**Московский государственный технический университет
имени Н. Э. Баумана**

Центр довузовской подготовки

Технический лабораторный практикум — школьным инженерным классам

Факультет «Машиностроительные технологии»

Кафедра «Технологии обработки давлением» (МТ-6)

Технологии обработки металлов давлением

*Методические указания к выполнению
лабораторных работ*

BAUMANPRESS

Москва
ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н. Э. Баумана
2016

УДК 621.7
ББК 34.62
А50

Факультет «Машиностроительные технологии»
Кафедра «Технологии обработки давлением» (МТ-6)

Автор ***А.И. Алимов***

Рецензенты:
А. В. Кравцов, Е. Г. Буркова

Алимов, А. И.

А50 Технологии обработки металлов давлением : методические указания к выполнению лабораторных работ / А. И. Алимов. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. — 50, [2] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-4392-5

Сборник включает описание цикла экспериментальных лабораторных работ, организованных МГТУ им. Н.Э. Баумана на базе современных научных лабораторий и научно-образовательных центров в рамках реализации «Технического лабораторного практикума — школьным инженерным классам» для обучающихся, осваивающих программы основного общего и среднего общего образования.

Лабораторный практикум позволит обучающимся ознакомиться с прикладным значением теоретических знаний в области физики, полученных в ходе изучения курса школьной программы, а также даст возможность погрузиться в широкий спектр современных инженерных специальностей.

УДК 621.7
ББК 34.62

© Центр довузовской подготовки, 2016
© Оформление. Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016

ISBN 978-5-7038-4392-5

Предисловие

Предлагаемый сборник лабораторных работ позволяет школьникам ознакомиться с основами теории упругости и пластичности. В ходе выполнения лабораторной работы № 1 будет проведена опытная проверка закона Гука на примере испытания на сжатие алюминиевого образца на универсальной испытательной машине Instron DX600. Также экспериментальным путем определены такие характеристики механических свойств, как модуль Юнга и предел текучести.

В лабораторной работе № 2 рассмотрены основы гидростатики. В ходе ее выполнения будет экспериментально исследован принцип работы гидравлического пресса, подтверждена справедливость закона Паскаля для несжимаемых жидкостей. В качестве объекта исследования используется пресс ПБ476 с номинальной силой 1,6 МН.

В лабораторной работе № 3 учащиеся ознакомятся с основными закономерностями трения: видами и законами трения, способами экспериментального определения коэффициента трения, а также будут определены коэффициенты трения для закона Амонтона — Кулона между алюминиевым образцом и стальными плитами при использовании различных смазок.

В лабораторной работе № 4 рассмотрены теории упругости и пластичности. На примере гибки листового материала учащиеся получат сведения об упругих и пластических деформациях, напряженном и деформированном состояниях широкой алюминиевой полосы в процессе ее гибки, а также будет исследована зависимость углов пружинения от радиуса и углов гибки.

В лабораторной работе № 5 проанализированы виды энергии, изложен закон сохранения энергии. На примере операции осадки на молоте простого действия исследовано преобразование потенциальной энергии бабы молота в кинетическую энергию поступательно движущегося тела и далее в энергию пластической деформации свинцового образца, а также явление диссипации энергии.

Лабораторная работа № 1

Опытная проверка закона Гука и определение механических свойств металла с помощью испытания на сжатие

Введение

Современная теория обработки металлов давлением основывается на фундаментальной науке — механике сплошных сред. В механике сплошных сред устанавливаются уравнения, характеризующие кинематические характеристики (деформированное состояние) и силовые характеристики (напряженное состояние), а также уравнения взаимосвязи между напряженным и деформированным состоянием (теории упругости и пластичности).

Известно, что металлы представляют собой совокупность атомов, упорядоченно расположенных в кристаллической решетке, т. е. имеют дискретное строение. Атомы воздействуют друг на друга силами, не подчиняющимися законам классической механики. Вполне обоснованным мог бы явиться подход, основанный на анализе этих сил, т. е. на рассмотрении законов взаимодействия атомов. Однако это очень сложный путь и на современном этапе развития науки и техники недостижимый. Действительно, в 1 см^3 металла, находящегося в твердом состоянии, содержится более 10^{20} атомов. Для описания взаимодействия их между собой (а следует написать уравнения, связывающие каждый атом с каждым) необходимо огромное число уравнений, с решением которых не справится любая, даже суперЭВМ. В то же время с практической точки зрения важно не поведение отдельных атомов, а всего тела в целом. Это позволяет строить теорию не на атомном, а на макроскопическом уровне. Для этого металл рассматривается как среда, заполняющая часть пространства не дискретным, а сплошным образом.

Одной из важных задач науки о механических свойствах металлов и сплавов является установление закономерностей, связывающих напряжения, которые возникают при приложении (к образцу, детали) той или иной нагрузки с соответствующими деформациями. Обратимая деформация называется *упругой*, а необратимая — *пластической*.

Цель работы — опытная проверка закона Гука и определение механических свойств металла с помощью испытания на сжатие.

Для достижения этой цели необходимо выполнить следующие задачи:

- провести испытание на сжатие алюминиевого образца;
- определить модуль Юнга и предел текучести.

Теоретическая часть

Под действием внешних сил тело находится в напряженном состоянии. Внешние силы бывают двух видов: поверхностные и объемные.

Поверхностные силы — это силы, приложенные к поверхности тела. К *объемным (массовым) силам* относятся силы, действующие на все материальные точки тела и пропорциональные их массам, например, сила тяжести.

Для определения вектора полного напряжения (рис. 1) в некоторой материальной точке M тела последнее мысленно разделяется сечением, проходящим через точку M на две части. Одна из частей мысленно отбрасывается, а ее действие на оставшуюся часть заменяется системой внутренних сил. Пусть на бесконечно малую площадку этого сечения ΔA действует сила $\Delta\vec{P}$. В общем случае направление действия силы $\Delta\vec{P}$ не совпадает с направлением нормали к площадке $\vec{n}$.

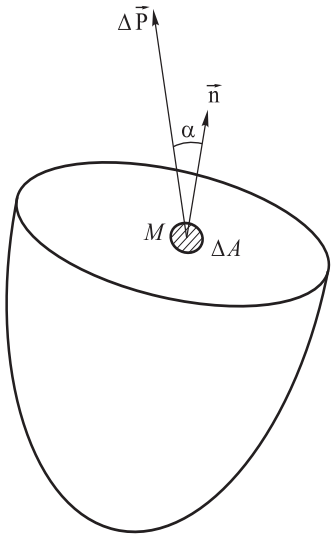


Рис. 1. Схема определения вектора полного напряжения

Вектором напряжения, действующего в точке M, называют предел

$$\vec{p} = \lim_{\Delta A \to 0} \frac{\Delta \vec{P}}{\Delta A}. \qquad (1)$$

Направление вектора полного напряжения $\vec{p}$ в общем случае не совпадает с направлением нормали $\vec{n}$. Тогда его можно разложить на нормальное и касательное напряжения:

$$\sigma_n = p\cos\alpha; \; \tau = p\sin\alpha. \qquad (2)$$

Под действием внешних сил каждая частица деформируемого тела имеет некоторую скорость. При определенных условиях движение частиц тела вызывает деформации. *Деформация* — это такое смещение частей тела друг относительно друга, при котором изменяются взаимные расстояния между ними, но не нарушается непрерывность самого тела.

Для количественной оценки деформации используют различные показатели, наиболее часто — *относительную деформацию*:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}. \qquad (3)$$

Здесь $\Delta L = L - L_0$ — *абсолютная деформация* — разница между конечным и начальным расстоянием между двумя точками тела.

Закономерности упругого (обратимого) поведения металлов были впервые изучены Гуком в 1678 г. Сводятся они к тому, что увеличение длины образца:

- прямо пропорционально (при растяжении) нагрузке при постоянных исходных длине и сечении;
- прямо пропорционально первоначальной длине образца при постоянных нагрузке и сечении;
- обратно пропорционально сечению образца при постоянных нагрузке и исходной длине.

Таким образом, для упругой области справедливо равенство

$$l - l_0 = \text{const}\, l_0 P \frac{1}{F_0} \qquad (4)$$

или

$$\frac{P}{F_0} = \text{const}\frac{l - l_0}{l_0}. \qquad (5)$$

Отсюда

$$\sigma = E\varepsilon. \qquad (6)$$

Коэффициент пропорциональности E, МПа, связывающий напряжение и деформацию, называется модулем нормальной упругости, или *модулем Юнга*, и является константой материала, характеризующей его жесткость.

Из формулы (6) следует, что модуль упругости при одноосном напряженном состоянии

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}. \qquad (7)$$

Следовательно, E характеризует интенсивность увеличения нагрузки с ростом удлинения (или увеличения напряжения с ростом относительной деформации), т. е. определяет наклон прямой OA (рис. 2) к горизонтальной оси диаграммы растяжения. Модуль нормальной упругости не зависит от знака деформации, его значение при растяжении и сжатии одинаково.

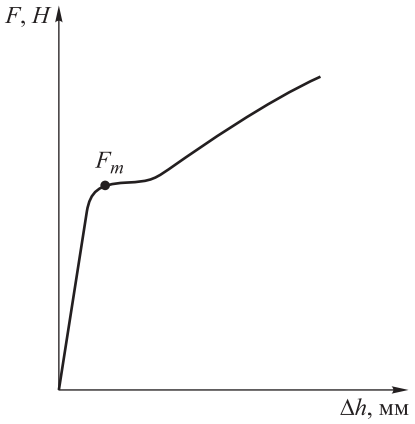


Рис. 2. Диаграмма испытания на сжатие

Поскольку металлы — это кристаллические тела, т. е. они имеют пространственную решетку, определяющую закономерное расположение атомов, упругая макродеформация металлического образца представляет собой сумму упругих смещений атомов из положений равновесия, которые они занимают в узлах кристаллической решетки ненагруженного тела.

