину утолщения стенки стакана по сравнению с толщиной исходной заготовки.

Сравнить предельные коэффициенты вытяжки для разных материалов, сделать выводы о влиянии этого коэффициента на усилие вытяжки.

Построить графики  $P = (K_{\text{в}})$ ,  $\sigma_{\text{max}} = (K_{\text{в}})$  и  $S_{\text{max}} / S = (K_{\text{в}})$ . Исходные, расчетные и экспериментальные данные занести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1

Материал	$D$ , мм	$K_{\text{в}}$	$S$ , мм	$S_{\text{max}}$ , мм		$P_{\text{max}}$ , кН			$\sigma_{\text{т}}$ , кН/см <sup>2</sup>	$\sigma_{\text{р}}$ , кН/см <sup>2</sup>
				экспе- римент	$\rho$ расчет	экспе- римент	$\rho$ расчет	$\rho$ расчет		
Сталь										
Медь										
Алюми- ний										

По результатам работы должны быть получены следующие выводы:

1. Возможность изготовления вытянутого стакана определяется предельным коэффициентом вытяжки.

2. В процессе вытяжки происходит утолщение стенки у краевой части стакана за счет действия сжимающих напряжений во фланце. В связи с этим зазор между пуансоном и матрицей необходимо рассчитывать по этой утолщенной стенке, чтобы не происходил зажим стенки стакана при вытяжке.

3. В процессе вытяжки происходит уменьшение толщины стенки стакана в области перехода к его доньшку в связи с тем, что здесь действуют максимальные растягивающие напряжения. Разрушение происходит в этой зоне.

4. В процессе вытяжки возможна потеря устойчивости фланца с образованием складок. Вероятность складкообразования тем больше, чем тоньше материал и больше ширина фланца. Для устранения складкообразования применяют прижим заготовки, сила прижима определяется расчетом.



5. Усилие вытяжки тем больше, чем больше коэффициент вытяжки, толще материал, выше предел текучести материала и меньше радиус скругления матрицы.

6. Наибольшее усилие возникает в начальной стадии вытяжки.

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятию операция вытяжки.
2. Схема последовательного выполнения операции вытяжки.
3. Обозначение размеров заготовок и напряжения, действующих в них.

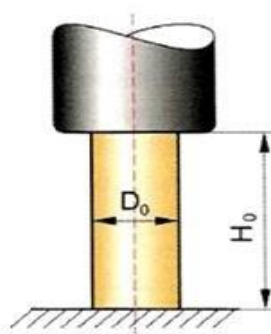
## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ОСАДКЕ.

Цель работы: получение практических умений и навыков определения стадии деформирования металла при осадке, определения пластической деформации, структуры металла; разобрать прочность и деформативность металла при осадке в случае холодной и горячей деформации

### Теоретическая часть

Осадка – операция обработки давлением, при которой заготовка сжимается между параллельными плитами, в результате чего высота заготовки уменьшается, а ее поперечные размеры увеличиваются (рисунок 4.1).

а)



б)

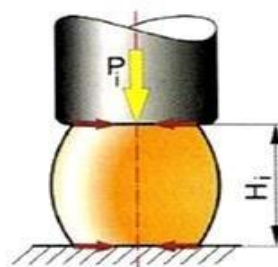


Рисунок 4.1 – Деформирование заготовки в результате осадки

На рисунке 4.1 показана исходная цилиндрическая заготовка диаметром  $D_0$  и высотой  $H_0$  (рисунок 4.1, а) и промежуточная стадия осадки, когда высота заготовки уменьшилась до значения  $H_1$  (рисунок 4.1, б). На заготовку действует

деформирующая сила  $P_i$  и силы трения на контактных поверхностях заготовки и инструмента (плит).

Силы трения сдерживают течение металла в радиальном направлении, в связи с чем радиальная деформация слоев, примыкающих к контактной поверхности, будет меньше, чем слоев в средней части заготовки. В результате исходная цилиндрическая форма заготовки искажается, приобретая бочкообразность, которая зависит от величины сил трения. При хорошей смазке контактных поверхностей (малые силы трения) бочкообразность невелика.

В процессе осадки заготовка проходит две стадии деформирования.

Деформация может быть упругая (исчезающая после снятия нагрузки) и пластическая (остающаяся после снятия нагрузки). При увеличении нагрузки упругая деформация переходит в пластическую. Пластическая деформация при осадке образца под действием внешней силы  $P_i$  количественно может быть определена величиной степени деформации, которая рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon = \frac{H_0 - H_i}{H_0} \quad (4.1)$$

где  $H_0$  – начальная высота образца (заготовки);  $H_i$  – высота образца после его деформации под действием силы  $P_i$ .

Способность материалов необратимо деформироваться без разрушения под действием внешних сил называют пластичностью. Это основной фактор, определяющий возможность формоизменения заготовки обработкой давлением. Пластичность материала количественно может быть определена максимальной степенью деформации ( $\sigma_{\max}$ ), выше которой металл разрушается. Например, при осадке образца

$$\varepsilon_{\max} = \frac{H_0 - H_k}{H_0} \quad (4.2)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{P_i}{S_i} \quad (4.3)$$

где  $S_i$  – площадь поперечного сечения образца, образовавшаяся после осадки под действием силы  $P_i$ .

Пластичность и сопротивление деформированию существенно зависят от температуры. С увеличением температуры заготовки пластичность увеличивается, а сопротивление деформированию уменьшается. Кроме того, на значение сопротивления деформированию заготовки значительное влияние оказывает величина степени деформации.

Основные конструкционные материалы (сталь, цветные металлы и их сплавы) являются поликристаллическими телами, т. е. состоят из множества кристаллитов (зерен).

Процесс пластического деформирования сопровождается изменением не только формы заготовки, но и структуры материала. В результате пластической деформации изменяется атомно-кристаллическое строение металла, форма, размеры и ориентация зерен, вследствие чего изменяются и его физико-механические свойства.

С увеличением степени деформации увеличиваются все показатели сопротивления деформированию: пределы упругости, текучести, прочности и твердость металла. Одновременно снижаются показатели пластичности, относительное удлинение и ударная вязкость (рисунок 4.2).

