Университет машиностроения

Адрес: 144000, г. Электросталь Московской обл., ул. Первомайская, д.7
Телефон: 8 (496) 574-40-42
E-mail: info@elpol.ru

ЭЛЕКТРОСТАЛЬСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)»

Кафедра "Машиностроительные и металлургические технологии"

Ю.М. Антощенков, И.М. Таупек, А.В. Лисовский

ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА И ПРЕССОВАНИЯ

Лабораторный практикум

Допущено учебно-методическим объединением
по образованию в области металлургии в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям
150106 (110600) – Обработка металлов давления и
150201 (120400) – Машины и технология обработки металлов давлением.

ЭЛЕКТРОСТАЛЬ 2005

УДК 621.16.1

Антощенков Ю.М., Таупек И.М., Лисовский А.В. Теория и технология кузнечно-штамповочного производства и прессования. Лабораторный практикум, 2-ое издание – Электросталь: ЭПИ -филиал Университета машиностроения, 2005. – с.290 с. ил.

Настоящий практикум предназначен для студентов специальности 150106 "Обработка металлов давлением", 150201 “Машины и технология обработки металлов давлением” и состоит из 3-х частей: ковка; прессование; штамповка , которые включают в себя описания 32 лабораторных работ. Практикум составлен в соответствии с программами учебных курсов по теории и технологии ковки, прессования и теории и технологии процессов штамповки.

Описания работ предусматривают использование методов математического планирования эксперимента, статистическую обработку данных, оценку погрешностей с применением ЭВМ.

Разработки и описания лабораторных работ выполнили: проф. А.Г. Кобелев (работы 1-4), проф. В.Н. Щерба (работы 5-7, 18), доц. Л.Б. Ефремов (работы 8,9,16), проф. О.М. Смирнов (работы 10.12), доц. В.П. Троицкий (работы 11,12), доц. В.П. Балакин (работы 14-17). В подготовке работ 10 и 12 принимали участие к.т.н. О.А. Корабельников и м.н.с. В.И. Фролов.

Ряд работ, например, 4,5,7,9,18 и 16, может быть использован студентами смежных специализаций по одноименной дисциплине, поэтому при выборе литературы из рекомендуемого списка следует пользоваться указанием лектора, читающего соответствующий курс.

Содержание

Введение

Лабораторный практикум для студентов специальности 150106, специализирующихся в области кузнечно-штамповочного производства, и 150201 “Машины и технология обработки металлов давлением” подготовлен на базе лабораторных работ, поставленных и проведенных на кафедре ОМД, и новых разработок.

Цель лабораторного практикума состоит в следующем:

1. Закрепление, углубление знаний студентов в области процессов и операций ковки, прессований и штамповки, закономерностей формообразования, причин возникновения и путей устранения дефектов изделий.

2. Формирование у студентов умений и навыков управления технологическими процессами, качеством готовой продукции на основе определения и оптимизации деформационных режимов и энергосиловых параметров процессов с использованием современных методов моделирования, лабораторной и вычислительной техники, статистической обработки экспериментальных данных и планирования эксперимента.

3. Развитие навыков самостоятельной творческой работы на основе внедрения проблемных форм обучения в лабораторный практикум.

Лабораторный практикум предусматривает использование активных методов обучения путем создания проблемных ситуаций, индивидуализации заданий за счет многовариантности работ, сокращения рутинной работы - применение раздаточных материалов в виде бланков протоколов испытаний, осциллограмм, предварительно продеформированных образцов и т.п.

Обработка массивов экспериментальных данных и оценка погрешности измерения осуществляются с помощью ЭВМ и АРМ (автоматизированное рабочее место), а также соответствующей библиотеки программ, имеющихся в лаборатории кафедры.

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.

Проведение лабораторных работ можно осуществить, используя тематический или агрегатный принципы. При использовании тематического принципа занятия проводятся по одной для всех студентов лабораторной работе с выдачей индивидуальных заданий на бригаду из 3-4 студентов. При агрегатном принципе бригады работают на отдельных установках по индивидуальному заданию. Этот метод более удобно применять в случае одновременного выполнения лабораторных работ несколькими бригадами на различных установках.

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

Инструкция и основы техники безопасности

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.

5. При работе на испытательных машинах "Р-5", "ЦНИИТМАШ", 2Z/D 10/90" и "Every" необходимо соблюдать следующие правила:

а) к работе на машинах допускаются лица, прошедшие инструктаж во технике безопасности на данных машинах;

б) лица, работающие на машине, обязаны соблюдать требования настоящей инструкции;

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

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

6. 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.

7. 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.

Порядок подготовки, проведения, оформления и сдачи работ

1. Лабораторные работы выполняются бригадами (для половины группы) в составе 3-4 студентов.

2. К выполнению очередной лабораторной работы допускаются студенты, имеющие конспект теоретической части работы, изучив порядок ее выполнения, показавшие удовлетворительные знания по этим вопросам при опросе. Студенты отчитываются по работе в конце занятия, в начале следующего занятия или на специальном контрольном занятии.

3. Студент, не допущенный к проведению лабораторной работы, от занятий с группой не освобождается, а остается в лаборатории и в это время выполняет ту работу, которую не выполнил в процессе самостоятельной подготовки к занятиям. О проведенной в лаборатории работе студент отчитывается перед преподавателем в конце занятия.

4. Студент, не отчитавшийся по двум предыдущим работам, к дальнейшей работе в лаборатории без разрешения деканата не допускается. Пропущенные студентом лабораторные работы в случае допуска к ним проводятся в дополнительное время.

5. Каждый студент обязан соблюдать следующий порядок работы в лаборатории:

а) контрольный опрос - первые 10-20 мин. (на бригаду - 5-10 мин.);

б) выполнение экспериментальной части работы - 20-30 мин. на бригаду;

в) сдача отчета по предыдущей работе - 20 мин. на бригаду;

г) обработка экспериментальных данных.

6. В отчете по каждой лабораторной работе должны содержаться:

а) изложение теоретической части;

б) краткое изложение последовательности выполнения работы;

в) табличный материал результатов измерений и обработки, графическое представление анализируемых величин;

г) выводы.

7. При оформлении табличного материала каждая таблица должна иметь порядковый номер (справа над таблицей делается надпись, например, таблица 3) и название, которое пишется над таблицей.

8. Графический материал оформляется карандашом или чернилами на миллиметровой бумаге. Все графики или рисунки (эскизы) должны иметь порядковый номер и подрисуночную подпись, раскрывающую содержание представляемого графического материала. На осях абсцисс и ординат указываются шкалы и размерности величин. Все надписи оформляются чертежным шрифтом по ГОСТу. Экспериментально полученные значения выделяются кружком или точкой.

9. Выводы должны содержать:

а) констатирующую часть, в которой отражается освоенная методика, полученный результат;

б) анализ исследуемых зависимостей с указанием причин, вызывающих изменение получаемых величин;

в) анализ точности полученных данных и степени их надежности.

10. Записи должны вестись аккуратно и без сокращений. Все записи, в том числе и вспомогательные расчеты, производятся только в лабораторной тетради. Результаты первичных измерений записываются в тетрадь по ходу выполнения эксперимента.

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

12. Рекомендуется записывать лабораторные работы в тетради форматом 203х288 и иметь планшет с миллиметровой бумагой аналогичного формата. Листы миллиметровой бумаги с графическим материалом необходимо вклеить в тетрадь рядом с таблицей для удобства анализа полученных результатов. При оформлении работы необходимо придерживаться требований ГОСТ 19600-74.

Лабораторная работа 1

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ВЫРЕЗНОГО БОЙКА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ПРОТЯЖКИ

(4 часа)

1.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение особенностей течения металла при протяжке в вырезных бойках; оценка влияния формы бойков на интенсивность протяжки; ознакомление с методикой расчета процесса протяжки в вырезных бойках.

1.2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Протяжку заготовок с круга на круг в плоских бойках не осуществляют из-за появления растягивающих напряжений и возможности трещинообразования в осевой области заготовки. Для этого обычно используют вырезные бойки, которые бывают с круглым вырезом - радиусные или овальные и с угловым вырезом - ромбические бойки. На практике широко применяют также комбинированные бойки: верхний - плоский, нижний - вырезной.

При ковке в ромбических бойках (рис. 1.1) металл обжимается по высоте и течет вдоль выреза, увеличивая длину заготовки, а такие поперек выреза, образуя уширение и частично заполняя углы выреза. Вдоль плоскости выреза действуют силы P и T, причем вблизи разъема бойков горизонтальные составляющие P_X и T_x направлены в одну сторону, обеспечивая боковой подпор металла, а вблизи вершины выреза эти силы направлены в разные стороны, ослабляя боковой подпор.