Возьмем два соседних атома в решетке металлического образца, не подвергнутого действию внешних сил и свободного от внутренних напряжений (рис. 3, *а*). Атомы в этом случае находятся в состоянии равновесия — силы притяжения, действующие между их центрами, уравновешены силами отталкивания. Близкодействующие силы взаимодействия между двумя атомами (без учета влияния других соседних атомов в кристаллической решетке) в зависимости от расстояния между их центрами описываются кривыми, изображенными на рис. 3, *б*. На бесконечно большом расстоянии силы взаимодействия между атомами равны нулю.

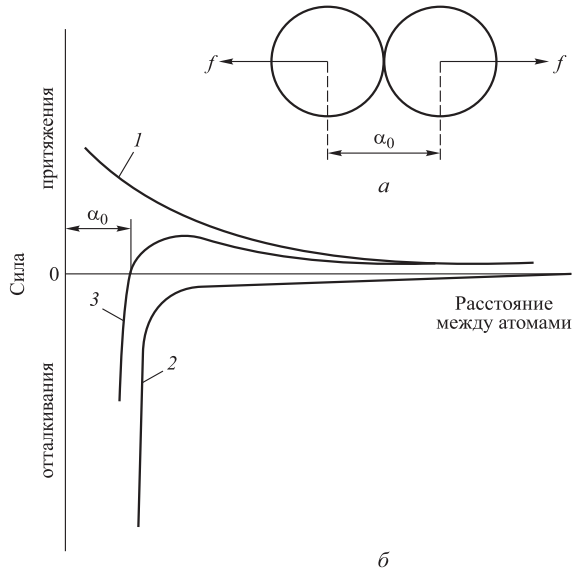


Рис. 3. Силы взаимодействия между двумя атомами:
а — при отсутствии внутренних напряжений и воздействия внешних сил; *б* — силы взаимодействия в зависимости от расстояния между атомами; *1* — отталкивания; *2* — притяжения; *3* — результирующая

По мере сближения атомов увеличивается сила притяжения (кривая *1* на рис. 3, *б*) и на определенном расстоянии резко возрастает сила отталкивания между ними (кривая *2*). Пересечение результирующей кривой *3* с горизонтальной осью (сила равна нулю) определяет равновесное расстояние между двумя атомами a_0.

Если к телу приложена сила, вызывающая упругую деформацию, то расстояние между атомами изменяется и устанавливается новое положение равновесия, в котором изменившиеся силы межатомного взаимодействия компенсируют приложенную внешнюю силу, при этом после снятия нагрузки атомы возвратятся в исходное состояние.

Если к телу прикладывать все бóльшую силу, то в определенный момент дальнейшая деформация будет происходить без значительного увеличения нагрузки, при этом атомы уже не будут возвращаться в положение равновесия и произойдет пластическая деформация. Напряжение, соответствующее силе начала текучести $F_т$, при которой образец деформируется без заметного увеличения сжимающей нагрузки, называется *физическим пределом текучести* $\sigma_т$.

Экспериментальная техника

В ходе выполнения работы используется универсальная испытательная машина Instron 600DX (рис. 4), оснастка для испытаний на сжатие (рис. 5), штангенциркуль, алюминиевый цилиндрический образец.

Instron 600DX является промышленной испытательной машиной с двумя рабочими зонами, разработанная для проведения испытаний на растяжение, сжатие, изгиб и сдвиг с высокой нагрузочной способностью. Оборудование работает от гидравлической насосной станции, которая приводит в движение поршень, создающий необходимое усилие для испытания. Нагрузочная рама, гидравлическая станция, электронные приборы и панель управления выполнены в единой компоновке. Установка широко применяется для испытаний бетона, метизов, высокопрочных композитов, металлических стержней и древесины. Максимальная развиваемая сила составляет 600 кН.

Рис. 4. Универсальная испытательная машина Instron 600DX

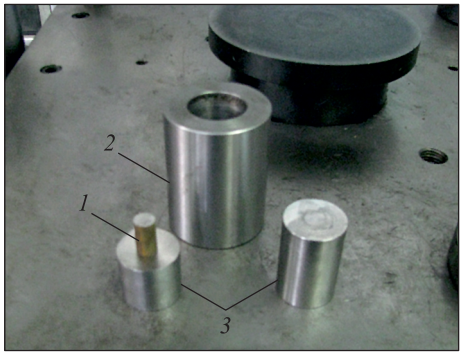


Рис. 5. Внешний вид оснастки для испытаний на сжатие:
1 — обойма; *2* — образец; *3* — бойки

Задание для лабораторной работы

Провести испытание на сжатие алюминиевого образца и построить график зависимости σ(ε). По результатам испытаний определить модуль Юнга E и физический предел текучести $\sigma_т$.

Порядок выполнения работы

1. Измерить начальные высоту и диаметр образца.
2. Рассчитать начальную площадь поперечного сечения образца.
3. По предполагаемому значению предела текучести $\sigma_т$, которое сообщит преподаватель, рассчитать предполагаемую силу начала текучести $F_т$.
4. Изучить конструкцию универсальной испытательной машины Instron 600DX и оснастки для испытания на сжатие.
5. Обезжирить рабочие поверхности бойков и торцы образца, установить образец в оснастку для испытаний на сжатие.
6. Установить оснастку для испытаний на сжатие в зону сжатия универсальной испытательной машины Instron 600DX, проверяя соосность установки с помощью концентрических рисок на деформирующих плитах.
7. Провести испытание на сжатие до силы 1,2 $F_т$.
8. Зарисовать диаграмму испытания с обозначением характерных точек.
9. Рассчитать модуль Юнга при сжатии по формуле

$$E = \frac{Fh_0}{SA_0}, \tag{8}$$

где F — сила фиксированной точки в упругой области, Н; h_0 — начальная высота образца, мм; S — абсолютная деформация фиксированной точки в упругой области, мм; A_0 — начальная площадь поперечного сечения образца, мм^2.

10. Рассчитать физический предел текучести по формуле

$$\sigma_т = \frac{F_т}{A_0}, \tag{9}$$

где $F_т$ — сила начала текучести, Н; A_0 — начальная площадь поперечного сечения образца, мм^2.

Контрольные вопросы

1. Что такое напряжение? Как рассчитывается вектор полного напряжения?

2. Как рассчитать полное напряжение, зная нормальное и касательное напряжения?

3. Как рассчитывается относительная деформация? Чем относительная деформация отличается от абсолютной?

4. Чем отличается упругая деформация от пластической?

5. Сформулируйте закон Гука.

6. Что характеризует модуль Юнга? В каких единицах он измеряется?

7. Что такое предел текучести? В каких единицах он измеряется?

Отчет по лабораторной работе

В отчете приводят следующие сведения:

1) цель и задачи работы;

2) последовательность проведения работы;

3) эскиз образца;

4) диаграмма испытания с отмеченными характерными точками и линией;

5) последовательность расчета модуля Юнга и предела текучести;

6) ответы на контрольные вопросы;

7) выводы по работе с указанием области применимости закона Гука.

Литература

Бернштейн М.Л., Займовский М.А. Механические свойства металлов: учебник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1979.

ГОСТ 25.503–97 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие.

Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1977.

Лабораторная работа № 2

Исследование работы гидравлического пресса

Введение

Современные машины отличаются большой энергоемкостью при сравнительно малых габаритах. Эту задачу помогает решить гидропривод, который по своим качествам во многих случаях превзошел другие типы приводов и оказался простым и надежным средством для получения возвратно-поступательного и вращательного движения.

В настоящее время гидропривод широко применяется в авиастроении, станкостроении, машиностроении, кузнечно-прессовой отрасли, металлургии и т. д.

Работа гидравлической системы основана на одном из главных законов гидростатики — законе Паскаля, согласно которому давление в любом месте жидкости, находящейся в покое, одинаково по всем направлениям и одинаково передается по всему объему. Жидкость от насоса подается в полости гидроцилиндра, являющимся одним из основных узлов машины, и под действием давления жидкости возникает сила, с помощью которой осуществляется то или иное воздействие. Несмотря на открытие Паскаля, практическое применение гидравлики положил Дж. Брама, который изобрел гидравлический пресс в 1795 г. В качестве рабочей жидкости в этом прессе использовалась вода.

Цель работы — изучение конструкции и исследование работы гидравлического пресса.

Для достижения цели необходимо выполнить следующие задачи:

- изучить конструкцию гидравлического пресса;
- осуществить деформацию образца с фиксацией давления в главном гидроцилиндре и силы деформирования по ходу деформации;
- определить КПД гидравлической системы пресса.

Теоретическая часть

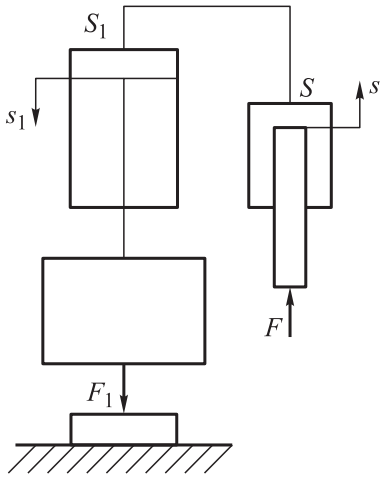


Рис. 1. Принцип действия гидравлического пресса

Принцип действия гидравлических прессов основан на **законе Паскаля** о сообщающихся сосудах (рис. 1), согласно которому давление, создаваемое силой F, действующей на площадь плунжера S (например, насоса), распространяется по всему объему жидкости и создает бóльшую в S_1/S силу $F_1 = pS_1$ (например, в цилиндре пресса), которая во время рабочего хода может деформировать материал. Перемещения поршней s и s_1 площадью соответственно S и S_1 связаны соотношением, которое следует из условия постоянства объема жидкости:

$$s_1 = sS / S_1. \qquad (1)$$

Исполнительные механизмы гидравлических машин — это *гидроцилиндры*, иначе называемые гидродвигателями поступательного движения. В гидравлических приводах прессов применяются гидроцилиндры двух типов: плунжерные и поршневые (рис. 2).

Плунжерные гидроцилиндры являются силовыми устройствами одностороннего действия: они передают силу давления только в одном направлении, и поэтому для обеспечения прямого и обратного ходов ползуна на прессе необходимо иметь по крайней мере три плунжерных цилиндра — один рабочий и два возвратных (обычно с меньшим усилием). Усилия рабочего и возвратных цилиндров противоположно направлены.