Это явление изменения свойств в результате холодной деформации получило название наклепа или упрочнения. Состояние наклепа металла термодинамически неустойчиво, из которого он стремится перейти в более устойчивое. Процесс восстановления свойств активизируется при нагреве

Повышение температуры заготовки увеличивает подвижность атомов, которые получают возможность перестроения. Вместо вытянутых зерен, которые получились при холодной деформации, образуются равноосные зерна. Это явление называется рекристаллизацией, в результате которой наклеп практически полностью снимается и свойства материала приближаются к исходным значениям.

В зависимости от соотношения температурно-скоростных условий деформирования и температуры рекристаллизации металла заготовки различают холодную и горячую деформации.

Это явление изменения свойств в результате холодной деформации получило название наклепа или упрочнения. Состояние наклепа металла термодинамически неустойчиво, из которого он стремится перейти в более устойчивое. Процесс восстановления свойств активизируется при нагреве.

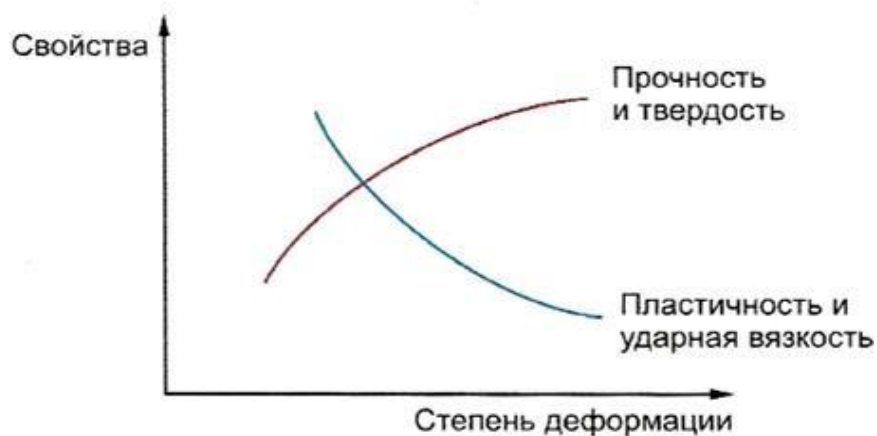


Рисунок 4.2 – Деформирование заготовки в результате осадки

Холодной деформацией называют такую, которую проводят при температуре ниже температуры рекристаллизации, равной  $T_{рек} \approx 0,4T_{пл}$ , поэтому холодная деформация сопровождается наклепом заготовки.

Деформацию называют горячей в том случае, если ее проводят при температурах выше температуры рекристаллизации. При горячей деформации проходят процессы разупрочнения и рекристаллизации. По окончании горячей деформации упрочнение в заготовке отсутствует.

При горячей деформации заготовок сопротивление деформированию примерно в 10 раз меньше, чем при холодной. Пластичность металла возрастает при нагреве, поэтому горячую обработку давлением применяют для изготовления крупных заготовок и при деформировании высокопрочных малопластичных материалов.

Величина наклепа или его отсутствие может быть определена различными методами, наиболее простым из которых являются неразрушающие испытания на твердость. Твердость – это способность материала сопротивляться внедрению в него другого, недеформирующегося тела. Значение твердости и ее размерность для одного и того же материала зависят от применяемого метода измерения. Твердость по Бринеллю (НВ) определяют на твердомере (рисунок 4.3).

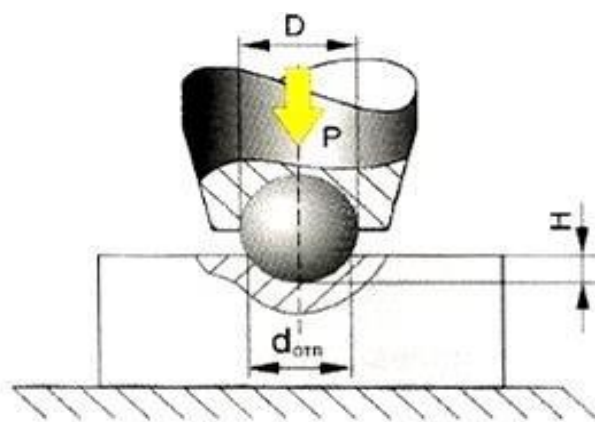


Рисунок 4.3. Измерение твердости по Бринеллю

Твердость по методу Бринелля (ГОСТ 9012–59) измеряют вдавливанием в испытываемый образец стального шарика определенного диаметра  $D$  под действием заданной нагрузки  $P$  в течение определенного времени. В результате вдавливания шарика на поверхности образца получается отпечаток (лунка). Число твердости по Бринеллю, обозначаемое НВ, представляет собой отношение нагрузки  $P$  к площади поверхности сферического отпечатка и измеряется в МПа. Так как глубину отпечатка  $H$  измерить трудно, а проще измерить диаметр отпечатка  $d_{отп}$ ,  $H$  выражают через диаметр шарика  $D$  и отпечатка  $d_{отп}$ .

### Задание для проведения работы

Необходимо установить зависимость между напряжениями и деформациями при осадке цилиндрического образца, зависимость твердости материала от степени деформации, оценить степень упрочнения (наклепа) материала.

Для этого производят поэтапную осадку образца, фиксируя на каждом этапе по показаниям датчика силы величину силы деформирования  $P_i$  и измеряя высоту образца  $H_i$ . На каждом этапе производят также замер твердости образца на твердомере Бринелля НВ $_i$ .

Значение силы на каждом этапе используют для расчета напряжения  $\sigma$  по формуле (4.3), а по начальной и текущей высоте образца определяют степень деформации  $\varepsilon$  по формуле (4.1).

### Приборы, оборудование и материалы

Оборудование: пресс, номинальной силой 100 кН.

Инструмент: экспериментальное приспособление для штамповки.