Ромбические бойки характеризуются углом выреза φ, а также углом γ охвата заготовки с радиусом R_k в сомкнутом положении бойков, характеризующем наименьшее сечение протянутой заготовки (рис. 1.2).

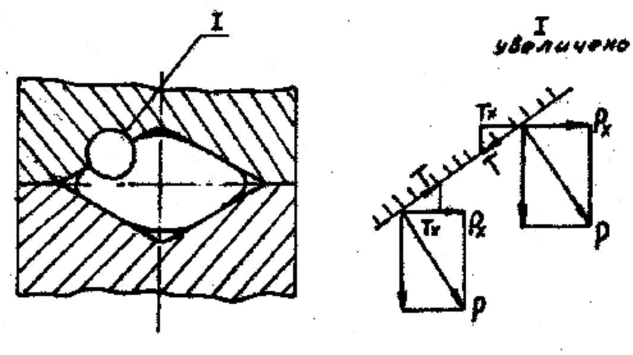


Рис. 1.1. Схема течения металла при протяжке круглых заготовок в вырезных бойках.

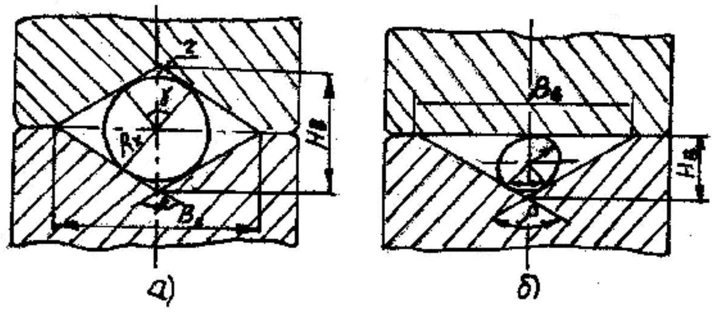


Рис. 1.2. Схема протяжки круглых заготовок в ромбических (а) и комбинированных (б) бойках.

Углы выреза и охвата связаны между собой зависимостью:

$$\varphi + \gamma = 180^o. \quad (1.1)$$

При установлении типа и формы требуемых бойков исходят из интенсивности протяжки, возможности получения схемы ярко выраженного объемного напряжения сжатия, ограничения уширения и т.д. Обычно по диаметру определяют наибольшую ширину выреза B_b. Вырез ромбических бойков на практике обычно выполняют под углом 90; 105; 110; 120; 135°. Глубину выреза $H_в$ ври данной величине B_b. и принятом угле φ определяют из следующей зависимости:

φ, град	90	105	110	120	135
B_B/H_B	1,0	1,3	1,4	1,7	2,4

Максимальная глубина выреза каждого бойка (при r=0) равна:

$$\text{Н}_\text{В} = 2\frac{R_\text{К}}{Sin\frac{\varphi}{2}} = 2\frac{R_\text{К}}{Sin\left(\varphi_B - \frac{\gamma}{2}\right)}. \quad (1.2)$$

Наибольший коэффициент уковки при условии, что радиус исходной заготовки не превышает половины ширины выреза ($R \le 1{,}2B_B$), равен:

$$\text{К}_L = \frac{F_o}{F_\text{К}} = \frac{R_o^2}{R_\text{К}^2} = \frac{\text{Н}_\text{В}^2 tg\frac{\varphi}{2}}{\text{Н}_\text{В}^2 Sin^2\frac{\varphi}{2}} = \frac{1}{Cos^2\frac{\varphi}{2}}. \quad (1.3)$$

Тогда при протяжке заготовок в ромбических бойках с углом выреза 90; 110; 120 и 135° максимальная величина уковки соответственно будет равна 2.0; 3,0; 4,0; 6,9.

Расчет протяжки крупных заготовок в ромбических бойках, разработанный В.Г. Березкиным и Н.П. Клименко, аналогичен расчету протяжки квадратной заготовки под плоскими бойками. При этом в расчете применяют приведенную высоту и ширину сечения заготовки, а также приведенные размеры равновеликих по площади квадратных и прямоугольных сечений после обжатия.

Сторона квадрата, равновеликого круглой исходной заготовке (рис. 1.3):

$$H_o' = B_o' = R_o\sqrt{\pi}. \qquad (1.4)$$

Высоту приведенного прямоугольника, равновеликого сечению заготовки после обжатия, принимают равной высоте квадрата, равновеликого кругу радиусом *r*:

$$H_1' = r\sqrt{\pi}, \qquad (1.5)$$

а ширину прямоугольника:

$$B_1' = \frac{F_1'}{H_1'}, \qquad (1.6)$$

где F_1' – сечение заготовки после обжатия.

Приведенная степень деформации:

$$\varepsilon_{OH}' = 1 - \frac{H}{H_O} = 1 - \frac{r}{R_O} \qquad (1.7)$$

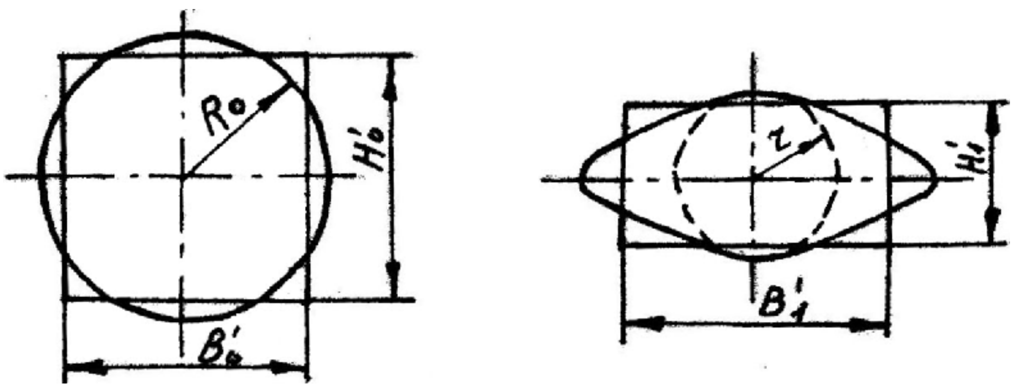


Рис. 1.3. Схема к расчету процесса протяжки заготовок в ромбических бойках.

Коэффициент f можно принять по данным таблицы 1.1.

Таблица 1.1

Коэффициент интенсивности уширения f при протяжке круглой заготовки в вырезных бойках [1]

$\frac{a_О}{В_О}$	Коэффициент f		$\frac{a_О}{В_О}$	Коэффициент f	
	до кантовки	после кантовки		до кантовки	после кантовки
0,2	-0,05	0,15	1,0	0,11	0,33
0,3	-0,02	0,18	1,2	0,14	0,36
0,4	0,01	0,22	1,4	0,16	0,39
0,5	0,02	0,24	1,6	0,20	0,41
0,6	0,04	0,26	1,8	0,23	0,43
0,7	0,06	0,28	2,0	025	0,45
0,8	0,08	0,30	2,5	0,32	0,48

Коэффициент уковки K для протяжки в ромбических бойках можно определить по формуле:

$$К_L = \frac{1}{1 - \varepsilon_{ОН}\left(1 - f\right)}. \qquad (1.8)$$

Для расчета процесса протяжки заготовки в вырезных бойках задаются величиной относительной подачи $\frac{a_O}{В_O}$; относительным обжатием $\varepsilon_{ОН}$ определяют приведенные размеры и коэффициент f .

Протяжку по этим величинам рассчитывают так же, как и протяжку квадратной заготовки на плоских бойках (см. лабораторную работу 3).

1.3. МАТЕРИАЛЫ, ИНСТРУМЕНТ, ОБОРУДОВАНИЕ

Работу выполняют на прессе или универсальной испытательной машине. В качестве инструмента применяют плоские (φ = 180°) и комбинированные бойки: верхний - плоский, нижний - вырезной (φ = 120 и 90°). Достижение необходимой степени обжатия по высоте обеспечивают прокладками.

В качестве исходных заготовок применяют круглые свинцовые образцы диаметром 30 мм и длиной 100 мм. Измерение образцов производят штангенциркулем.

1.4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ И УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

1. Проковать образец на плоских бойках (φ = 180°) с диаметра 30 мм до диаметра 15 мм на длине 60 мм. При ковке образец удерживают клещами за один конец, который остается не деформированным. После каждого прохода образец измеряют и результаты записывают в табл. 1.2.