Гидроцилиндр поршневого типа — силовое устройство двухстороннего действия: прямой и обратный ход ползуна можно реализовать с помощью одного такого гидроцилиндра.

Выбор типа гидроцилиндра определяется видом рабочей жидкости. Работа на водомасляной эмульсии сопровождается корродированием поверхностей и повышенным (по сравнению с работой

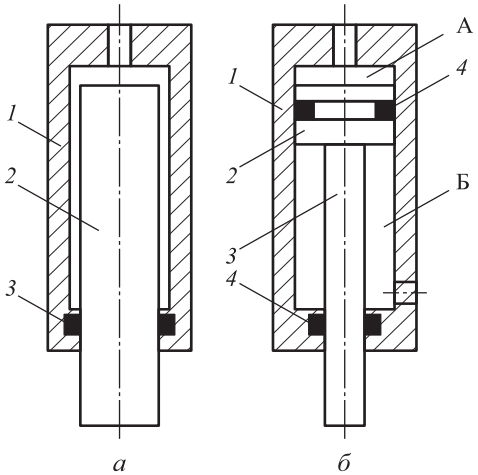


Рис. 2. Типы гидроцилиндров, применяемых в гидравлических приводах прессов:
а — плунжерный: *1* — цилиндр; *2* — плунжер; *3* — уплотнительное устройство; *б* — поршневой: *1* — цилиндр; *2* — поршень; *3* — шток; *4* — уплотнительное устройство; А — поршневая полость; Б — штоковая полость

на масле) трением. В этих условиях сопряжение поршень—цилиндр неработоспособно по причине заедания и быстрого износа. Поэтому при работе на водомасляной эмульсии можно использовать только плунжерные цилиндры. При работе на минеральном масле можно использовать цилиндр любого типа.

Схема гидравлического пресса для ковки показана на рис. 3. Основные его узлы: станина колонного типа, подвижная поперечина *7*, главный (рабочий) *9* и возвратные *4* цилиндры. В конструкциях мощных прессов предусмотрен гидравлический цилиндр, который уравновешивает подвижную поперечину. Станина состоит из неподвижных верхней *1* и нижней (стол пресса) *3* поперечин, соединенных в жесткую раму колоннами *2*, и предназначена для расположения всех узлов пресса. На подвижной поперечине *7*, связанной с плунжерами *6* и *8* возвратных и главного цилиндров соответственно и неподвижной нижней (стол пресса) *3* устанавливают и прикрепляют к ним рабочий инструмент (бойки плоские или вырезные, плиты для осадки и др.).

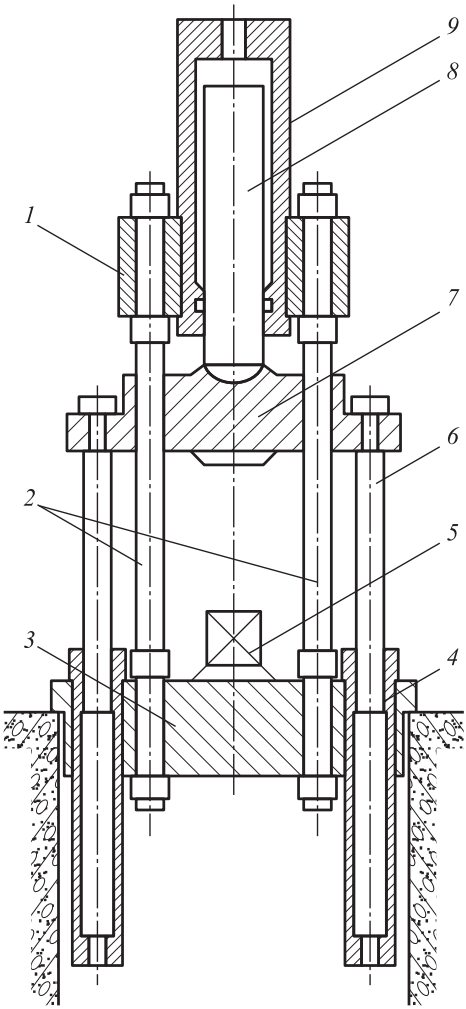


Рис. 3. Схема гидравлического пресса:
1 — неподвижная верхняя поперечина; *2* — колонны; *3* — нижняя поперечина; *4* — возвратные цилиндры; *5* — заготовка; *6*, *8* — плунжер; *7* — подвижная поперечина; *9* — главный цилиндр

Принцип действия гидравлического пресса состоит в том, что под давлением жидкости, являющейся носителем энергии

(рабочим телом), плунжер *8* выталкивается из главного цилиндра *9*, перемещает подвижную поперечину *7* с установленным на ней бойком и после упора в заготовку *5*, расположенную на столе *3*, пластически деформирует ее.

Чтобы преодолеть сопротивление со стороны заготовки *5* при ее деформировании, в рабочие цилиндры гидравлических прессов подают жидкость высокого давления (до 32 МПа и более). Скорость перемещения подвижной поперечины редко превышает 30 см/с, поэтому кинетическая энергия поступательного движения подвижных частей пресса очень мала по сравнению с накапливаемой жидкостью потенциальной энергией и ею обычно пренебрегают.

Подвижная поперечина возвращается в исходное положение под давлением жидкости, подаваемой в возвратные цилиндры. Описанный принцип действия гидравлического пресса остается неизменным несмотря на разнообразие технологического назначения, конструктивных форм и типов привода.

Общий признак гидравлического пресса — использование потенциальной энергии давления жидкости для совершения полного цикла движения подвижной поперечины. Привод (электродвигатель и насос) преобразует электрическую энергию в механическую, а затем в потенциальную — давление жидкости, которое используется для пластического деформирования заготовки. Поэтому привод этих прессов всегда насосный.

Рабочим телом в таком приводе является жидкость — водные эмульсии или минеральные масла. Если привод установлен не непосредственно на прессе, а на одном с ним или отдельном от него фундаменте (иногда даже в другом помещении), то такую комбинацию называют гидропрессовой установкой. Привод, установленный в отдельном помещении, предназначенный для нескольких прессов, называют *групповым*, в таком случае это является насосно-аккумуляторной станцией.

По сравнению с другими кузнечно-штамповочными машинами гидравлические прессы имеют существенные достоинства:

- простота конструкции;
- отсутствие предохранительных устройств от перегрузки, так как рабочая сила не может превысить определенное заранее установленное значение;

• независимость развиваемой рабочей силы от положения подвижной поперечины и плавное регулирование ее скорости;

• возможность в широком диапазоне менять закрытую высоту и длину хода подвижной поперечины;

• обеспечение выдержки любой продолжительности при постоянной силе.

Основным недостатком гидравлических прессов является их тихоходность. Повышение скорости перемещения подвижной поперечины провоцирует возникновение гидравлических ударов в трубопроводах в момент соприкосновения рабочего инструмента с заготовкой, что может привести к раскачиванию пресса, нарушению уплотнений трубопроводов и пр.

В гидравлических прессах энергия жидкости $E_ж$ создает работу деформирования материала во время рабочего хода:

$$E_ж = S_1 \int_0^{s_д} p_1(s)ds \to A_д = \int_0^{s_д} F_д(s)ds. \qquad (2)$$

Таким образом, зная работу жидкости за ход деформирования и работу деформирования, можно рассчитать КПД гидравлической системы пресса:

$$\eta = \frac{A_д}{E_ж}. \qquad (3)$$

Работа деформирования при осадке рассчитывается следующим образом:

$$A_д = \int_{h_0}^{h} Pdh, \qquad (4)$$

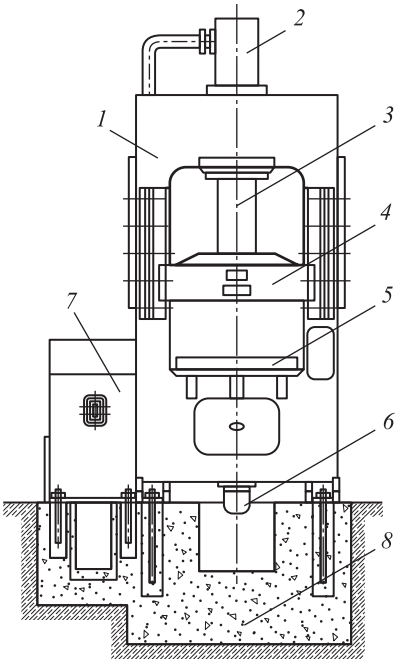
где P — сила деформирования, Н; h_0 *и* h — начальная и конечная высота заготовки, мм.

Экспериментальная техника

Объектом исследования является гидравлический пресс ПД476 с номинальным усилием 1,6 МН (рис. 4). Пресс состоит из станины *1*, главного цилиндра *2*, ползуна *4*, закрепленного на

штоке *3*, стола пресса *5*, выталкивателя *6*. Подачу рабочей жидкости и управление прессом осуществляется с помощью гидроаппарата *7*. Гидропрессовая установка монтируется на едином фундаменте *8*. Основные технические характеристики пресса ПД476 приведены ниже:

Номинальное давление рабочей жидкости, МПа …… 32
Номинальное усилие пресса, МН ……. 1,6
Ход ползуна, мм …….. 500
Ход выталкивателя, мм …….. 250
Скорость ползуна, мм/с:
при холостом ходе …….. 70
при рабочем ходе ……. 2



а

б

Рис. 4. Схема (*а*) и внешний вид (*б*) гидравлического пресса ПД476:

1 — станина; *2* — главный цилиндр; *3* — шток; *4* — ползун; *5* — стол пресса; *6* — выталкиватель; *7* — гидроаппарат; *8* — фундамент

Измерение давления в главном цилиндре осуществляется с помощью датчика давления, установленного на подводящем трубопроводе. Сила деформирования фиксируется с помощью датчика силы, а перемещение ползуна — датчика перемещения.