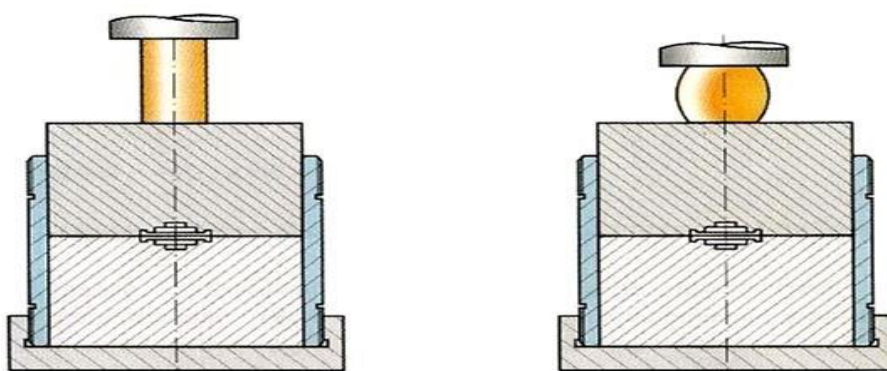


Рисунок 4.4 – Приспособление для операции осадки

Образцы: отожженные цилиндрические образцы из малоуглеродистой стали, диаметром 15 мм, высотой 25 мм.

Измерительный инструмент: штангенциркуль, масштабная линейка, твердомер Бринелля.

### Порядок выполнения работы

Выполнить экспериментальные работы:

Установить на пресс приспособление для штамповки (в сборе).

Установить на приспособление предварительно отожженный образец.

Произвести 1-ю стадию осадки образца (5 мм), отметить конечную силу  $P_1$  деформирования на этой стадии.

Снять образец, измерить его высоту  $H_1$  и диаметры по торцу и в середине.

Произвести замер твердости HB1 образца на твердомере Бринелля.

Произвести 2-ю стадию осадки образца, дополнительно осадив его на 5 мм и выполнить пп. 3–5.

Последовательно выполнять постадийную осадку образца до значения конечной силы деформирования  $P = 100$  кН.

Один образец непрерывно осадить до конечной силы 100 кН с записью силы и перемещения.

Экспериментальные данные занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1

Марка материала	№ осадки	Но, мм	Pi, н	Hi, мм	$\epsilon$ , %	Si, мм <sup>2</sup>	$\epsilon$ , кН/см <sup>2</sup>	dotп, мм	HB

Произвести обработку полученных данных:

Используя запись силы и перемещения, построить зависимость силы деформирования по ходу осадки  $P = f(S)$  и сделать вывод о характере этой зависимости, определить работу деформирования.

Используя данные о начальной высоте образца и его текущей высоте на каждой стадии осадки, определить соответствующую степень деформации.

Используя данные о силе и средней площади сечения образца на каждой стадии осадки, определить соответствующие напряжения.

По величине отпечатков на образце определить соответствующую твердость на каждой стадии осадки.

Построить графики  $\sigma = f(\epsilon)$  и  $HB = f(\epsilon)$ .

По результатам работы должны быть получены следующие выводы:

В процессе осадки форма цилиндрического образца приобретает бочкообразность, зависящую от величины сил трения на контактных поверхностях инструмента и заготовки.

В процессе холодной деформации (осадки) материал упрочняется: с увеличением степени деформации возрастает сила, необходимая для дальнейшего деформирования и, соответственно, увеличиваются напряжения.

В процессе холодной деформации с увеличением степени деформации изменяются механические свойства материала, в частности, увеличивается твердость.

## Контрольные вопросы

1. Что такое осадка и где она применяется?
2. В чем физическая сущность принципа наименьшего сопротивления?
3. Какие следствия вытекают из принципа наименьшего сопротивления?
4. Как от степени деформации меняются пределы упругости, текучести, прочность и твердость металла?
5. Какую роль выполняют силы внешнего трения?
6. Какую роль играет смазка?
7. Как зависит твердость материала от степени деформации?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПЕРАЦИИ ВЫРУБКИ

**Цель работы:** получение практически умений и навыков в области устройства штампов для разделительных операций, определения структуры деформации металла при вырубке, определение порядка расчета при вырубке детали.

### Теоретическая часть

Вырубка – технологическая разделительная операция, при которой из деформируемой части листовой заготовки при сдвиге материала по заданному контуру отделяется (вырубается) деталь с заданным внешним контуром.

Контур детали определяется контуром вырубного инструмента-пуансона и матрицы (рисунок 5.1).

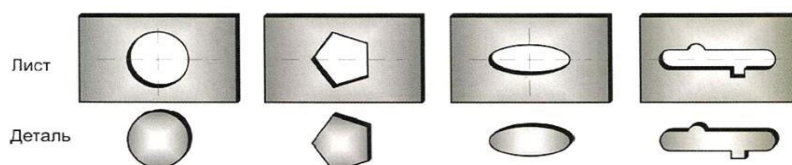


Рисунок 5.1 – Деформирование заготовки в результате осадки

Пуансон должен входить в матрицу с зазором  $Z$ , величина которого существенно влияет на качество боковой поверхности вырубленной детали. Процесс вырубке начинается с момента, когда пуансон  $1$  соприкасается с поверхностью заготовки  $2$ , установленной на матрице  $3$  (рисунок 5.2, а).

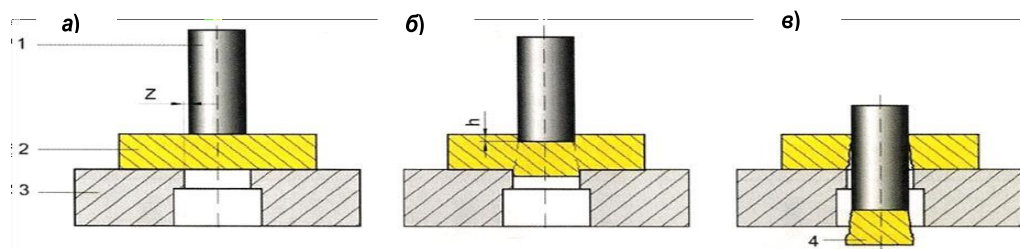


Рисунок 5.2 – Стадии выполнения операции вырубki

При внедрении пуансона в тело заготовки в ней возникают напряжения, распределение которых по деформируемому объему неравномерно. Наибольшие напряжения возникают вблизи острых кромок матрицы и пуансона, играющих роль концентраторов напряжений.