Режимы обжатий

а) Подача a_0= 15 мм; ΔH = 6 мм. Подачу образца под бойки осуществляют по разметке.

б) Кантовка образца на 90° и ковка деформированной части по режимам (а).

в) Подача a_0 =12 мм; ΔH = 5 мм.

г) Кантовка на 90° и ковка деформированной части по тем же режимам (в).

д) Подача a_0= 9 мм; ΔH = 4 мм.

е) Кантовка на 90° и ковка деформированной части по тем же режимам (д).

ж) Кругление на диаметр 15 мм, подача a_0 = 9 мм. Кругление осуществлять до получения многогранного сечения, близкого к круглому.

2. Проковать образец на длине 60 мм в комбинированных бойках: верхний - плоский, нижний - вырезной (φ = 120°).

Режимы обжатий

а) Подача a_0 = 15 мм; ΔH = 7 мм. Величину ΔH устанавливают следующим образом: поместить образец в вырезной боек и установить закрытую высоту пресса так, чтобы верхний боек касался образца. После снятия образца установленную закрытую высоту уменьшить на величину ΔH .

б) Кругление (3-4 кантовки). Кантовку производят на такой угол, чтобы ребро, образующееся на стыке плоскости от верхнего бойка и цилиндрической поверхности, приходилось на середину бойка (рис. 1.4).

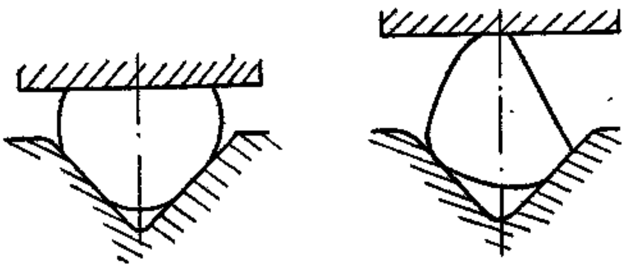


Рис. 1.4. Схема кантовки образца при протяжке в комбинированных бойках.

в) Подача a_0 = 12 мм; ΔH = 6 мм.

г) Кругление (3-4 кантовки).

д) Подача a_0 =9 мм; ΔH = 4мм.

е) Окончательное кругление.

3. Проковать образец на длине 60 мм в комбинированных бойках: верхний - плоский, нижний - вырезной (φ =90°). Режимы обжатий (см. п. 2).

4. Эксперименты по ковке проводиться в строгом соответствии с "Инструкцией по технике безопасности".

1.5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. После каждого прохода измеряют размеры протянутых заготовок.
2. Подсчитывают число обжатий по переходам (проходам).
3. Экспериментальные данные заносят в табл.1.2.

Таблица 1.2

Результаты исследования влияния формы бойков на интенсивность вытяжки

Исходные размеры образцов, мм.		Угол выреза φ, град	Подача a_o, мм.	Размеры после проходов и круглений, мм		Число обжатий, n	Примечание
D_o	L_0			D	L		
		180	15				
			12				
			9				
		120	15				
			12				
			9				
		90	15				
			12				
			9				

4. Построить графические зависимости: $L = F(\varphi)$, $h = F(\varphi)$.

1.6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:
1. Краткое описание теоретической части работы.
2. Цель и методику проведения работы.
3. Полученные графические зависимости.
4. Результаты обсуждения экспериментальных данных.
5. Выводы по работе.

1.7. ЛИТЕРАТУРА

Охрименко Я.М. Технология кузнечно-штамповочного производства. - М.: Машиностроение, 1976, С. 170-182.

1.8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каков характер течения металла при ковке в вырезных бойках?
2. Какими параметрами характеризуются ромбические бойки?
3. Как определяется коэффициент у ковки при протяжке в вырезных бойках?
4. Почему при использовании комбинированных бойков возрастает величина коэффициента уковки?
5. Какова методика расчета процесса протяжки заготовок в ромбических бойках?
6. Какова методика проведения данной работы?
7. Как влияет величина выреза бойков на интенсивность вытяжки?

Лабораторная работа 2

ИЗУЧЕНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ЗАГОТОВКИ ПРИ ОСАДКЕ КОЛЬЦАМИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

(2 часа)

2.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение кинематики формоизменения заготовки с различным отношением исходных размеров и определение усилия деформирования.

2.2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Осадка кольцами осуществляется с помощью двух плоскопараллельных плит, из которых одна или две имеют отверстия (рис. 2.1)

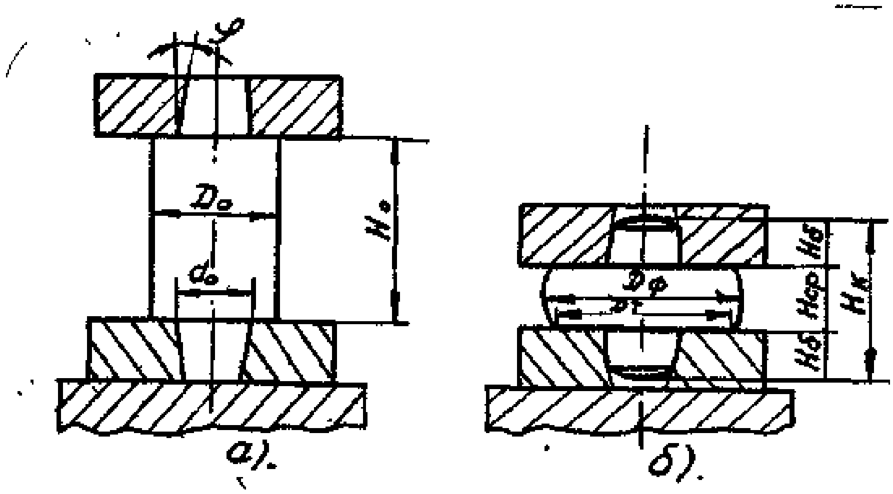


Рис. 2.1. Схема осадки кольцами в начале (а) и конце (б) процесса.

Простота изготовления плит и их невысокая стоимость позволяют успешно применять эту операцию при изготовлении поковок в виде тел вращения типа коротких кулачковых валов, шестерен и дисков, имеющих относительно габаритных размеров поковки невысокие одно- или двусторонние ступицы (бобышки), получение которых свободной ковкой затруднительно или невозможно (например, вследствие их малой высоты).

На характер формоизменения при осадке цилиндрических заготовок в подкладных кольцах и на соотношение объемов металла, смещаемых в отверстия и фланец, влияют:

- отношение исходных размеров заготовки $\frac{D_O}{H_O}$;

- степень деформации $\varepsilon_{ОН}$, которую можно принять равной

$$\varepsilon_{ОН} = \frac{H_O - H_{ср}}{H_O}; \qquad (2.1)$$

- отношение диаметра отверстий к начальному диаметру заготовки;
- величина радиуса закругления входной кромки отверстий в плите;
- угол наклона отверстий φ;
- условия на контактных поверхностях заготовка-инструмент;
- скорость деформирования и другие факторы.

Схема течения металла в процессе осадки кольцами отличается от схемы течения при обычной осадке наличием двух потоков (рис. 2.2). Радиальное течение металла от оси аналогично течению при осадке плоскими плитами и тормозится силами трения T_1, действующих на поверхности контакта осадочной плиты с заготовкой. Второй поток металла, направленный противоположно первому, перемещается радиально к оси заготовки и вдоль нее в отверстия плит и тормозится силами трения T_2. При этом радиальное смещение первого потока металла к периферии дает приращение радиуса фланца, а второй поток к центру - приращение высоты бобышек (ступиц).

Между этими потоками металла находится поверхность их раздела, называемая критической поверхностью. Эта поверхность характеризуется критической высотой - $H_{кр}$ и критическим диаметром - $D_{кр}$. В процессе осадки поверхность раздела макропотоков постоянно изменяется и зависит от величин: $\varepsilon_{ОН}, \frac{D_О}{H_О}, \frac{d_О}{D_О}$ и др.