Задание для лабораторной работы

Провести осадку образца на гидравлическом прессе ПД476. Рассчитать КПД гидравлической системы пресса, рассчитать силу, развиваемую главным цилиндром в процессе деформации.

Порядок выполнения работы

1. Изучить конструкцию гидравлического пресса ПД476.
2. Ознакомиться с измерительной и регистрирующей аппаратурой.
3. Измерить начальные высоту и диаметр образца.
4. Осуществить деформирование образца с регистрацией силы деформирования и давления в главном цилиндре при перемещении ползуна.
5. Зная максимальное давление в главном цилиндре, рассчитать силу, развиваемую главным цилиндром.
6. Сопоставить рассчитанную силу с максимальной силой, записанной датчиком силы.
7. Рассчитать работу деформирования как площадь под графиком зависимости силы деформирования от перемещения ползуна.
8. Рассчитать работу жидкости как площадь под графиком зависимости давления в главном цилиндре от перемещения ползуна.
9. Рассчитать КПД гидравлической системы пресса. Предположить, на что может тратиться энергия.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон Паскаля. Для каких сред он справедлив?
2. Поясните принцип действия гидравлического пресса.

3. Что такое гидроцилиндр? Какие бывают гидроцилиндры?
4. Для чего нужны возвратные гидроцилиндры?
5. Назовите достоинства и недостатки гидравлических прессов.

Отчет по лабораторной работе

В отчете приводятся следующие сведения:

1) цель и задачи работы;
2) последовательность проведения работы;
3) график зависимости силы деформирования от перемещения ползуна;
4) график зависимости давления в главном цилиндре от перемещения ползуна;
5) последовательность расчета КПД пресса;
6) ответы на контрольные вопросы;
7) выводы по работе с указанием области применимости закона Паскаля.

Литература

Башта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б.Б. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: учебник для машиностроительных вузов. 2-е изд., перераб. М.: Машиностроение, 1982.

Бочаров Ю.А. Кузнечно-штамповочное оборудование: учебник. М.: Академия, 2008.

Живов Л.И., Овчинников А.Г., Складчиков Е.Н. Кузнечно-штамповочное оборудование: учебник для вузов / под ред. Л.И. Живова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006.

Лабораторная работа № 3

Определение коэффициента трения с помощью осадки кольцевого образца

Введение

Подавляющее число операций обработки металлов давлением осуществляется в условиях соприкосновения обрабатываемого металла с деформирующим инструментом. При этом частицы деформируемого металла скользят по поверхности инструмента, в результате чего возникают *силы контактного трения*, затрудняющие скольжение.

Трение при обработке металлов давлением, за исключением отдельных операций, когда оно играет активную роль (например, прокатка, вальцовка, некоторые операции листовой штамповки и др.), является негативным фактором, поскольку:

- ведет к возникновению неоднородности деформации или усиливает эту неоднородность, если последняя определяется самим характером осуществляемой операции;
- увеличивает необходимые деформирующую силу и работу деформации, так как преодолевается активной нагрузкой. Увеличение силы бывает весьма заметным — в несколько раз;
- снижает стойкость инструмента вследствие износа контактной поверхности и ее дополнительного нагрева, а также увеличения напряжений в связи с ростом деформирующего усилия;
- вызывает необходимость применения технологических смазок, что усложняет технологический процесс и иногда требует предварительной обработки исходного материала.

Трение при пластическом деформировании — *пластическое трение* — существенно отличается от трения скольжения в деталях машин — *машинное трение*, — так как во втором случае давление между соприкасающимися поверхностями относительно мало, и эти поверхности находятся в упругом деформирован-

ном состоянии. При пластическом деформировании поверхность инструмента деформирована упруго, а обрабатываемое тело деформируется пластически, его поверхность подвергается смятию и стремится принять форму поверхности инструмента.

Одним из способов учета трения при анализе операций обработки давлением является закон Амонтона — Кулона, в котором касательные напряжения трения прямо пропорциональны нормальным давлениям на контактной поверхности.

Цель работы — определение коэффициента трения для закона Амонтона — Кулона между алюминиевым образцом и стальными плитами при использовании различных смазок.

Для достижения цели необходимо выполнить следующие задачи:

- провести серию испытаний на сжатие кольцевого образца, применяя различные смазки;
- определить коэффициент трения при использовании различных смазок с помощью номограммы.

Теоретическая часть

Внешним, или *контактным*, *трением*, называют сопротивление, возникающее при перемещении одного тела по поверхности другого. Силу сопротивления относительному тангенциальному смещению тел называют *силой трения*. Вектор силы трения лежит в плоскости касания тел и направлен в сторону, противоположную действию сдвигающего усилия.

В зависимости от значения относительного смещения тел различают силу трения покоя (статическое трение) и силу трения движения (кинематическое трение).

Допустим, трение происходит между телами A и B, сжатыми нормальной силой N (рис. 1). Пусть к телу A приложено малое сдвигающее усилие Q, недостаточное для возникновения скольжения. В этом случае в плоскости касания тел будет действовать неполная сила трения покоя T, которая уравновешивает силу Q. При увеличении сдвигающего усилия Q соответственно растет и сила трения T, вплоть до того момента, когда она достигает предельно возможной величины, после чего начинается скольжение

тела A по телу B. Предельное значение статической силы трения T_s называют *полной силой трения покоя*.

При воздействии любой, даже очень небольшой сдвигающей силы Q тело A не остается абсолютно неподвижным по отношению к телу B, так как происходит предварительное смещение этих тел. Предварительное смещение очень мало (измеряется микронами), пропорционально сдвигающей силе и частично имеет упругий характер.

При большом относительном смещении тел на контактной поверхности действует сила трения движения, которая обычно бывает несколько меньше полной силы трения покоя.

По кинематическим признакам различают *трение скольжения* и *трение качения*. Трение скольжения характеризуется тем, что все точки поверхности одного тела движутся по касательной к поверхности другого тела (рис. 1, *а*). Частным случаем трения скольжения является *трение верчения*; оно имеет место, когда торец вала, вращаясь, касается плоскости.

При качении точки поверхностей взаимодействующих тел постепенно сближаются, входят в контакт, а затем расходятся. Перекатывание одного тела по другому осуществляется под действием силы Q (рис. 1, *б*), которая создает момент сил, необходимый для преодоления сопротивления качению. В некоторых случаях качение сопровождается скольжением, т. е. сочетаются оба вида трения.

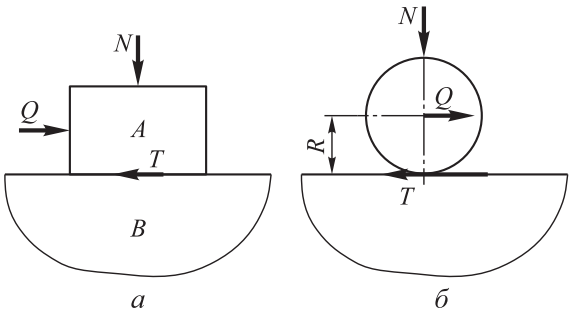


Рис. 1. Силы, действующие при трении скольжения (*а*) и качения (*б*) тел

Реальные поверхности всех твердых тел волнисты и шероховаты. Неровности на поверхности тела образуют определенный микрорельеф.

Под *волнистостью* понимают совокупность периодически повторяющихся неровностей, расстояние между которыми (шаг волны $S_в$) значительно больше их высоты $H_в$ (рис. 2). Для волнистости характерно соотношение $S_в/H_в > 40$.

Под *шероховатостью* (см. рис. 2) понимают совокупность неровностей с относительно малым шагом (0,002…12,5 мкм) и высотой (0,025…1600 мкм).

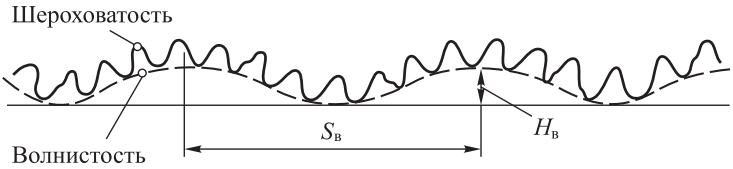


Рис. 2. Микрорельеф поверхности

Между поверхностями трущихся тел практически всегда в том или ином количестве находятся различные вещества, свойства которых резко отличаются от свойств основных тел. Это так называемые промежуточные или разделительные среды. Механизм внешнего трения существенно зависит от состава и количества этих промежуточных продуктов. Обычной разделительной средой служит смазка, специально вводимая в область контакта трущихся тел для уменьшения трения и износа. В зависимости от толщины разделительного смазочного слоя различают три *основных вида трения*: сухое, граничное и жидкостное. Принято выделять также смешанные виды трения: *полусухое* и *полужидкостное*.

Сухое трение наблюдается, когда поверхности трущихся тел совершенно свободны от смазки, загрязнений и молекул окружающей среды (влаги, газов и др.). Схема контактирования поверхностей в этом случае показана на рис. 3, *а*. На практике идеально сухое трение почти не встречается. Для его реализации требуется специальная очистка поверхностей и помещение трущихся тел в глубокий вакуум, поэтому под сухим трением обычно подразумевают трение несмазанных тел.

Предельным случаем сухого трения является так называемое чистое трение. Этим термином характеризуют трение тел, поверхности которых не только не несут следов смазки и загрязнений, но и свободны от окисных и других твердых пленок.

При наличии на контактных поверхностях тончайших пленок смазки (толщиной порядка сотых долей микрона) трение называют *граничным* (рис. 3, *б*). Для образования на металлических поверхностях тонких и прочных граничных пленок в смазке должны присутствовать поверхностно-активные вещества, например жирные кислоты.

Жидкостное, или *гидродинамическое*, *трение* имеет место при большой толщине разделительного смазочного слоя, когда неровности поверхностей тел не входят в непосредственное зацепление (рис. 3, *в*).