В начале внедрения напряжения не превышают предела прочности материала и процесс идет в зоне пластических деформаций, в результате чего образуется скругленная форма перехода от свободной поверхности заготовки к кромке пуансона и от свободной поверхности детали к кромке матрицы. По мере движения пуансона напряжения увеличиваются, достигают предельного значения, соответствующего разрушению материала, и происходит срез волокон материала на участке внедрения высотой  $h$ .

В конце этого участка вблизи кромок пуансона и матрицы в материале образуются трещины (рисунок 5.2, б).

После появления трещин процесс разрушения материала становится саморазвивающимся – трещины развиваются вглубь материала, встречаются, происходит отделение детали от заготовки. Последняя стадия процесса – проталкивание детали 4 через заготовку и матрицу (рисунок 5.2, в).

На рисунке 5.3 показаны характерные участки боковой поверхности детали и заготовки после вырубki.

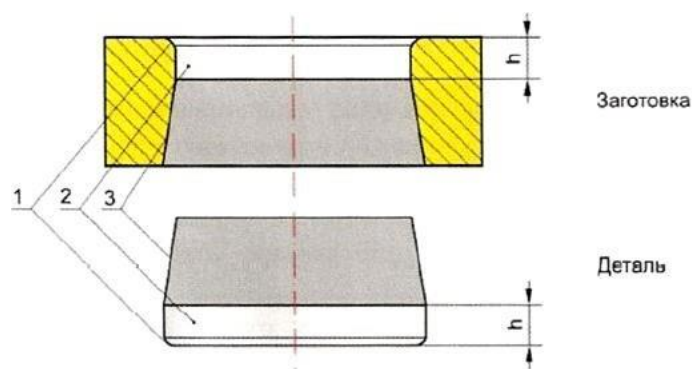


Рисунок 5.3 – Характерные участки боковой поверхности детали и заготовки после вырубki



Участок 1 – скругление поверхности, образовавшееся на начальной стадии вырубki, когда напряжения в материале еще не достигли предельного значения и материал деформируется пластически, без разрушения.

Участок 2 – блестящий поясok. На этом участке напряжения превышают предел прочности материала, и в результате перерезания волокон материала при внедрении пуансона в заготовку на глубину  $h$  образуется блестящий поясok.

Участок 3 – поверхность скалывания. Эта зона образуется в результате развития трещин со скоростью, превышающей скорость движения пуансона, в результате чего происходит резкий срыв нагрузки. Зазор  $Z$  между пуансоном и матрицей существенно влияет на точность размеров вырубаемой детали, качество ее боковой поверхности и стойкость инструмента.

На рисунке 5.4 показано развитие трещин скалывания при различных зазорах  $Z$ .

Оптимальным считается минимальный зазор, обеспечивающий совпадение трещин скалывания (рисунок 5.4, а).

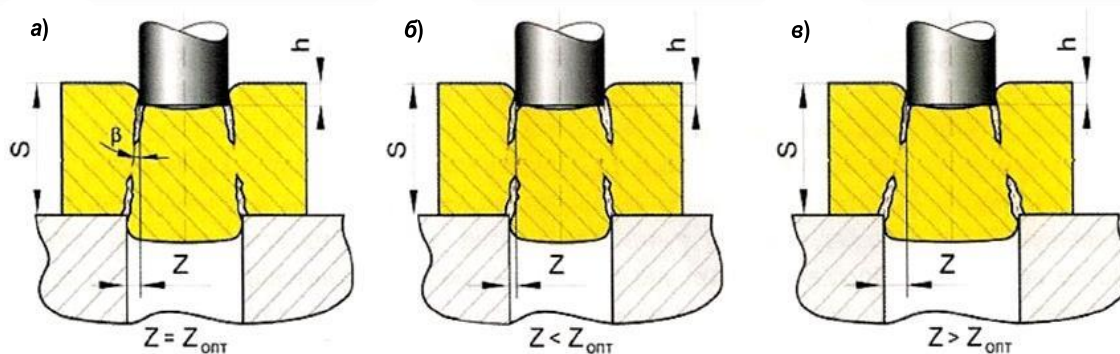


Рисунок 5.4 – Развитие трещин скалывания при вырубке

Его величина приближенно может быть определена по формуле

$$Z = (S - h) \cdot \operatorname{tg} \beta, \quad (5.1)$$

где  $\beta$  – угол наклона трещины к оси инструмента;  $h$  – глубина внедрения режущей кромки пуансона до появления трещин;  $S$  – толщина заготовки.

Среднее значение угла  $\beta$  находится в пределах  $40\text{--}60^\circ$ , меньшие значения принимаются для более твердых материалов. Глубина внедрения  $h$  колеблется в пределах:

$$h = (0,1 - 0,5) S, \quad (5.2)$$

где меньшие значения принимаются для более прочных и твердых материалов и возрастают для более пластичных.

Из сказанного следует, что минимальная величина зазора, обеспечивающая совпадение трещин скалывания, уменьшается с

повышением пластичности металла, т. е. для мягких металлов (медь, алюминий и др.) необходимо устанавливать меньшие зазоры, чем для твердых (сталь).

Уменьшение зазора по сравнению с оптимальным приводит к тому, что трещины скалывания не встречаются, и боковая поверхность получается рваной, с дополнительными поясками разрушения (см. рисунок 5.4, б).

При зазоре  $Z$ , большем оптимального, трещины встречаются, однако при этом боковая поверхность скалывания не является единой, а состоит из двух пересекающихся поверхностей скола (см. рисунок 5.4, в).

Максимальная сила вырубki определяется по формулам:

$$P_{\max} = 0,5 L S \sigma_v \quad (5.3)$$

или

$$P_{\max} = k L S \sigma_{ср}, \quad (5.4)$$

где  $L$  – периметр вырубаемой детали;  $S$  – толщина заготовки;  $k = (1,1–1,3)$  – коэффициент, учитывающий возможность притупления режущих кромок;  $\sigma_v$  – предел прочности материала;  $\sigma_{ср}$  – сопротивление срезу.

Характеристики материала  $\sigma_v$  и  $\sigma_{ср}$  содержатся в справочной литературе.