Процесс формоизменения при осадке кольцами условно можно разделить на три стадии (см. рис. 2.2):

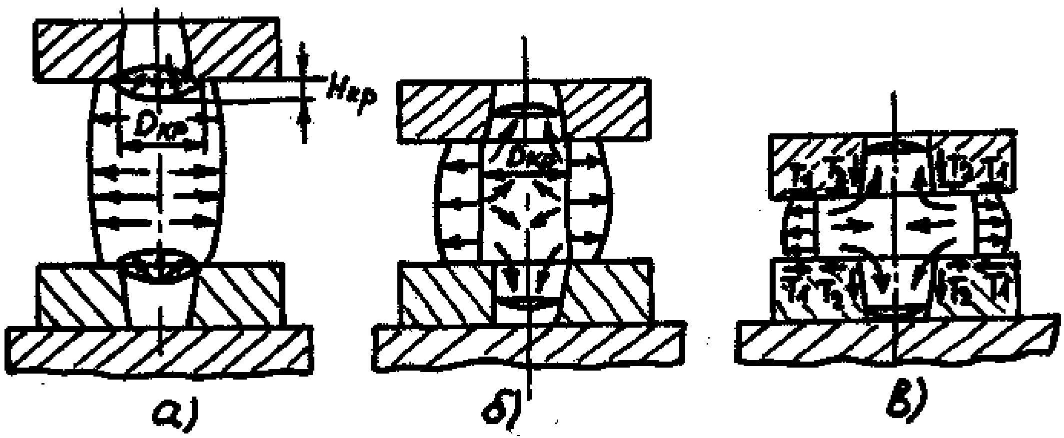


Рис. 2.2. Течение металла в процессе осадки кольцами.

1. На первой стадии суммарная высота бобышки и фланца $H_к$ непрерывно уменьшается, т.е. $H_к < H_0$, при этом часть металла из центрального участка, ограниченного $H_{кр}$ и $D_{кр}$ (см. рис. 2.2.а), течет в отверстия плит, а остальной металл перемещается в радиальном направлении к периферии в диск, образуя фланец. В начале осадки $D_{кр} = d_о$.

2. С увеличением степени деформации с некоторого момента высота поковки $H_к$ начинает возрастать и достигает величины исходной высоты заготовки, т.е. $H_k = H_0$. При этом $H_{кр}$ и $D_{кр}$ увеличиваются; когда критическая высота $H_{кр}$ будет равна $\frac{1}{2}H_{ср}$, положение поверхности раздела потоков металла определяется только величиной $D_{кр}$ (см. рис. 2.2.б). На этой стадии формоизменения увеличивается объем центрального участка, из которого металл течет в отверстия плит, и уменьшается объем металла, перемещавшегося в радиальном направлении к периферии.

3. Суммарная высота поковки растет, превышая начальную высоту заготовки, т.е. $H_к > H_0$. При этом большая часть металла смещается от периферии к центру и затем в отверстия плит, увеличивая высоту бобышек (см. рис. 2.2.в).

Сложный характер формоизменения при осадке кольцами затрудняет определение размеров исходной заготовки, необходимых для получения заданных размеров поковки.

Удельное усилие при осадке кольцами можно определить по формуле:

$$p_{уд} = \sigma_s \left(1 + \frac{\mu D_{ср}}{3H_{ср}}\right), \tag{2.2}$$

а величину полного усилия:

$$P = p_{уд} \frac{\pi \left(D_{ср}^2 - d_O^2\right)}{4}, \tag{2.3}$$

где σ_s - предел текучести материала, для свинца σ_s = 15-20 МПа;

μ - коэффициент трения между образцом и кольцами;

$D_{ср}$, - средний диаметр заготовки при осадке.

$$D_{ср} = \frac{D_ф + D_Т}{2}, \tag{2.4}$$

где $D_ф$ - максимальный диаметр фланца;

D_T - диаметр торца (см.рис. 2.1б);

$H_{ср}$ - высота фланца;

d_o - диаметр отверстия.

2.3. МАТЕРИАЛЫ, ИНСТРУМЕНТ, ОБОРУДОВАНИЕ

Работу выполняют на универсальной испытательной машине или прессе. В качестве исходных заготовок используют свинцовые образцы одинакового диаметра и разной высоты (с различным отношением D_o/H_o). В качестве инструмента применяют подкладные кольца со шлифованной поверхностью. Необходимые измерения производят штангенциркулем.

2.4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ И УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

1. Определяют исходные размеры образцов и подсчитывает отношение D_o/H_o.
2. Устанавливают образец в специальное приспособление строго по оси последнего. Переносят сборку на стол пресса или машины.
3. Производят поэтапную осадку образцов с различным отношением D_o/H_o до степени деформации, равной 0,2; 0,4; 0,6 и 0,8. Величину осадки при этом контролируют по ходографу пресса (машины).
4. В процессе деформации фиксируют максимальное усилие осадки $P_{эксп}$.
5. Производят измерение размеров осаженных на разную степень деформации образцов - $H_к$; $H_{ср}$; $H_б$; D_T; $D_ф$.
6. Заносят исходные и экспериментальные данные в табл. 2.1.

7. Эксперимент осуществляют в полном соответствии с "Инструкцией по технике безопасности".

2.5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Рассчитывают по формулам (2.2) и (2.3) удельное и полное усилия осадки.

2. Подсчитывают по экспериментальным данным отношения $\frac{H_{\sigma}}{H_O}, \frac{H_K}{H_O}, \frac{D_{ф}}{d_O}$.

3. Строят графические зависимости $\frac{H_{б}}{H_O}, \frac{H_K}{H_O}, \frac{D_{ф}}{d_O}, P_{эксп}, P$ от величины показателя степени деформации $\varepsilon_{он}$.

Таблица 2.1

Результаты исследования формоизменения заготовки в процессе осадки кольцами

Исходные данные		Экспериментальные данные												Расчетные данные		Примечание
$\frac{D_O}{d_O}$	$\frac{D_O}{H_O}$	$\varepsilon_{он}$, %	$P_{эксп}$, МПа	Высота, мм			Диаметр, мм			$\frac{H_K}{H_O}$	$\frac{H_{б}}{H_O}$	$\frac{D_{ф}}{d_O}$	$\frac{P_{эксп}}{H_{к}}$	$p_{уд}$, МПа	P, МПа	
				H_K	$H_{ср}$	$H_{б}$	$D_{ф}$	$D_{т}$	$D_{ср}$							

2.6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

1. Краткое описание теоретической части работы.
2. Цель и методику проведения опытов.
3. Расчетную часть.
4. Полученные графические зависимости.
5. Обсуждение результатов опыта.
6. Выводы по работе.

2.7. ЛИТЕРАТУРА

Охрименко Я.М. Технология кузнечно-штамповочного производства. М.: Машиностроение, 1976, С. 149-150.

2.8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы особенности осадки заготовок в подкладных кольцах по сравнению со свободной осадкой плоскими плитами?
2. Какие факторы влияют на характер формоизменения заготовки при осадке кольцами?
3. На какие стадии можно разделить процесс формоизменения заготовки при осадке кольцами?
4. Что такое критическая поверхность, какими параметрами она характеризуется?
5. Как изменяется в процессе деформации поверхность раздела потоков металла?
6. Как рассчитывают удельное и полное усилия осадки заготовки кольцами?
7. В каких случаях применяют процесс осадки заготовки в подкладных кольцах?

Лабораторная работа 3

ВЛИЯНИЕ ПОДАЧИ НА УДЛИНЕНИЕ И УШИРЕНИЕ ПРИ ПРОТЯЖКЕ

(2 часа)

3.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение особенностей течения металла при кузнечной протяжке (вытяжке); оценка влияния относительной подачи на удлинение и уширение при протяжке; ознакомление с методикой расчета технологического процесса протяжки.

3.2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Протяжка (вытяжка) - технологическая операция, в результате которой происходит увеличение длины заготовки за счет уменьшения ее поперечного сечения. Протяжка является одной из основных операций при ковке слитков и заготовок, а также применяется как заготовительная операция при молотовой штамповке. Основным деформирующим инструментом для протяжки являются бойки (плоские, вырезные и комбинированные).

Протяжку осуществляют последовательными единичными обжатиями с подачей заготовки вдоль ее оси на величину a_o и поворотом (кантовкой) ее вокруг этой оси (рис. 3.1).

При обжатии высота заготовки уменьшается, а длина и ширина ее - увеличиваются. При этом главной наибольшей деформацией каждого единичного обжатия является высотная, которая по абсолютной величине больше, чем величина деформаций в направлении протяжки и в направлении уширения. Однако смежное расположение обжатий при протяжке вдоль одного направления приводит к суммированию деформаций вдоль оси заготовки, поэтому в конце процесса эта деформация во много раз превышает деформации по двум другим осям.

Удлинение и уширение при протяжке характеризуются соответствующими коэффициентами:

- удлинения $\mu = \dfrac{L_К}{L_О}$;

- уширение $\beta = \dfrac{В_{ср}}{В_О}$, (3.1)

где L_o, B_o - исходные длина и ширина заготовки;

$B_{ср}$ – средняя ширина протянутой заготовки;

$L_К$ – конечная длина заготовки.