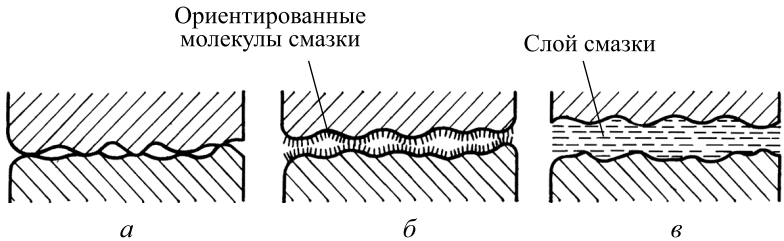


Рис. 3. Схемы контактирования поверхностей при сухом (*а*), граничном (*б*) и жидкостном (*в*) трении

Природа и закономерности жидкостного трения принципиально отличаются от сухого и граничного. Жидкостное трение — это внутреннее трение в слое смазки. Если сухое и граничное трение бывает статическим и кинетическим, то жидкостное трение может быть только кинетическим.

Полусухое трение можно представить как сочетание граничного трения с сухим. Оно наблюдается при наличии небольших количеств смазки или загрязнений между трущимися поверхностями.

Под полужидкостным трением подразумевают сочетание жидкостного трения с граничным или сухим. В этом случае между контактирующими телами имеется слой смазки, но он не

полностью разделяет поверхности; при сдвиге происходит зацепление поверхностей в отдельных точках, т. е. существуют очаги граничного или сухого трения.

Наиболее распространенный вид трения при обработке давлением — граничное трение, при котором толщина смазочной пленки мала. Неровности контактирующих поверхностей прорывают смазочную пленку, образуя узлы схватывания. Обычно для граничного трения считают касательное напряжение $\tau_к$ на контакте, пропорциональным нормальному напряжению σ_n (закон Амонтона — Кулона):

$$\tau_к = \mu\sigma_n . \qquad (1)$$

Коэффициент пропорциональности μ, называемый *коэффициентом трения*, в общем случае переменен и зависит от многих факторов, в числе которых род контактирующих материалов, скорость относительного скольжения, давление на контакте, свойства смазочного слоя и др. Коэффициент трения может изменяться в пределах 0…0,5.

Исследования показывают, что увеличение скорости снижает коэффициент трения. Так, при штамповке на молоте трение обычно ниже, чем при штамповке на прессе. Опыты также показывают, что вибрации значительно снижают коэффициент контактного трения.

Все эти факторы обычно меняются в процессе обработки даже одной заготовки, поэтому пользуются некоторым осредненным значением коэффициента трения за время деформирования.

Существуют стандарты, описывающие методику определения коэффициента трения и применяемое для этого оборудования — трибометр. Простейший трибометр представлен на рис. 4. С помощью динамометра измеряется сила тяги, которая по абсолютному значению равна силе трения. Таким образом, зная вес бруска, можно определить коэффициент трения.

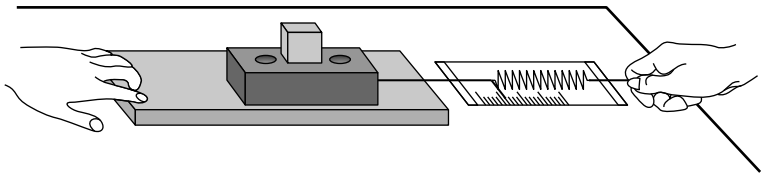


Рис. 4. Устройство трибометра

Однако ввиду описанных выше особенностей пластического трения необходимо применять иные методы определения коэффициента трения. Множество исследований показало, что метод осадки кольца является наиболее простым и надежным.

Метод осадки кольцевого образца заключается в сжатии образца кольцевой формы плоскими бойками. Изменение внутреннего диаметра при заданной степени деформации определяется коэффициентом трения между поверхностью заготовки и инструмента (рис. 5). Если коэффициент трения равен нулю, кольцо будет деформироваться без искажения формы, и радиальная скорость каждой точки кольца будет пропорциональна расстоянию от оси. При малом коэффициенте трения будет наблюдаться искажение формы на внутренней и наружной боковой поверхности кольца, при этом при той же степени деформации наружный и внутренний диаметры будут меньше, чем без трения. Если коэффициент трения значителен, то, поскольку энергетически выгодно только части металла течь наружу, оставшаяся часть будет течь внутрь, соответственно внутренний диаметр кольца будет меньше исходного.

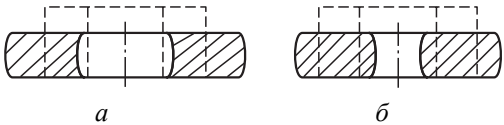


Рис. 5. Изменение формы кольца при низком (*а*) и высоком (*б*) трении

Для определения коэффициента трения обычно сравнивают внутренний диаметр деформированного на 50 % кольца с эталоном, полученным тем или иным образом. Широкое применение нашли номограммы для различных соотношений начальных размеров колец. Например, номограмма для колец с соотношением наружного диаметра к внутреннему и высоте 6:3:2 показана на рис. 6.

Для того, чтобы определить коэффициент трения, необходимо вычислить относительное изменение внутреннего диаметра при данной степени деформации и по нему определить μ.

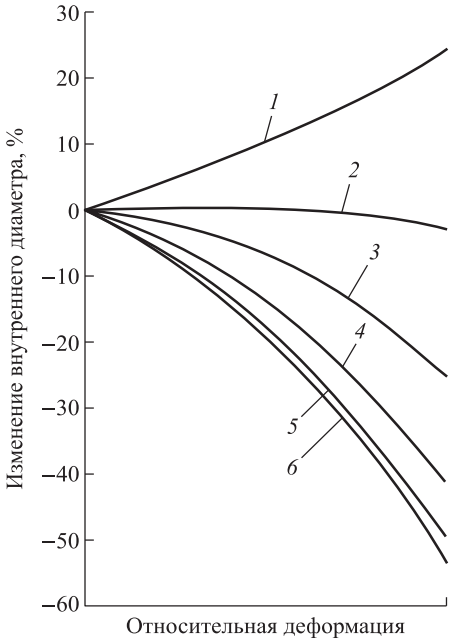


Рис. 6. Номограмма для определения коэффициента трения:
1 — μ = 0,0; *2* — 0,1; *3* — 0,2; *4* — 0,3; *5* — 0,4; *6* — 0,5

Экспериментальная техника

Для проведения лабораторной работы используется универсальная испытательная машина Instron 600DX, а также оснастка для испытаний на сжатие, штангенциркуль и алюминиевый кольцевой образец.

Instron 600DX является промышленной испытательной машиной с двумя рабочими зонами, разработанной для проведения испытаний на растяжение, сжатие, изгиб и сдвиг с высокой нагрузочной способностью. Оборудование работает от гидравлической насосной станции, которая приводит в движение поршень, создающий необходимое усилие для испытания. Нагрузочная рама, гидравлическая станция, электронные приборы и панель управления выполнены в единой компоновке. Широко применяется для испытаний бетона, метизов, высокопрочных композитов, металлических стержней, древесины. Максимальная развиваемая сила составляет 600 кН.

Рис. 7. Универсальная испытательная машина Instron 600DX

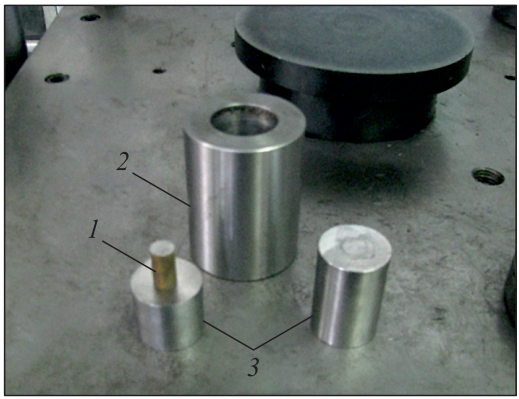


Рис. 8. Внешний вид оснастки для испытаний на сжатие:
1 — обойма; *2* — образец; *3* — бойки

Задание для лабораторной работы

Провести испытание на сжатие алюминиевого образца с использованием различных смазок. По результатам испытаний определить коэффициент трения между алюминиевым образцом и стальными плитами при использовании различных смазок.

Порядок выполнения работы

1. Измерить начальные высоту, внутренний и наружный диаметры образца и сделать его эскиз.
2. Обезжирить рабочие поверхности бойков и торцы образца и установить образец в оснастку для испытаний на сжатие.
3. Установить оснастку для испытаний на сжатие в зону сжатия универсальной испытательной машины Instron 600DX, проверяя соосность установки с помощью концентрических рисок на деформирующих плитах.
4. Провести испытание на сжатие до относительной деформации образца, равной 0,5. Для компенсации упругой деформации перемещение подвижной траверсы испытательной машины задать на 0,2 мм больше рассчитанного.
5. Измерить конечные высоту, внутренний и наружный диаметры образца и сделать его эскиз.
6. Рассчитать изменение внутреннего диаметра образца.
7. Рассчитать фактическую относительную деформацию образца по высоте.
8. Отметить точку на номограмме (см. рис. 6), соответствующую рассчитанному изменению внутреннего диаметра образца и фактической относительной деформации образца по высоте.
9. Рассчитать коэффициент трения по номограмме.
10. Повторить испытания для других смазок.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон трения Амонтона — Кулона. Что такое коэффициент трения?
2. Чем отличается трение при пластическом деформировании от трения скольжения в деталях машин?

3. Чем отличается волнистость от шероховатости? Ответ поясните рисунком.

4. Чем различаются сухое, граничное и жидкостное трение?

5. В чем заключается метод определения коэффициента трения путем осадки кольцевого образца?

Отчет по лабораторной работе

В отчете приводятся следующие сведения:

1) цель и задачи работы;

2) последовательность проведения работы;

3) эскизы исходного и деформированных образцов при использовании различных смазок;

4) последовательность расчета коэффициента трения;

5) ответы на контрольные вопросы;

6) выводы по работе с указанием влияния различных смазок на величину коэффициента трения.

Литература

Грудев А.П., Зильберг Ю.В., Тилик В.Т. Трение и смазки при обработке металлов давлением. М.: Металлургия, 1982.

Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1977.