Влияние величины зазора  $Z$  при вырубке проявляется в следующем: при зазоре, большем оптимального, возрастает изгиб и искажение заготовки в процессе вырубki, а в детали возникают упругие деформации, уменьшающие ее размер, в результате чего диаметр детали будет несколько меньше диаметра матрицы, а диаметр вырубленного в заготовке отверстия – несколько больше диаметра пуансона. Следовательно, вырубленная деталь свободно выпадет через отверстие матрицы, а пуансон свободно выйдет из заготовки.

При зазоре, меньшем оптимального, увеличивается усилие деформирования, уменьшается изгиб и искажение заготовки в процессе вырубki, возрастает интенсивность притупления режущих кромок инструмента и износ боковых поверхностей пуансона и матрицы. После вырубki при зазорах, меньших оптимального, в детали возникают упругие деформации, увеличивающие ее размер, под действием которых диаметр детали становится больше диаметра матрицы, а диаметр вырубленного в заготовке отверстия – меньше диаметра пуансона, поэтому вырубленная деталь застревает в матрице, а заготовка плотно охватывает пуансон. Необходимо прикладывать силу для проталкивания

детали через матрицу и предусматривать съемник для съема заготовки с пуансона.

Усилие съема определяется формулой

$$P_c = \mu L h \sigma_s, \quad (5.5)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения;  $L$  – периметр детали;  $h$  – высота блестящего пояска;  $\sigma_s$  – напряжение текучести материала.

Усилие проталкивания детали принимается примерно равным усилию съема.

На рисунке 5.5 показан характер изменения силы вырубki по перемещению пуансона при оптимальном зазоре  $Z$ .



Рисунок 5.5 – Характер изменения силы вырубki по перемещению пуансона при оптимальном зазоре  $Z$

Как видно из графиков, для обоих случаев сила достаточно медленно возрастает на начальной стадии деформирования, затем быстро возрастает до максимума, после чего происходит резкий срыв нагрузки до значения, соответствующего силе проталкивания. Срыв нагрузки происходит в момент образования трещин скалывания при внедрении пуансона на высоту  $h$  блестящего пояска.

При прочих равных условиях для пластичных металлов, по сравнению с твердыми металлами, максимальная сила вырубki меньше, скол происходит при большей глубине внедрения пуансона, следовательно, величина блестящего пояска больше (рисунок 5.5).

### Задание для проведения работы

В процессе выполнения работы необходимо изучить факторы, влияющие на качество боковой поверхности вырубаемой детали, исследовать влияние толщины заготовки и ее материала на силу вырубki, высоту блестящего пояска и качество поверхности среза, экспериментально определить характер изменения силы по ходу инструмента, работу деформирования.

Вырубку производят на заготовках из среднеуглеродистой стали (твердый материал) и на заготовках из отожженной меди и алюминия (мягкий материал) в штампе с оптимальным зазором между пуансоном и матрицей. В процессе вырубki записывают силу вырубki и перемещение пуансона.

Сила деформирования определяется по показаниям датчика усилия и записывается на компьютере в функции времени. Одновременно датчиком перемещения записывается перемещение пуансона в функции времени. Исключая из этих двух графиков параметр времени, получают график силы в функции перемещения. Площадь этого графика (интегрирование) определяет работу деформирования.

В зависимости от того, застрекает ли вырубленная деталь в матрице, а заготовка на пуансоне, делают вывод о том, является ли зазор между пуансоном и матрицей оптимальным или нет.

После вырубki визуальнo определяют качество среза, проводят измерения высоты блестящего пояска и размеров детали и отверстия.

Экспериментальные значения величин зазора и максимальной силы вырубki сравнивают с расчетными значениями.

### Приборы, оборудование и материалы

Оборудование: пресс, номинальной силой 100 кН.

Инструмент: специальный штамп с матрицей и пуансоном для вырубki кружка диаметром 14 мм (рисунок 5.6).

Образцы: круглые заготовки диаметром 30 мм, толщиной 2 мм из листовой среднеуглеродистой стали, мягкой отожженной меди или мягких алюминиевых сплавов.

Измерительный инструмент: штангенциркуль, микрометр, линза с 5-кратным увеличением.

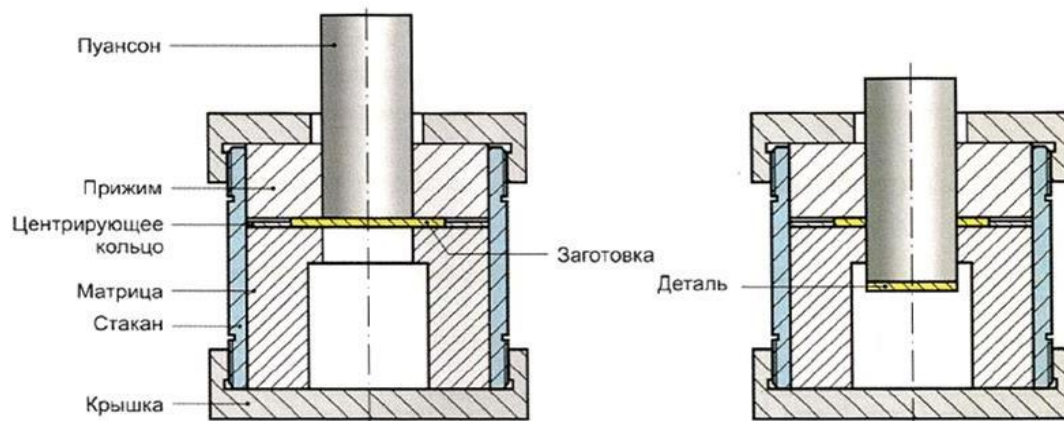


Рисунок 5.6 – Специальный штамп для вырубki кружка

## Порядок выполнения работы

Выполнить теоретические расчеты:

1. Для заданной толщины заготовки  $S$  определить высоту блестящего пояска  $h$  и оптимальный зазор  $Z$ .
2. Для заданного диаметра детали  $d$ , толщины  $S$  и материала ( $\sigma_v$ ,  $\sigma_{ср}$ ) определить максимальную силу вырубki  $P_{max}$ .
3. Определить силу съема  $P_c$ , приняв коэффициент трения  $\mu = 0,1$  и напряжение текучести ( $\sigma_s = \sigma_m$ ).