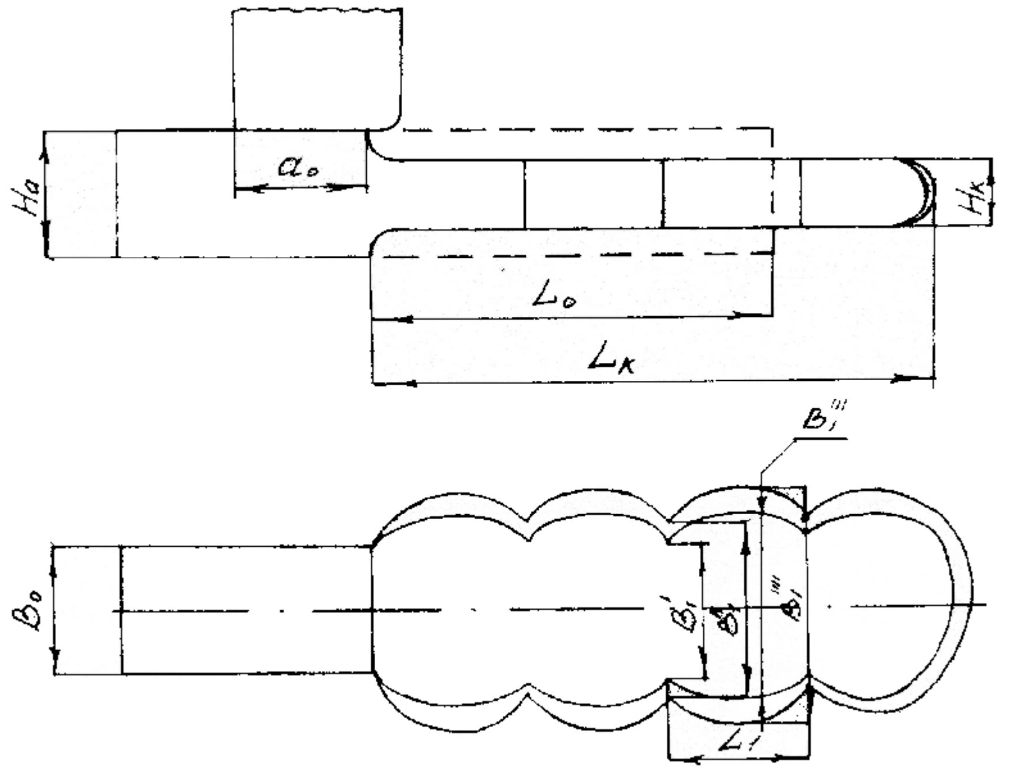


Рис. 3.1. Схема протяжки плоскими бойками.

Соотношение между продольной и поперечной деформациями при протяжке зависит от исходных размеров заготовки, степени деформации, величины относительной подачи, равной отношению $\frac{a_О}{В_О}$; контактных условий и других факторов. Для увеличения производительности процесса величину подачи следовало бы принимать максимально возможной, однако с ее увеличением возрастает уширение, снижающее интенсивность вытяжки (рис. 3.2). С другой стороны, при протяжке с небольшими подачами процесс увеличения длины заготовки протекает более интенсивно, но при этом увеличивается число обжатий, т.е. снижается производительность ковки.

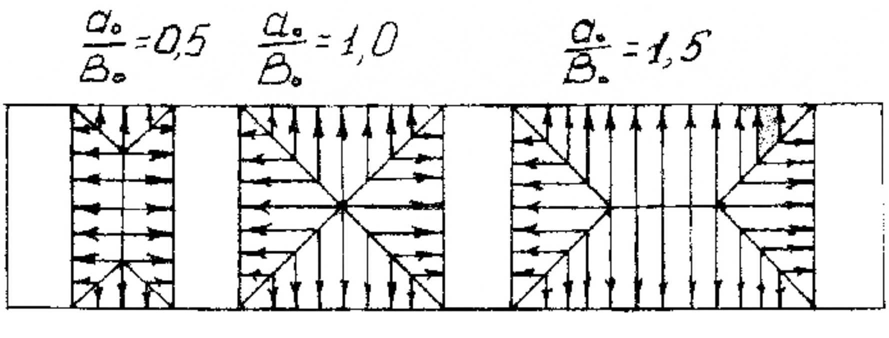


Рис. 3.2. Схема течения металла при протяжке с разной величиной относительной подачи.

Обычно на практике величину относительной подачи принимают равной 0,4-0,7.

Количественное ограничение протяжки обусловлено опасностью потери устойчивости заготовки при очередном обжатии после кантовки.

Поэтому необходимо, чтобы коэффициент перехода η, равный отношению ширины обжатой заготовки к ее высоте, был в пределах

$$\eta = \frac{B_O + \Delta B}{H - \Delta H} \le 2{,}5. \qquad (3.2)$$

В расчетах формоизменения заготовки при протяжке использует также коэффициент интенсивности уширения *f*, характеризующий долю относительной деформации уширения от относительной высотной деформации:

$$f = \frac{\varepsilon_{\text{ОВ}}}{\varepsilon_{\text{КН}}} \le 1. \qquad (3.3)$$

и коэффициент интенсивности удлинения *q*, характеризующий долю относительной деформации удлинения от относительной высотной деформации:

$$q = \frac{\varepsilon_{\text{О}L}}{\varepsilon_{\text{КН}}} \le 1. \qquad (3.4)$$

Оба эти коэффициента связаны между собой соотношением:

$$q + fK_L = 1, \qquad (3.5)$$

где K_L, - коэффициент уковки.

Так как величина $K_L > 1$, то сумма $f + q. < I$. Для заготовки квадратного сечения коэффициент *f* можно определить (по В.Г. Березкину) по эмпирической формуле:

$$f = 1{,}1\sqrt[4]{\frac{a_{\text{О}}}{\text{В}_{\text{О}}}} - 0{,}74. \qquad (3.6)$$

Зная величину *f* и задаваясь степенью обжатия ε_o , можно подсчитать коэффициент уковки K_L, равный

$$\text{K}_L = \frac{1}{1 - \varepsilon_{\text{ОН}}\left(1 - f\right)}. \qquad (3.7)$$

Затем определяют площадь сечения и длину протянутой заготовки:

$$F_{\text{К}} = \frac{F_{\text{О}}}{F_{\text{К}}}; \qquad L_{\text{К}} = \text{K}_L \cdot L_{\text{О}}. \qquad (3.8)$$

Средняя ширина заготовки после прохода равна:

$$\text{В}_{cp} = \frac{F_{\text{К}}}{\text{Н}}. \qquad (3.9)$$

При полном расчете операции протяжки определяют размеры заготовки после первого прохода и подсчитывают число обжатий делением длины протягиваемой части заготовки на величину подачи. После первой кантовки, приняв полученные после первого прохода размеры заготовки за исходные, повторяют расчет, т.е. определяют размеры сечения, число обжимов и длину заготовки после второго прохода. Расчет повторяют до тех пор, пока не будут получены необходимые конечные размеры квадрата или полосы. Затем подсчитывают общее количество проходов, суммарный уков и общее количество обжимов. Последнее, с учетом правочных и отделочных обжимов, обычно увеличивают на 30-50 %.

Возможно решать и обратную задачу, когда по известным размерам поковки и заданному коэффициенту уковки находят исходные размеры заготовки.

3.3. МАТЕРИАЛЫ, ИНСТРУМЕНТ, ОБОРУДОВАНИЕ

Работу выполняют на прессе или универсальной испытательной машине. В качестве инструмента применяют плоские бойки. Достижение необходимой степени обжатия по высоте обеспечивают прокладками.

В качестве исходных заготовок применяют свинцовые образцы квадратного сечения 22x22 мм и длиной 150 мм.

Измерение образцов производят штангенциркулем.

3.4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ И УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

1. До проведения экспериментов самостоятельно, задаваясь исходными размерами заготовки для протяжки, равными 22x22x132 мм; величиной относительной подачи $\frac{a_O}{B_O} =$ 0,5; 1,0 и 1,5; степенью обжатия ε_{OH} = 25 и 50 % , по формулам (3.6 - 3.9) рассчитывают длину L_K и среднюю ширину B_{cp} протянутой заготовки.

2. По формулам (3.1) рассчитывают коэффициенты μ_p; β_p.

3. Расчетные величины записывают в таблицу 3.1.