Лабораторная работа № 4

Исследование явления пружинения при гибке листового материала

Введение

Производство летательных аппаратов, судов, автомобилей, сельскохозяйственных машин и другой техники связано с изготовлением большого количества тонкостенных деталей. Наиболее широко они применяются в конструкциях самолетов, каркас и обшивка основных агрегатов которых выполнены из листового и профильного металла. Важнейшим классом тонкостенных деталей являются детали одинарной и двойной кривизны, получаемые гибкой.

Данная операция позволяет получить большое многообразие форм деталей. В зависимости от этих форм различают следующие виды гибки:

- одноугловую, или V-образную (рис. 1, *а*);
- двуугловую, или U-образную (рис. 1, *б*);
- многоугловую (рис. 1, *в*, *г*);
- криволинейную (рис. 1, *д–з*), позволяющую получать изделия типа труб (рис. 1, *ж*).

При изготовлении деталей методом гибки возникает проблема, связанная с изменением угла и радиуса готовой детали. После снятия нагрузки угол изогнутой детали изменяется по сравнению с углом инструмента из-за упругой энергии, запасенной в процессе гибки (остаточные напряжения). Этот процесс можно назвать *упругим пружинением*, или *пружинением*. При этом изменяется угол и радиус кривизны образца.

Цель работы — исследование зависимости углов пружинения от радиуса и углов гибки.

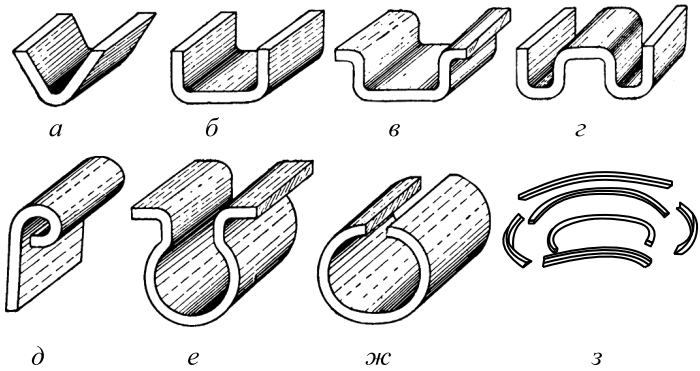


Рис. 1. Типы деталей, получаемых гибкой:
а — одноугловая; *б* — двуугловая; *в*, *г* — многоугловая; *д*, *е*, *з* — криволинейная; *ж* — изделие типа трубы

Для этого необходимо выполнить следующие задачи:

- изучить теоретическую часть;
- провести испытания на гибку алюминиевых образцов;
- рассчитать теоретические углы пружинения при исследуемых условиях гибки;
- сравнить расчетные и экспериментальные углы пружинения.

Теоретическая часть

Гибка — распространенная операция листовой штамповки. Гибка осуществляется в штампах и на специализированном гибочном оборудовании. Гибка, т. е. изменение кривизны срединной поверхности при почти неизменных ее линейных размерах, сопровождается неравномерным распределением деформаций по толщине. При гибке обычно изменяется кривизна срединной поверхности в одной плоскости, а кривизна заготовки в плоскостях, перпендикулярных плоскости изгиба, остается неизменной.

Гибка листового металла осуществляется в результате упругопластической деформации, протекающей различно с каждой из сторон изгибаемой заготовки с помощью матрицы и пуансона. *Пуансоном* называется рабочий элемент штампа, охватываемый штампуемым материалом при штамповке и (или) являющийся

подвижным. При штамповке пуансон непосредственно давит на заготовку, находящуюся во второй части штампа, которая называется *матрицей*.

Слои металла внутри угла изгиба (со стороны пуансона) сжимаются, укорачиваются в продольном и растягиваются в поперечном направлениях. Наружные слои (со стороны матрицы) растягиваются и удлиняются в продольном и сжимаются в поперечном направлениях (рис. 2, *а*). Между удлиненными и укороченными слоями (волокнами) находится нейтральный слой, длина которого равна первоначальной длине заготовки. При гибке узких полос происходит сильное искажение поперечного сечения, заключающееся в уменьшении толщины в месте изгиба, уширении внутри угла с образованием поперечной кривизны и сужении с наружной стороны (рис. 2, *б*). В результате уменьшения толщины материала и искажения формы поперечного сечения нейтральный слой в месте изгиба не проходит по середине сечения, а смещается в сторону малого радиуса. При гибке широких полос и листов также происходит утонение материала, но почти без искажения поперечного сечения, так как деформации в поперечном направлении противодействует сопротивление материала большой ширины. Лишь по краям широких полос происходит деформация, аналогичная поперечной деформации узких полос.

С целью упрощения при изгибе широких заготовок деформацией боковых поверхностей можно пренебречь и рассматривать деформацию всего сечения как деформацию сдвига.

При гибке с малыми радиусами закруглений напряжения и деформации не сосредотачиваются под ребром пуансона, а распространяются на значительную длину заготовки между опорами. В результате этого заготовка получает изгиб по параболической кривой, с постепенно увеличивающейся кривизной и уменьшением плеча изгиба.

Последовательность процесса угловой гибки показана на рис. 2, *в*. На всем протяжении процесса гибки заготовка имеет внутреннее закругление, которое больше радиуса пуансона, причем при гибке происходит постепенное уменьшение радиуса кривизны и плеча изгиба. Заготовка постепенно уменьшающимся закруглением прилегает в двух точках к стенкам матрицы и с некоторого момента оказывается прижатой к пуансону в трех

точках. Только в конце хода, при калибрующем глухом ударе, заготовка прилегает к пуансону.

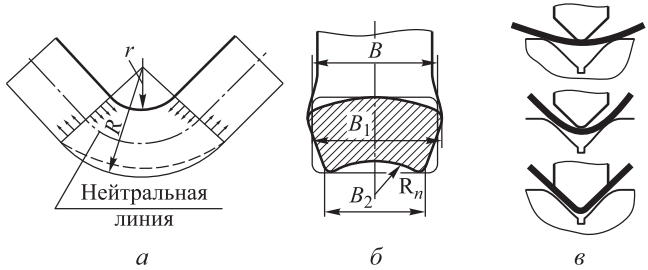


Рис. 2. Зоны при изгибе полосы (*а*), искажение поперечного сечения при гибке узких полос (*б*) и схема процесса гибки (*в*)

Гибка, являющаяся процессом пластической деформации, сопровождается упругой деформацией, определяемой законом Гука. По окончании гибки упругая деформация устраняется, вследствие чего происходит изменение размеров изделия по сравнению с размерами, заданными инструментом, называемое *упругим пружинением* (рис. 3).

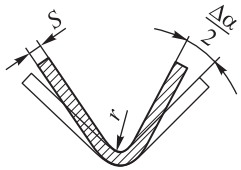


Рис. 3. Пружинение при гибке

Упругое пружинение обычно выражается в угловом измерении и является значением, на которое следует уменьшить требуемый угол гибки, чтобы получить нужный угол изогнутой детали. Угол пружинения может быть определен двумя способами: аналитическим расчетом упругой деформации или с помощью испытаний и замеров.

Разные знаки напряжений и деформаций по толщине заготовки приводят при разгрузке к тому, что сечения, перпендикулярные к срединной поверхности заготовки, поворачиваются, что ведет к изменению угловых размеров и кривизны срединной поверхности, появлению угла пружинения Δα.

Угол пружинения определяется по формуле

$$\Delta\alpha = \frac{3\sigma_{\text{Т}}}{E}\left(\frac{r}{S}+1\right)\alpha,$$

где σ_T — предел текучести материала, МПа; E — модуль упругости материала, МПа; r — внутренний радиус гибки, мм; S — толщина листового материала, мм; α — угол гибки, град.

Из ранее приведенной формулы следует, что на величину угла пружинения существенное влияние оказывает отношение предела текучести к модулю упругости. Упрочнение повышает предел текучести, следовательно, наклепанный (предварительно деформированный) материал будет пружинить больше, чем отожженный. Более интенсивно упрочняющиеся материалы имеют большее пружинение. Цветные сплавы (например, некоторые алюминиевые), имеющие предел текучести, близкий к пределу текучести стали, но значительно меньший (в 2,5–3 раза) модуль упругости, пружинят больше, чем сталь.

Значительное влияние на величину угла пружинения оказывают относительный радиус изгиба r/S и угол α: с увеличением этих факторов увеличивается угол пружинения, так как возрастает длина зоны пластических деформаций.

Экспериментальная техника

Инструмент — специальное приспособление для гибки полос (рис. 4) с комплектом сменных пуансонов с различными радиусами (рис. 5). Заготовка прижимается к пуансону с помощью эксцентрикового зажима и далее с помощью рычага осуществляется гибка на определенный угол, отсчитываемый по угломеру.

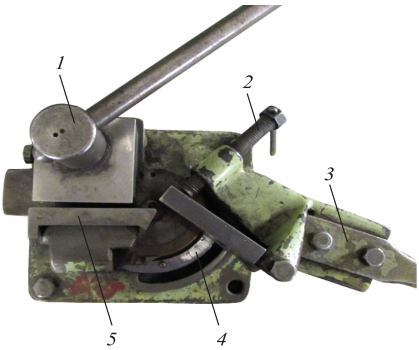


Рис. 4. Приспособление для гибки полос:
1 — эксцентриковый зажим; *2* — регулировочный винт; *3* — рычаг; *4* — угломер; *5* — пуансон

Измерительные инструменты — штангенциркуль, угломер, масштабная линейка. Образцы — полосы из алюминиевого сплава толщиной 1…2 мм, шириной 20…25 мм и длиной 300…500 мм.

Рис. 5. Комплект сменных пуансонов с различными радиусами

Задание для лабораторной работы

Провести гибку алюминиевых образцов на различный угол с использованием нескольких смежных пуансонов. По результатам испытаний определить экспериментальные углы пружинения и сравнить их с теоретическими.

Порядок выполнения работы

1. Измерить толщину S и ширину B исходных полос.

2. Подобрать комплект из трех пуансонов с различными радиусами скругления r (радиусами гибки), например: 3, 6, 9; 2, 5, 8 или 2, 6, 10 мм и т. д.

3. Установить один из пуансонов в приспособление для гибки.