Выполнить экспериментальные работы:

1. Разобрать штамп для вырубki, сняв пуансон, фланец и прижим.
2. Установить в матрицу центрирующее кольцо и заготовку из стали.
3. Собрать штамп, обеспечив касание прижима и заготовки с минимальным усилием. Установить штамп в рабочую зону прессы и произвести вырубку кружка с записью силы деформирования и перемещения пуансона.
4. Разобрать штамп, извлечь деталь и заготовку.
5. Измерить диаметры пуансона  $d_n$ , матрицы  $D_m$ , вырубленного кружка  $d$  и отверстия  $D$  в заготовке. Определить зазор  $Z$  между пуансоном и матрицей, сравнить с оптимальным расчетным  $Z_{opt}$ . Сравнить между собой диаметры вырубленного кружка  $d$  и пуансона  $d_n$ , диаметры отверстия в заготовке  $D$  и матрицы  $D_m$ .

Повторить опыты по пп. 2–5 для заготовок из другого материала (с другим пределом текучести).

Произвести обработку полученных данных:

1. Используя запись силы и перемещения во времени, построить зависимость силы деформирования по ходу вырубki  $P = P(S)$ , сделать вывод о характере этой зависимости, определить работу деформирования.
2. Используя экспериментальное значение силы деформирования  $P$ , рассчитать фактические значения предела прочности  $\sigma_v$  и напряжения среза  $\sigma_{ср}$  материала и сравнить с принятыми. Сравнить теоретические и фактические силы вырубki.
3. Сравнить теоретические и фактические значения высоты  $h$  блестящего пояска вырубленной детали.
4. Оценить влияние изменения марки материала на качество поверхности среза, величину силы вырубki, высоту блестящего пояска при данном зазоре  $Z$ .

Исходные, расчетные и экспериментальные данные занести в

таблицу 5.1.

Таблица 5.1

Материалы	d, мм	D, мм	S, мм	Z, мм		H, мм		P, кН <sup>2</sup>		$\sigma_b$ кН/см <sup>2</sup>		$\sigma_{ср}$ кН/см <sup>2</sup>		P <sub>c</sub> , кН		
				расчет	эксперимент	расчет	эксперимент	расчет	эксперимент	эксперимент	расчет	эксперимент	расчет	эксперимент	расчет	
Сталь																
Медь																
Алюминий																

По результатам работы должны быть получены следующие выводы:

1. Качество среза при вырубке детали зависит от величины зазора между пуансоном и матрицей.

2. Для данного материала существует оптимальный зазор, при котором срез получается наилучшим.

3. Поверхность среза имеет три характерных участка – скругление, блестящий поясок и скол.

4. Процесс отделения детали от заготовки происходит последовательно в два этапа – начальное смещение детали в заготовке при внедрении пуансона на величину  $h = (0,1-0,5) S$  и  $n$  следующее окончательное отделение детали от заготовки путем скола за счет развития трещин.

5. Сила вырубki зависит от толщины заготовки, периметра вырубаемой детали и характеристики материала (предел прочности).

### Контрольные вопросы

1. В чем суть операции вырубki?
2. В чем отличие операции пробивки от вырубki?

3. Как влияет зазор  $Z$  на качество боковой поверхности вырубаемой детали?
4. Как развиваются трещины скалывания при различных зазорах  $Z$ .
5. Как определяется усилие съема заготовки?
6. Как определяется максимальная сила вырубки?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6 ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИИ ПРЕССОВАНИЯ

Цель работы: определить порядок и технологию прессования, применяемые инструменты, определение усилий прессования

### Теоретическая часть

Прессование – процесс обработки давлением разных материалов с целью уплотнения, изменения формы, механических и других свойств материала.

Одной из широко применяемых в прессовании технологических схем является вытеснение металла из контейнера через отверстие заданного сечения в инструменте – матрице (рисунок 6.1). Таким способом получают прутки, трубы и разнообразные профили с высоким качеством поверхности и высокой точностью размеров поперечного сечения изделия.

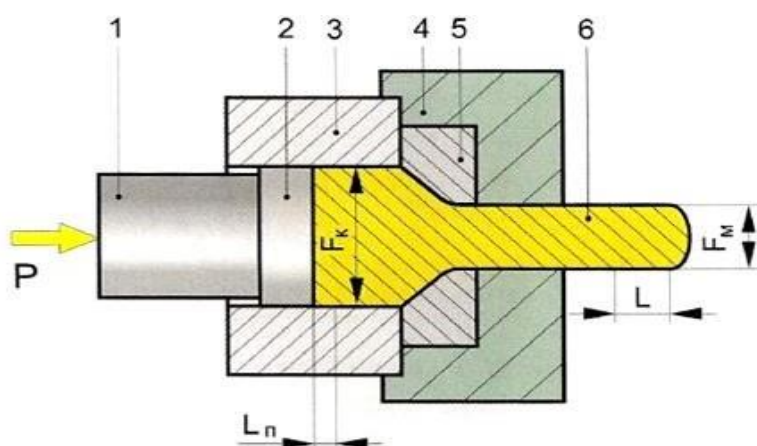


Рисунок 6.1 – Схема прессования

Процесс прессования состоит в следующем. Заготовку, нагретую до заданной температуры, помещают в контейнер 3. В торцевой части контейнера в специальном матрицедержателе 4

установлена матрица 5 с отверстием требуемой формы, которая формирует контур прессуемого профиля 6. С противоположного конца в контейнер вводят пуансон или пресс-штемпель 1.

На торце пуансона для предохранения его от термических воздействий и уменьшения трения о контейнер помещают пресс-шайбу 2, диаметр которой немного больше, чем у пуансона. Усилие прессы через пуансон и пресс-шайбу передается к заготовке, заставляя металл вытекать через отверстие в матрице, образуя требуемый профиль. Такое прессование называется прямым. Этим способом можно изготавливать не только сплошные профили, но и полые. В этом случае используют заготовку с предварительно полученным отверстием, либо отверстие прошивают на том же прессе уже в процессе прессования.