4. Штангенциркулем измеряют исходные размеры заготовки и, задаваясь величиной $\frac{a_O}{B_O} = 0{,}5$; 1,0 и 1,5, размечают образцы на длине 132 мм, нанося соответствующие риски.

5. Производят протяжку заготовок плоскими бойками с относительными обжатиями ε_{OH}, равными 50 и 25 %, и подачей заготовки вперед по рискам, совмещая их с передним ребром нижнего бойка.

6. Эксперименты осуществляют в полном соответствии с "Инструкцией по технике безопасности".

3.5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Измеряют размеры протянутых заготовок, определяя величины *Нк, Lк*, а также ширину заготовки B_1^i в разных сечениях в соответствии с рис. 3.1.

2. Вычисляют $B_{cp} = \frac{B_1^{\backslash} + B_1^{\backslash\backslash} + B_1^{\backslash\backslash\backslash} + B_1^{\backslash\backslash\backslash\backslash}}{4}$.

3. По формулам (3.1), подставляя экспериментальные величины B_{cp} и $L_к$, опреде-

ляют коэффициенты $\mu_р$ $\beta_р$.

4. Экспериментальные данные заносят в таблицу 3.1.

Таблица 3.1

Результаты исследования процесса протяжки прямоугольных заготовок

$\varepsilon_{ОН}$ %	$\frac{a_О}{В_О}$	Расчетные данные								Экспериментальные данные					Примечание
		F	Q	K_L	$L_К$ мм	$В_{СР}$ мм	$F_К$ мм^2	$\mu_р$	$\beta_р$	$Н_К$ мм	$L_К$ мм	$В_{СР}$ мм	$\mu_р$	$\beta_р$	
50	0,5														
	1,0														
	1,5														
25	0,5														
	1,0														
	1,5														

5. По экспериментальным и расчетным данным строят графические зависимости $К_L; f; \mu_э; \beta_Э = \varphi\left(\frac{a_О}{В_О}\right)$.

3.6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

1. Краткое описание теоретической части работы.
2. Цель и методику проведения работы.
3. Расчетную часть.
4. Эскиз деформированной заготовки.
5. Полученные графические зависимости.
6. Результаты обсуждения расчетных и экспериментальных данных.
7. Выводы по работе.

3.7. ЛИТЕРАТУРА

Охрименко Я.М. Технология кузнечно-штамповочного производства. - М.: Машиностроение, 1976. С. 154-17-0.

3.8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем отличается процесс протяжки заготовок от процесса осадки?
2. Как влияет величина относительной подачи на течение металла при протяжке?
3. Что такое коэффициенты интенсивности удлинения и уширения, в чем их физический смысл?
4. Каковы количественные ограничения протяжки?
5. Какова методика расчета технологического процесса протяжки?
6. Как связаны между собой коэффициенты q и f?
7. Как влияет величина относительной подачи на коэффициенты μ и β?
8. Какова методика проведения данной работы?

Лабораторная работа 4

ИЗУЧЕНИЕ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ОТКРЫТОЙ ПРОШИВКЕ

(2 часа)

4.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение течения металла и искажения формы исходной заготовки при открытой прошивке; определение усилия прошивки и ознакомление с методикой расчета технологического процесса.

4.2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Прошивка - кузнечная операция для получения в заготовках глухих или сквозных полостей. Различают открытую прошивку (рис. 4.1а), при которой боковая поверхность заготовки свободно деформируется, и закрытую (рис. 4.1б), при которой деформирование заготовки производят в контейнере (матрице), внутренние размеры которых определяют наружные размеры прошитой поковки.

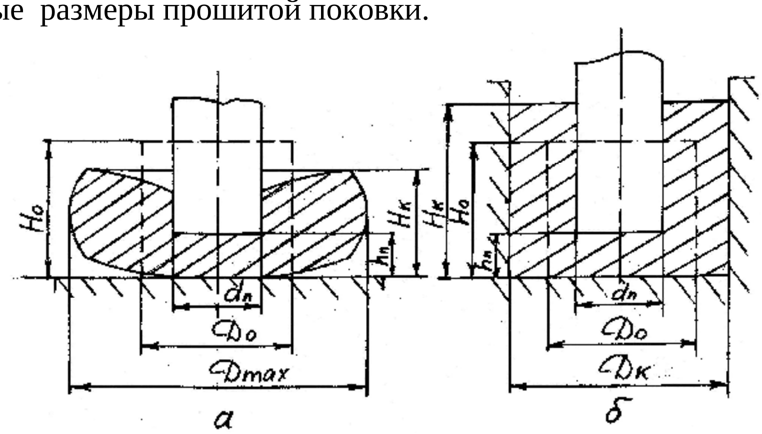


Рис. 4.1. Характер изменения формы заготовки при открытой (а) и закрытой (б) прошивке.

Прошивку применяют как при ковке поковок на гидравлических прессах и ковочных молотах, так и при объемной штамповке поковок на штамповочных молотах, прессах и ГКМ.

В процессе открытой прошивки при внедрении в заготовку прошивня образуется полость, а исходная форма заготовки искажается. Искажение формы и размеров заготовки при прошивке зависит от ее исходных размеров, размеров прошивня и глубины его внедрения в заготовку. Процесс формоизменения заготовки при прошивке характеризуется бочкообразованием боковой поверхности, образованием вогнутости на торце заготовки со стороны прошивня и выпуклости - на нижнем торце.

Наиболее существенное влияние на характер изменения формы и размеров прошиваемой заготовки оказывает отношение диаметра исходной заготовки D_o к диаметру прошивня d_n. При этом наиболее интенсивное искажение формы наблюдается при соотношениях $\frac{D_{\text{O}}}{d_n} \succ 2$. При отношении $\frac{D_{\text{O}}}{d_n} \succ 5$ процесс прошивки приближается к процессу вдавливания пуансона в тело неограниченных размеров. Поэтому на практике в технологических процессах изготовления поковок свободной ковкой открытую прошивку применяют при отношениях в пределах $2 \prec \frac{D_{\text{O}}}{d_n} \prec 5$.

В начале операции прошивки высота заготовки несколько уменьшается, и осадка происходит до тех пор, пока отношение диаметра осаживаемой заготовки к ее текущей высоте не достигнет определенной величины, зависящей от соотношений $\frac{D_{\text{O}}}{\text{H}_{\text{O}}}$; $\frac{D_{\text{O}}}{d_n}$.

При этом, чем меньше отношение $\frac{D_{\text{O}}}{\text{H}_{\text{O}}}$; $\frac{D_{\text{O}}}{d_n}$, тем больше величина предварительной осадки до того момента, как начнется собственно прошивка. В определенный момент процесса уменьшение высоты заготовки прекратится, в течение некоторого времени она будет оставаться неизменной, а затем начнет несколько увеличиваться.

Изменение высоты заготовки в процессе ее прошивки можно подсчитать по формуле

$$\lg\frac{\text{H}_{\text{O}}}{\text{H}} = 0{,}25\lg\frac{\left(\frac{D_{\text{O}}}{d_n}\right)^2\frac{\text{H}_{\text{O}}}{h_n} - 1}{\left[\left(\frac{D_{\text{O}}}{d_n}\right)^2 - 1\right]\frac{\text{H}_{\text{O}}}{h_n}}, \tag{4.1}$$

где H_o и D_o - высота и диаметр исходной заготовки;

d_n - диаметр прошивня;

H - высота прошиваемой заготовки в данный момент;

h_n - высота непрошитой части заготовки в данный момент.

Максимальный диаметр прошитой заготовки приближенно можно подсчитать по формуле

$$D_{\max} = d_n\sqrt{1{,}5\left[\left(\frac{D_{\text{O}}}{d_n}\right)^2\frac{\text{H}_{\text{O}}}{\text{H}} - \frac{h_n}{\text{H}} + 1\right] - 0{,}6\left(\frac{D_{\text{O}}}{d_n}\right)^2}. \tag{4.2}$$

Удельное усилие при открытой прошивке можно определить по формуле:

$$p_p = \sigma_s\left(1{,}5 + 1{,}1\ln\frac{D_{\text{O}}}{d_n}\right), \tag{4.3}$$

где 6_s - предел текучести прошиваемого материала. Для свинца 6_s =15-20 МПа.

Полное усилие при открытой прошивке:

$$P_p = p_p\frac{\pi d_n^2}{4}. \tag{4.4}$$

4.3. МАТЕРИАЛЫ, ИНСТРУМЕНТ, ОБОРУДОВАНИЕ

Работу выполняют на прессе или универсальной испытательной машине. В качестве исходных заготовок используют свинцовые образцы диаметром 50 мм и высотой 50 мм, в качестве инструмента - прошивни диаметром 15, 25, и 35 мм. Измерение размеров образцов производят штангенциркулем.