4. Провести гибку полос с заданным радиусом последовательно на углы 30, 60 и 90°. Гибка проводится на разных участках заготовки. После гибки на соответствующие углы измерить полученные углы пружинения после снятия нагрузки.

5. Заменить пуансон в приспособлении на пуансоны с другими заданными радиусами и повторить эксперименты.

6. Определить углы пружинения для исследуемых углов гибки по формуле (1).

7. Занести полученные данные в таблицу в журнале работ.

8. Построить расчетный и экспериментальный графики зависимости угла пружинения от угла гибки.

9. Сопоставить экспериментальные и расчетные данные, оценить их сходимость.

Контрольные вопросы

1. Что такое гибка?

2. Что такое нейтральный слой?

3. Что такое пружинение? Как зависит пружинение от угла гибки?

4. В каком случае угол пружинения будет больше при одинаковом угле и радиусе: при гибке стали или алюминия? Ответ обоснуйте.

Отчет по лабораторной работе

В отчете приводят следующие сведения:

1) цель и задачи работы;

2) последовательность проведения работы;

3) таблица с расчетными и экспериментальными данными;

4) ответы на контрольные вопросы;

5) выводы по работе с указанием влияния угла и радиуса гибки на угол пружинения.

Литература

Попов А.Е., Ковалев В.Г., Шубин И.Н. Технология и автоматизация листовой штамповки: учебник для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000.

Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1971.

Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1977.

Лабораторная работа № 5

Исследование операции осадки на молоте простого действия

Введение

В настоящее время одним из основных способов изготовления заготовок деталей различных форм и размеров является ковка на молотах, применение которой обеспечивает получение стабильного качества поковок, обладающих требуемыми механическими свойствами.

Ковка — вид горячей обработки металлов давлением, при которой металл деформируется с помощью универсального инструмента. Ковкой получают заготовки для последующей механической обработки. Эти заготовки называются *поковки*.

Ковка является единственно возможным способом изготовления крупных заготовок (до 250 т) типа крупных валов, турбинных дисков, коленчатых валов судовых двигателей, валков прокатных станов и т. д. Поковки меньшей массы (десятки и сотни килограммов) можно изготовлять и ковкой, и штамповкой. Но, несмотря на ряд преимуществ штамповки, ковка в условиях единичного и мелкосерийного производства экономически более целесообразна. Объясняется это тем, что при ковке используют универсальный инструмент и оборудование, пригодные для изготовления поковок различной формы и размеров. Исходным материалом для ковки тяжелых крупных поковок служат слитки массой до 320 т. Поковки средней и малой массы изготовляют из металлических полуфабрикатов квадратного, круглого или прямоугольного сечения.

Основным недостатком ковки на молотах является низкий КПД удара вследствие возникновения при ударе больших сил, а значит, и потерь энергии на упругую деформацию поковки и деталей молота, трение и колебания шабота и фундамента и т. д.

Цель работы — исследование операции осадки на молоте простого действия.

Для достижения цели необходимо выполнить следующие задачи:

- провести деформацию образца на молоте простого действия;
- рассчитать эффективную энергию молота простого действия;
- рассчитать работу пластической деформации образца;
- определить КПД ударного деформирования.

Теоретическая часть

Энергия — это скалярная физическая величина, которая служит универсальной количественной мерой движения и взаимодействия всех видов материи. Каждому виду движения в физике соответствует своя форма энергии, например, механическому движению макроскопических тел — *механическая энергия*, тепловому движению частиц, образующих макроскопические тела, — *внутренняя энергия*.

Согласно представлениям современной механики, взаимодействие между телом и окружающей средой сопровождается обменом энергией. Этот обмен количественно характеризуется *механической работой*.

Работой называется физическая скалярная величина, численно равная скалярному произведению силы на перемещение:

$$A = \vec{F} \cdot \vec{s} = \left|\vec{F}\right|\left|\vec{s}\right|\cos(\vec{F}, \vec{s}). \qquad (1)$$

Единица работы силы — джоуль (Дж): 1 Дж — работа, совершаемая силой 1 Н при перемещении тела на 1 м, при условии, что сила постоянная и ее направление совпадает с направлением перемещения.

В результате совершения работы механическая энергия может постепенно изменяться, что обнаруживается по изменению скорости движения тела, его положения относительно других тел или его деформации.

Кинетическая энергия — часть механической энергии, которая зависит от массы и скорости тела в данный момент времени:

$$E_{\text{К}} = \frac{mv^2}{2}. \qquad (2)$$

Потенциальная сила — это сила, работа которой по перемещению тела из одной точки пространства в другую не зависит от формы траектории тела, соединяющей эти точки, а определяется начальным и конечным положениями тела.

Если работа, совершаемая силой, зависит от траектории перемещения из одной точки в другую, то такая сила называется *непотенциальной*. К непотенциальным относят диссипативные и гироскопические силы. Силы трения скольжения и качения — это *диссипативные* силы, при действии которых на механическую систему ее полная механическая энергия убывает (т. е. диссипирует), переходя в другие, немеханические формы энергии, например в теплоту. *Гироскопические* силы — силы, зависящие от скоростей и обладающие тем свойством, что сумма их работ (или мощностей) при любом перемещении системы, на которую действуют эти силы, равна нулю (например, сила Кориолиса).

Таким образом, *потенциальная энергия* — часть полной механической энергии системы, зависящая от взаимного расположения частиц, составляющих эту систему, и от их положений во внешнем силовом поле. Она определяется работой, которую должны совершить потенциальные силы, чтобы переместить тело из исходного положения в такое, где энергия взаимодействия считается равной нулю. Выбор нулевого положения произволен.

Существуют потенциальные силы, которые могут изменяться с течением времени, например электрическая сила, действующая на заряд, помещенный в переменное электрическое поле плоского конденсатора. Стационарные (не изменяющиеся с течением времени) потенциальные силы называются *консервативными*.

Потенциальная энергия тела массой m, находящегося на высоте h над поверхностью Земли, равна работе против сил тяжести, затраченной на подъем тела на эту высоту:

$$E_{\text{п}} = A_{\text{т}} = mgh. \qquad (3)$$

Преобразование различных видов энергии подчиняется *закону сохранения энергии*, являющегося фундаментальным и универсальным законом природы, который справедлив как для систем макроскопических тел, так и микроскопических.

Полная механическая энергия — это сумма кинетической и потенциальной энергии взаимодействия:

$$E = E_{\text{к}} + E_{\text{п}}. \tag{4}$$

Закон сохранения механической энергии гласит, что при любых процессах, происходящих в физических системах, в которых суммарная работа всех неконсервативных сил, приложенных к ее телам, равна нулю, ее полная механическая энергия остается неизменной:

$$E = E_{\text{к}} + E_{\text{п}} = \text{const}. \tag{5}$$

Таким образом, в консервативных системах происходит лишь превращение кинетической энергии в потенциальную и обратно в равных количествах так, что полная механическая энергия остается неизменной.

В случае неконсервативных систем их механическая энергия изменяется, а изменение полной механической энергии системы, равно работе, совершаемой непотенциальными силами, действующими на эту систему:

$$A_{\text{непот. с}} = \Delta E = (E_{\text{к}2} + E_{\text{п}2}) - (E_{\text{к}1} + E_{\text{п}1}). \tag{6}$$

Если такими силами являются силы трения, то происходит постепенное уменьшение механической энергии системы за счет процесса *диссипации*, или рассеяния. Однако энергия системы не теряется, она преобразуется в другую форму — тепловую, в результате чего увеличивается внутренняя энергия тел, т. е. увеличивается энергия хаотического движения молекул и соответственно — возрастает температура тела.

Осадка является одной из широко применяемых ковочных операций. При осадке уменьшается высота заготовки и одновременно увеличиваются ее поперечные размеры. Заготовку устанавливают вертикально, и деформирование происходит вдоль оси заготовки, при этом плоскости бойков полностью перекрывают торцы заготовки от начала до конца осадки (рис. 1).

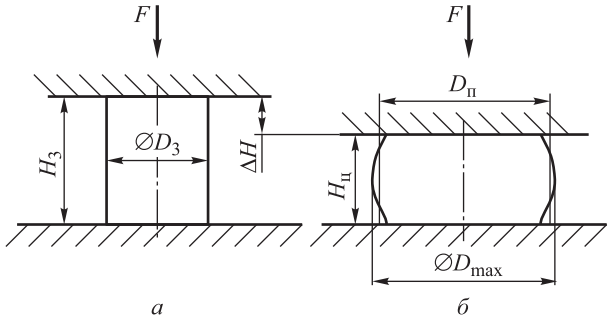


Рис. 1. Схема процесса осадки:
а — исходная заготовка; *б* — поковка после осадки

Важной характеристикой процесса осадки является степень деформации

$$\varepsilon = \frac{H_0 - H}{H_0}, \tag{7}$$

где H_0 — начальная высота заготовки, мм; H — конечная высота поковки, мм.

Степень деформации при осадке изменяется от 0 до 1.

Ковка может осуществляться на молотах и прессах. *Молотами* называются кузнечно-штамповочные машины ударного действия, в которых энергия привода перед ударом преобразуется в кинетическую энергию линейного движения рабочих масс с закрепленными на них штампами, а во время удара — в полезную работу деформирования поковки.

У молотов простого действия движение вниз осуществляется силой тяжести падающих частей. Работа силы тяжести переходит в кинетическую энергию, используемую для деформирования поковки. Возвратный ход (подъем) рабочих частей возможен при помощи пара, воздуха, газа, жидкости под давлением, электродвигателя и т. д.

У молотов двойного действия движение вниз осуществляется под действием двух факторов: силы тяжести падающих частей и энергии пара, воздуха, газа, жидкости, рессоры.