Общую деформацию при прессовании обычно характеризуют вытяжкой  $\mu$ , которую определяют, как отношение площадей поперечного сечения контейнера  $F_k$  и отверстия в матрице  $F_m$ :

$$\mu = \frac{F_k}{F_m} \quad (6.1)$$

Поскольку объем деформируемого металла не изменяется, вытяжку можно определять, как отношение длины полученного пресс-изделия  $L$  к длине выдавленной из контейнера части заготовки, которая равна (в установившейся стадии процесса прессования) перемещению пуансона  $L_n$  –

Действительно,  $L_n \cdot F_k = L \cdot F_m$ , откуда  $F_k/F_m = L/L_n$  и

$$\mu = L/L_n \quad (6.2)$$

На рисунке 6.2 показана схема напряженного состояния при операции прессования.

Очаг пластической деформации сосредоточен в области, ограниченной двумя сферами (показано пунктиром).



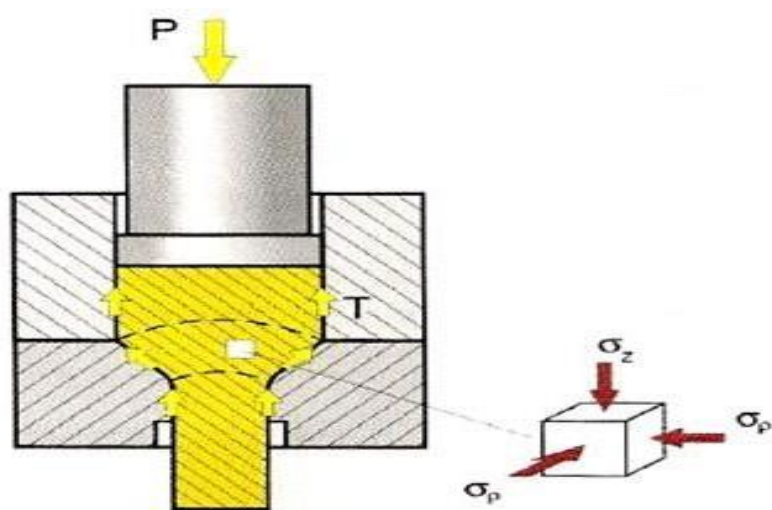


Рисунок 6.2 – Схема напряженного состояния при операции прессования

Выше и ниже этих сфер металл находится в жестком состоянии и перемещается без пластической деформации. Внутри очага деформации на любой выделенный элемент действуют радиальные сжимающие напряжения  $\sigma_r$ , а в осевом направлении – осевые сжимающие напряжения  $\sigma_z$ , следовательно, металл находится в условиях всестороннего сжатия. Такая схема напряженного состояния обеспечивает деформируемому металлу наиболее высокую пластичность.

Из всех процессов обработки металлов давлением прессование протекает при наиболее благоприятной схеме напряженно-деформированного состояния, что позволяет получать очень большие деформации за один ход пресса. Так, вытяжка  $\mu = L/L_n$  при прессовании может быть 100 и выше.

Общая сила  $P$ , обеспечивающая выдавливание металла, складывается из силы  $P_d$ , необходимой для преодоления сопротивления металла деформации, и силы  $T$  для преодоления трения. Силы трения действуют на контактных поверхностях металла со стенками контейнера, конуса матрицы и очка матрицы.

Составляющая общей силы прессования, идущая на преодоление сил трения, может достигать больших значений (до 30 % и выше от общей силы).

Сила прессования может быть определена по формуле

$$P = F_k \cdot \sigma_m \left( \frac{2L}{D} + \frac{1}{\alpha} \cdot \ln \frac{Fk}{Fn} + \frac{4\mu l}{d} \right) \quad (6.3)$$

где  $D$  и  $d$  – диаметры контейнера и очка матрицы соответственно;  $L$  и  $l$  – длина заготовки и длина цилиндрической части очка матрицы;  $\mu$  – коэффициент трения;  $\sigma_m$  – предел текучести материала;  $F_k$  и  $F$  – сечения контейнера и изделия соответственно;  $\alpha$  – угол при вершине конуса матрицы, рад.

### Задание для проведения работы

В процессе выполнения работы необходимо изучить технологию прессования, экспериментально наблюдать последовательное формоизменение заготовки, определить коэффициент вытяжки, объемы и размеры заготовки, силу прессования и напряжение текучести на разных стадиях ее деформирования.

### Приборы, оборудование и материалы

Оборудование: пресс, номинальной силой 100 Кн.

Инструмент: экспериментальное приспособления для прессования (рисунок 6.3).

Образцы: заготовки диаметром 12 мм, высотой 13 мм из алюминиевого сплава АД.

Измерительный инструмент: штангенциркуль, микрометр.

### Порядок выполнения работы

1. Выполнить теоретические расчеты:

- ✓ По заданным размерам изделия определить объем и размеры заготовки.
- ✓ Определить силу прессования.
- ✓ Определить коэффициент вытяжки.