4.4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ И УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

1. До проведения экспериментов самостоятельно рассчитать по формулам (4.1 - 4.2) изменение высоты H и диаметра D_{max} прошиваемой заготовки размером D_O= 50 мм; H_o = 50 мм при диаметре прошивня dn= 15; 25 и 35 мм и высоте непрошитой части заготовки h_n= 40; 30; 20; 10 мм.

2. По формулам (4.3 - 4.4) подсчитать удельное и полное усилия открытой прошивки при D_0= 50 мм и d_n = 15; 25 и 35 мм.

3. Расчетные параметры заготовки H, D_{max} и процесса p_p, Pp занести в табл. 4.1.

4. Измерить штангенциркулем исходные размеры образцов и размеры прошивня.

5. Произвести прошивку образцов прошивнем, установленным строго по оси образца. При этом процесс прервать в момент получения величины h_n = 40; 30; 20 и 10 мм и зафиксировать усилие прошивки.

6. Произвести измерение размеров прошиваемых образцов с определением величин H_K, h_n, D_{max}.

7. Все эксперименты по прошивке осуществляют при строгом соблюдении требований "Инструкции по технике безопасности".

4.5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Экспериментальные данные заносят в таблицу 4.1.

2. По экспериментальным данным построить графические зависимости высоты заготовки, ее максимального диаметра и усилия прошивки от диаметра прошивня, а также от глубины полости H, h_n.

Таблица 4.1

Расчетные и экспериментальные данные исследования процесса открытой прошивки

d_n, мм	Расчетные данные					Эксперимент			Примечание
	h_n, мм	H, мм	D_{max}, мм	P_p, МПа	p_p, МПа	H, мм	D_{max}, мм	$P_э$, Мпа	
1									
2									

4.6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

1. Краткое описание теоретической части.
2. Цель и методику выполнения работы.
3. Расчетную часть.
4. Эскизы прошитых заготовок.
5. Графические зависимости.
6. Результат обсуждения полученных данных.
7. Выводы по работе.

4.7. ЛИТЕРАТУРА

Охрименко Я.М. Технология кузнечно-штамповочного производства. - М.: Машиностроение, 1976. С. 189-193.

4.8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое прошивка и где она применяется?
2. Какие параметры процесса влияют на искажение формы и размеров заготовки при открытой прошивке?
3. Как изменяется высота заготовки в процессе прошивки в зависимости от диаметра прошивня?
4. Какова методика проведения работы?
5. Как рассчитать удельное и полное усилия при открытой прошивке?
6. Особенности течения металла при открытой и закрытой прошивке.

Лабораторная работа 5

НАПРЯЖЕНИЯ И УСИЛИЯ ПРИ ОСАДКЕ

(2 часа)

5.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Закрепить знания по изучению влияния контактного трения и относительных размеров осаживаемого тела на величину удельных усилий и их распределение по контактной поверхности при свободной осадке.

5.2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

При свободной осадке в результате взаимодействия поверхности инструмента и деформированного металла возникают силы контактного трения, препятствующие радиальному перемещению приконтактных слоев металла. Эти силы трения максимальны вблизи контактной поверхности и уменьшаются к середине высоты цилиндрического образца (рис. 5.1,а). В результате действия сил контактного трения в приконтактных зонах 1, называемых зонами затрудненной деформации, возникает разновыраженное напряженное состояние всестороннего сжатия (рис. 5.1). Эта зона как бы расклинивает находящуюся между ними зону 2, зону локализованной деформации, в которой под действием вертикальных сжимающих напряжений σ_z и незначительных по величине радиальных напряжений σ_r возникают максимальные касательные напряжения под углом 45° к оси осадки сжатая (рис. 5.1). Внутренняя зона 2 при своей деформации в радиальном направлении воздействует на зону 3 и вызывает в ней растягивающие напряжения σ_θ, которые могут достигать значительной величины и вызывать на поверхности осаживаемых образцов поверхностные трещины.

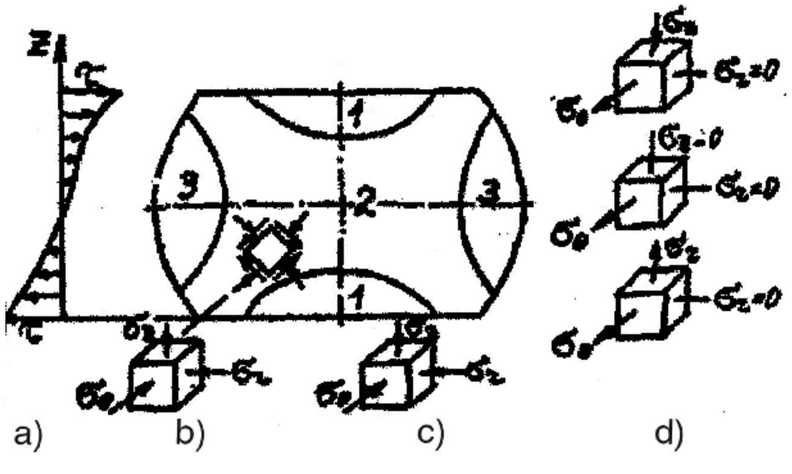


Рис. 5.1. Схемы действующих напряжений в объеме осаживаемого образца: а - эпюра касательных напряжений по оси образца; б - всестороннего сжатия в зоне затрудненной деформации; в - максимальных касательных напряжений в зоне локализованной деформации; г - растягивающих окружных напряжений в кольцевой зоне.

В общем случае при осадке предельно высокой заготовки различают три стадии (рис. 5.2).

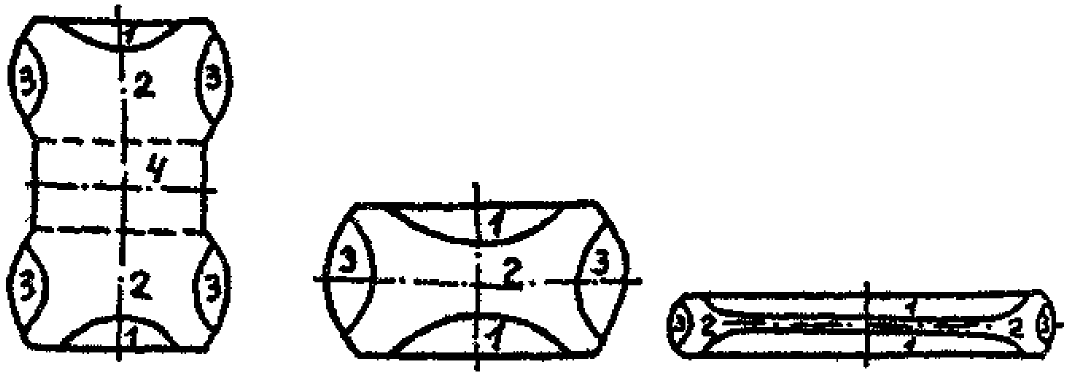


Рис. 5.2. Расположение зон в объеме осаживаемого образца.

На первой стадии (при $\frac{D}{H}$<0,4-0,5) осадка проходит с двойным бочкообразованием, при этом, чем больше величина контактных сил трения, тем резче эффект бочкообразования и тем раньше происходит слияние двух бочкообразований в общее. Это объясняется тем, что при значительной величине сил трения зоны затрудненной деформации имеют большие объем и высоту купола.

Вторая стадия осадки проходит при непрерывном сближении зон затрудненной деформации до момента их взаимодействия при $\frac{D}{H} \leq$ 2-4, при этом чем больше контактные силы трения, тем при меньших значениях $\frac{D}{H}$ проходит контакт этих зон.

На первой и второй стадиях осадки вследствие приращения площади контакта высота и диаметр зоны затрудненной деформации увеличиваются. Усилие на этих стадиях тем меньше, чем больше контактные силы трения, т.е. чем больше объем и высота купола зон затрудненной деформации.

На третьей стадии ($\frac{D}{H} = 2-4$) высота зон затрудненной деформации вследствие их взаимодействия уменьшается (т.к. высота этих зон всегда меньше $\frac{\mathrm{H}}{2}$), что сопровождается резким повышением силы деформирования. Следует заметить, что на этой стадии сила деформирования тем больше, чем больше силы трения на контактной поверхности инструмента с заготовкой.