Эффективная энергия $L_э$ одиночного удара молота простого действия равна потенциальной энергии падающих частей, которая рассчитывается как результат произведения массы падающих

частей, исчисляемой в кг; высоты, с которой они падают на деформируемый металл, выраженной в метрах; и ускорения свободного падения. В процессе падения потенциальная энергия падающих частей переходит в кинетическую, используемую в дальнейшем для деформирования поковки:

$$L_э = mgh = \frac{mv^2}{2} = A_д. \qquad (8)$$

Энергию ударов ковочного молота можно регулировать, изменяя высоту падения подвижных частей. Интенсивность ковки, или ее эффективность, как известно, зависит от работы деформации за один удар молота, которая определяется с учетом объема заготовки-поковки, предела прочности металла нагретой заготовки, скорости хода машины и степени деформации металла за один удар.

Эффективность ударного деформирования при ковке и штамповке на молотах определяет КПД ударного деформирования. В условиях работы молота происходит упругопластический удар, в результате которого поковка деформируется пластически и упруго, а ударные массы и детали молота — упруго. Эффективная энергия удара молота $L_э$ расходуется на полезную работу пластического деформирования поковки $A_д$, работу упругой деформации поковки $A_{у.п}$ и деталей молота $A_{у.м}$, на трение в подвижных элементах конструкции молота и штампов (уплотнениях, направляющих, замках и т. п.) $A_т$, смещение центра взаимодействующих масс $A_{с.м}$, нагрев заготовки $A_{н.з}$ и трение на контактных поверхностях заготовки $A_{т.з}$.

В этих условиях необходимо рассматривать КПД ударного деформирования поковки на молотах, сопровождающегося сложными процессами и преобразованиями энергии в элементах конструкции молота. С целью упрощения КПД можно представить следующим образом:

$$\eta_д = \frac{A_д}{L_э} = 1 - \frac{A_{у.п} + A_{у.м} + A_т + A_{с.м} + A_{н.з} + A_{т.з}}{L_э}. \qquad (9)$$

Работа деформирования при осадке рассчитывается следующим образом:

$$A_д = \sigma_т V \ln\frac{H_0}{H}, \qquad (10)$$

где $\sigma_т$ — предел текучести материала заготовки, МПа; V — объем заготовки, м^3; H_0 — начальная высота заготовки, мм; H — конечная высота поковки, мм.

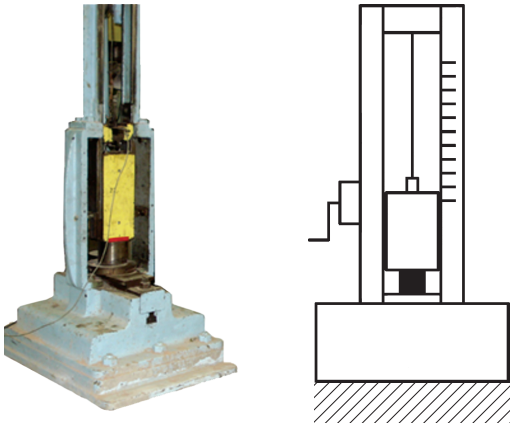
В процессе пластической деформации наблюдается тепловой эффект пластической деформации, выраженный в превращении части потенциальной энергии падающих частей молота во внутреннюю энергию образца. Увеличение внутренней энергии заготовки при нагревании приближенно можно рассчитать по формуле

$$\Delta U = mc\left(T_2 - T_1\right), \qquad (11)$$

где m — масса образца, кг; c — удельная теплоемкость материала образца, Дж/кг·°С; T_2 и T_1 — конечная и начальная температура образца соответственно, °С.

Экспериментальная техника

В ходе проведения лабораторной работы используется молот простого действия (рис. 2), плиты для осадки, штангенциркуль, свинцовый образец, оптический пирометр.



а *б*

Рис. 2. Внешний вид (*а*) и принципиальная схема (*б*) молота простого действия:
1 — стойки копра; *2* — устройство захвата бабы; *3* — устройство подъема бабы; *4* — баба; *5* — заготовка; *6* — нижний боек; *7* — шабот

Технические характеристики молота простого действия

Масса, кг:
бабы 22,3
шабота 540
Предельная высота сбрасывания бабы, м 2
Максимальная теоретическая скорость бабы
при ударе, м/с 6,26

Задание для лабораторной работы

Провести испытание на осадку свинцового образца на молоте простого действия. Рассчитать эффективную энергию молота и работу пластической деформации образца. Определить КПД ударного деформирования образца на молоте простого действия.

Порядок выполнения работы

1. Измерить начальные высоту и диаметр образца.
2. Рассчитать работу, требуемую для пластической деформации образца на относительную степень деформации, равную 0,5.
3. Рассчитать высоту подъема падающих частей молота из условия равенства эффективной энергии удара молота простого действия и требуемой работы пластической деформации.
4. Обезжирить рабочие поверхности бойков и торцы образца и установить образец на нижний боек молота простого действия.
5. Измерить начальную температуру образца с помощью пирометра.
6. Осуществить удар.
7. Измерить температуру образца после удара с помощью пирометра.
8. Измерить конечные высоту и средний диаметр образца и заэскизировать его.
9. Рассчитать фактическую относительную деформацию образца по высоте.
10. Рассчитать фактическую работу пластической деформации образца.

11. Рассчитать часть потенциальной энергии падающих частей молота, которая превратилась во внутреннюю энергию образца.

12. Рассчитать КПД ударного деформирования свинцового образца на молоте простого действия.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается закон сохранения энергии?
2. Что такое консервативная сила?
3. В чем заключается явление диссипации энергии? Приведите примеры диссипативных сил.
4. Что такое осадка?
5. В чем отличие молотов простого действия от молотов двойного действия?
6. На что расходуется эффективная энергия удара молота?

Отчет по лабораторной работе

В отчете приводятся следующие сведения:

1) цель и задачи работы;
2) последовательность проведения работы;
3) эскиз образца;
4) последовательность расчета работы пластической деформации и эффективной энергии удара молота;
5) таблица с исходными и экспериментальными данными;
6) выводы по работе с указанием области применения закона сохранения энергии, потерь энергии при осадке.

Литература

Бочаров Ю.А. Кузнечно-штамповочное оборудование: учебник. М.: Академия, 2008.

Ковка и штамповка: справочник в 4-х т. Т. 2. : Горячая объемная штамповка / под общ. ред. Е.И. Семенова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2010.

Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1977.

Содержание

Предисловие 3
Лабораторная работа № 1. Опытная проверка закона Гука и определение механических свойств металла с помощью испытания на сжатие 4
Лабораторная работа № 2. Исследование работы гидравлического пресса 13
Лабораторная работа № 3. Определение коэффициента трения с помощью осадки кольцевого образца 22
Лабораторная работа № 4. Исследование явления пружинения при гибке листового материала 33
Лабораторная работа № 5. Исследование операции осадки на молоте простого действия 40

Лабораторные работы для обучающихся образовательных организаций, представленные в настоящем сборнике, проводятся на базе кафедры **«Технологии обработки давлением» (МТ-6)** в рамках реализации проекта «Технический лабораторный практикум — школьным инженерным классам».

Кафедра осуществляет подготовку специалистов по специальности «Проектирование технологических машин и комплексов», специализацией которых является «Проектирование технологических комплексов в кузнечно-штамповочном производстве»; бакалавров и магистров по направлению «Машиностроение».

Изучая различные дисциплины, студенты учатся управлять течением металла, последовательно применяя нагрев, деформирование и охлаждение, благодаря этому добиваться специальной структуры материала, а значит, и специальных улучшенных свойств.

Преподавательский состав кафедры включает 6 докторов и 7 кандидатов технических наук.

На кафедре обучаются студенты и аспиранты из Франции, Германии, Китая, Сирии, Казахстана, Украины.

Областью профессиональной деятельности выпускников являются: конструирование машин; проектирование технологических процессов обработки давлением; умение управлять течением металла для получения деталей заданной формы, последовательно применяя нагрев, деформирование, охлаждение; робототехника, системы и средства управления. При участии выпускников создаются мощные прессы и автоматизированные штамповочные комплексы на их основе.

Кафедра сотрудничает с научно-исследовательскими институтами РФ, ведущими отечественными предприятиями, в том числе организациями оборонно-промышленного комплекса (ОПК): ЗАО «Метровагонмаш», МЭЗ ОАО «РЖД», ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королёва, АО «КБточмаш им. А.Э. Нудельмана», ОАО «Тяжпрессмаш», ОАО «КамАЗ-Металлургия», ОАО «ОЭМК», ОАО «НПК «КБМ», ФГУП «ЦНИИХМ», ВНИАА им. Н.Л. Духова, ОАО «АВТОВАЗ», ОАО «ТАГМЕТ», ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА», ОАО «Роствертол», ЗАО «НПО «АВАНГАРД», ОАО «Московский подшипник», ОАО «НПО Энергомаш им. акад. В.П. Глушко», АО «НПЦ газотурбостро-

ения «Салют», ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, ЗАО НПО «Тяжпромарматура», ООО «КванторФорм», ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ, ООО «СКТБ Автогентехмаш», ОАО «ВИЛС», ОАО «Тяжмехпресс», ОАО «Шебекинский машиностроительный завод», ЗАО «КольчугЦветМет», АО АХК «ВНИИМЕТМАШ им. А.И. Целикова», НПП «Звезда», ОАО «Кузнечно-прессовое производство», ОАО «Выксунский металлургический завод», ФГУП «НИМИ», ОАО «Металлургический завод «Электросталь», ОАО «Ступинская металлургическая компания», ГНПП «ТЕМП», ФГУП «НПО «Техномаш», ФКП «НИИ Геодезия», ОАО МКБ «Компас», ФГУП «ФЦДТ «Союз», ОАО«КамАЗ», ОАО «КБАЛ им. Л.Н. Кошкина».

Учебное издание

Алимов Артём Игоревич

Технологии обработки металлов давлением

Редактор *К.А. Осипова*
Художник *Я.М. Ильина*
Корректор *Н.В. Савельева*
Компьютерная верстка *Е.В. Жуковой*

В оформлении использованы шрифты
Студии Артемия Лебедева.

Оригинал-макет подготовлен
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Подписано в печать 12.02.2016. Формат 60×90/16.
Усл. печ. л. 3,25. Тираж 100 экз. (1-й з-д 1–80). Заказ

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
press@bmstu.ru
www.baumanpress.ru

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.