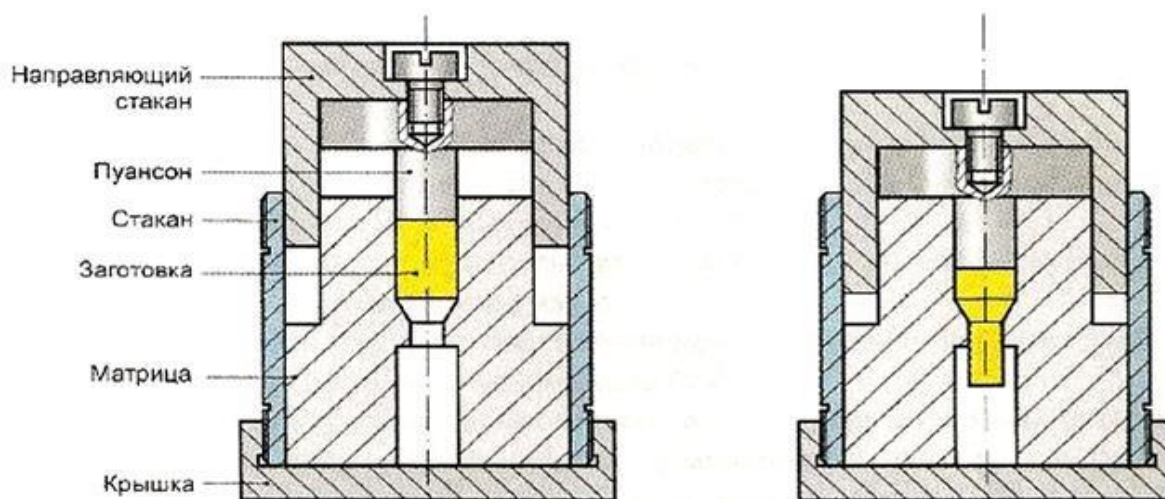


Рисунок 6.3 – Экспериментальное приспособление для прессования

2. Выполнить экспериментальные работы:
  - ✓ Начертить эскиз заготовки, проставить размеры.
  - ✓ Разобрать штамп, смазать матрицу машинным маслом, установить в матрицу заготовку, собрать штамп и установить его в пресс.
  - ✓ Произвести прессование, замерить силу прессования.
  - ✓ Разобрать штамп, удалить изделие с пресс остатком, начертить эскиз изделия, проставить размеры.
3. Произвести обработку полученных данных:
  - ✓ Используя экспериментальное значение силы прессования, определить напряжение текучести на контактной поверхности материала и пуансона и сравнить с пределом текучести материала.
  - ✓ Из условия разности объемов заготовки и полученного изделия (без прессостатка) определить процент отхода металла.
4. По результатам работы должны быть получены следующие выводы:
  - ✓ Прессование является технологическим процессом обработки давлением, которым получают длинномерные изделия – профили с различной формой поперечного сечения. Форма изделия определяется формой отверстия матрицы, через которую производится выдавливание материала заготовки.
  - ✓ Прессование обеспечивает высокое качество поверхности изделия и высокую точность размеров.
  - ✓ В очаге деформации при прессовании металл подвержен всестороннему сжатию, что обеспечивает повышенную пластичность, поэтому прессованием можно изготавливать изделия из высокопрочных и труднодеформируемых материалов.
  - ✓ При прессовании действуют большие силы трения материала по стенкам контейнера и матрицы, что вызывает их повышенный износ.
  - ✓ Чертеж поковки составляется по чертежу готовой детали с назначением припусков, допусков и напусков, величина которых регламентирована ГОСТом.
  - ✓ По чертежу поковки определяется объем поковки, а по последнему – объем заготовки, учитывающий наличие облоя и угара металла (дополнительно примерно 18–20 %).
  - ✓ По объему заготовки определяются ее размеры по соотношению высоты к диаметру ( $K = 1,8–2,0$ ).
  - ✓ Штамповка проходит в три стадии – свободная осадка до соприкосновения металла с боковыми стенками полости штампа;

заполнение полости с вытеканием металла в облой, доштамповка для компенсации колебаний объема и износа полости штампа, когда весь избыток металла выходит в заусенец.

- ✓ Характер изменения силы штамповки по ходу деформирования, характеризуется плавным нарастанием силы на первых стадиях штамповки с резким возрастанием на стадии доштамповки.

### **Контрольные вопросы**

1. В чем заключается процесс прессования?
2. Как определяется значение коэффициента вытяжки  $\mu$ ?
3. От каких параметров зависит усилие вытяжки?
4. Чем определяется профиль длинномерных изделий при прессовании?
5. В какие стадии происходит процесс штамповки?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Спицын, И. А. Материаловедение и технология конструкционных материалов. Раздел «Горячая обработка металлов»: учеб. пособие / И. А. Спицын. – Пенза: ПГАУ, 2020. – 105 с. // Лань: электронно-библиотечная система: [сайт]. – URL: <https://e.lanbook.com/book/170959>. – Текст: электронный.
2. Еланский, Г. Н. Основы производства и обработки металлов: учебник / Г. Н. Еланский, Б. В. Линчевский, А. А. Кальменев. – Москва: МГВМИ, 2005. – 416 с. – Текст: непосредственный.
3. Корнилович, С. А. Материаловедение. Технология конструкционных материалов: учеб. пособие / С. А. Корнилович. – Омск: Омский ГАУ, 2017. – 100 с. // Лань: электронно-библиотечная система: [сайт]. – URL: <https://e.lanbook.com/book/176604> – Текст: электронный.
4. Мышечкин, А. А. Технология, оборудование и оснастка для изготовления деталей методами пластической деформации: учеб. пособие / А. А. Мышечкин, И. В. Белоусов, С. В. Скрипник. – Москва: РТУ МИРЭА, 2022. – Ч. 1. – 2022. – 115 с. – Режим доступа: для авториз. пользователей. – Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/311426> (дата обращения: 18.02.2022). – Текст: электронный.
5. Зубарев, Ю. М. Методы получения заготовок в машиностроении и расчет припусков на их обработку: учебное пособие для вузов / Ю. М. Зубарев. – 3-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 256 с. – Режим доступа: для авториз. пользователей. – Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/215714> (дата обращения: 18.02.2022). – ISBN 978-5-507-44101-3. – Текст: электронный.
6. Константинов, И. Л. Основы технологических процессов обработки металлов давлением: учебник / И. Л. Константинов, С. Б. Сидельников; Сибирский федеральный университет. – Красноярск: Сибирский федеральный университет (СФУ), 2015. – 488 с. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=435694> (дата обращения: 18.02.2022). – ISBN 978-5-7638-3166-5. – Текст: электронный.
7. Бондаренко, Г. Г. Материаловедение: учебник / Г. Г. Бондаренко, Т. А. Кабанова, В. В. Рыбалко; под ред. Г. Г. Бондаренко. – 2-е изд. – Москва: Юрайт, 2013. – 360 с. - ISBN 978-5-9916-2843-3. – Текст: непосредственный.
8. Каргин, В. Р. Теория обработки металлов давлением: учеб. пособие / В. Р. Каргин. – Самара: Самарский университет, 2019. – 112 с. – Режим доступа: для авториз. пользователей. – Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/148619> (дата обращения: 18.02.2022). – ISBN 978-5-7883-1458-7. – Текст: электронный.

Локальный электронный методический материал

Валерий Сергеевич Бедарев

ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ДАВЛЕНИЕМ

Редактор С. Кондрашова

Корректор Т. Звада

Уч.-изд. л. 3,3. Печ. л. 2,9.

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
"Калининградский государственный технический университет".  
236022, Калининград, Советский проспект, 1