Таким образом, величина контактного трения, а также абсолютные и относительные размеры деформируемого тела оказывают существенное влияние на величину силы осадки и контактных напряжений.

На величину контактного трения при пластическом деформировании влияет ряд факторов, к числу которых относят: химический состав обрабатываемого материала и состояние его поверхности, температуру, степень и скорость деформации, схему напряженного состояния металла при деформации, состояние поверхности инструмента, т.е. направление механической обработки относительно направления главных положительных деформаций при осадке, шероховатость, наличие или отсутствие технологической смазки и её характеристики и др.

Контактное трение при пластической деформации является одной из причин неравномерного распределения удельного усилия по контактной поверхности. При открытой осадке распределение удельной силы деформирования на поверхности контакта инструмента с заготовкой характеризуется равенством напряжения пределу текучести материала у кромок образца и возрастанием напряжения к центру контактной поверхности (рис. 5.3, а). Неравномерность распределения удельных усилий зависит от величины контактного трения и относительных размеров осаживаемого образца (*D/H*). Чем больше это отношение, тем выше.

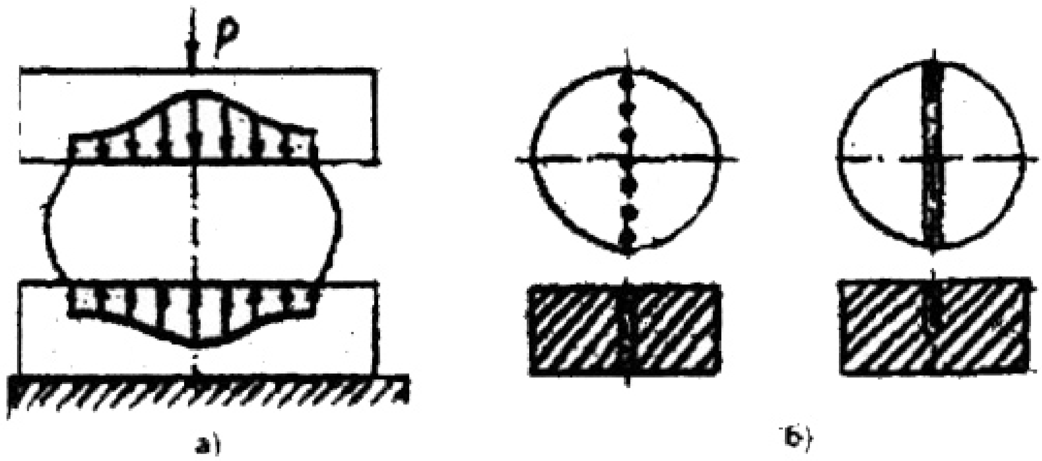


Рис. 5.3. Распределение нормального напряжения по контактной поверхности в процессе свободной осадки (а) и формы осадочных плит для изучения затекания металла в период осадки (б).

В центре контактной поверхности, в условиях перекрытия заготовки инструментом и неравномерного распределения удельных усилий при осадке возникает местный неравномерный упругий прогиб инструмента. Так, в процессе чеканки или калибровки это явление приводит к тому, что торцевые поверхности заготовки приобретают не плоскую форму, а выпуклую.

Качественное распределение удельных усилий на контактной поверхности можно определить по глубине затекания металла в отверстия или щель, которые выполнены в бойке (рис. 5.3,б).

5.3. ОБОРУДОВАНИЕ, ПРИСПОСОБЛЕНИЯ, ИНСТРУМЕНТ, МАТЕРИАЛЫ

Свободную осадку производят на универсальной испытательной машине усилием 40 кН с приспособлением для записи усилия осадки.

В качестве образцов применяют свинцовые цилиндрические образцы с различным соотношением размеров $\frac{D_O}{H_O}$.

Изменение коэффициента трения μ на границе контакта металл - инструмент достигают использованием осадочных плит, имеющих щель, с различным состоянием рабочей поверхности:

- поверхность - шлифованная баз смазки (μ = 0,28);
- поверхность - шлифованная со смазкой (μ = 0,10);
- поверхность грубообработанная с видимыми следами обработки (μ = 0.50).

В качестве сказки применяют машинное масло, солидол или др., очистку поверхности осадочных плит производят ацетоном, бензином.

Измерение размеров осуществляют микрометром и штангенциркулем.

5.4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

Опыт I. Напряжения на контактной поверхности.

Свинцовые цилиндрические образцы размерами D_O = 30 мм и с высотой H_O = 20 мм осаживают в торец на плоскопараллельных плитах, имеющих щель, с разным состоянием рабочей поверхности. Шель плиты должна совпадать с диаметром торца заготовки. В процессе осадки материал образца затекает в щель бойка, причём форма находящегося в щели материала соответствует форме эпюры нормальных контактных напряжений. В конечный момент осадки фиксируют усилие деформации – *P*. Зарисовывают форму материала, находящегося в щели. Измеряют ее высоту на краю образца h_{min} и в центре - h_{max} . Измеряют конечную высоту образца после деформации - H_K, по выражению $D_K = D_O\sqrt{\frac{H_O}{H_K}}$ подсчитывают приведенный диаметр осаженного образца.

Каждый образец осаживают в несколько этапов до значений конечный высоты осаженной заготовки H_K = 15; 10; 5; 2,5 мм. Соответствующие измерения проводятся после высвобождения образца на каждой стадии осадки.

Определяют среднее по поверхности контактное сопротивление деформации P_P:

- расчетом по формуле

- $$P_P = \sigma_S\left(1+\frac{\mu}{3}\frac{D_K}{H_K}\right), \qquad (5.1)$$

- экспериментально

- $$P_O = \frac{P}{F_K} = \frac{P}{0{,}785 D_K^2}. \qquad (5.2)$$

где μ - коэффициент трения между инструментом и образцом;

σ_S - напряжение текучести данного материала;

Р – сила осадки.

Условно полагая, что высота эпюры на контуре поверхности контакта соответствует напряжению текучести материала σ_S (исключая наклонный участок, образованный затеканием в щель металла боковой поверхности), определяют максимальное значение нормального напряжения в центре контактной поверхности $\sigma_{\max}$.

$$\sigma_{\max} = \sigma_S\frac{h_{\max}}{h_{\min}}. \qquad (5.3)$$

Опыт 2. Влияние относительных размеров образца на сопротивление деформации.

Свинцовые образцы диаметром D_O = 30 мм и высотой H_O = 10; 30 и 60 мм осаживают на плоскопараллельных шлифовальных плитах без смазки (коэффициент трения μ = 0,28*).*

Первый образец с соотношением $\frac{D_{О}}{H_{О}} = 3$ осаживают до конечной высоты H = 5 мм. Тогда приведенный конечный диаметр $D_{К} = D_{О}\sqrt{\frac{H_{О}}{H_{К}}} = 30\sqrt{\frac{10}{5}} = 42,3$ мм. В конечный момент осадки фиксируют силу осадки - P, измеряют фактическую высоту H_K и рассчитывают величину D_K.

Второй образец осаживают до такой высоты - $H_{К_2}$, при которой его диаметр $D_{К_2}$ будет равен диаметру предыдущего образца D_K. При этом высота второго образца после осадки равняется $H_{К_2} = H_{О}\frac{D_O^2}{D_k^2} = 30\frac{30^2}{42,3^2} = 15$ мм.

Третий образец осаживают также до такой высоты, когда его приведенный конечный диаметр $D_{К3} = D_{К_2}$, т.е. $H_{К3} = H_{О}\frac{D_O^2}{D_{k_3}^2} = 60\frac{30^2}{42,3^2} = 30$ мм.

Определяют по выражению $P_P = \sigma_S\left(1 + \frac{\mu}{3}\frac{D_{К}}{H_{К}}\right)$величину сопротивления деформации Pp и полного усилия P_p по выражению $P_P = p_p \times F_K = p_p 0,785\, D_k^2$.

5.5.ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальные и расчётные данные опыта 1 заносят в табл. 5.1, опыта 2 - в табл. 5.2.

5.6 ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ ПО РАБОТЕ

Отчёт по работе должен содержать:
- конспект теоретической части;
- описание методики проведения работы;
- расчётные и экспериментальные данные;
- формы эпюр выдавленного в щель свинца;
- графики зависимостей $p_p = f\left(\frac{D_{К}}{H_{К}}\right)$, $p_o = f\left(\frac{D_{К}}{H_{К}}\right)$, $\sigma_{max} = f\left(\frac{D_{К}}{H_k}\right)$;
- выводы о влиянии относительных размеров деформируемого образца на величины сопротивления деформации и силы осадки.

Таблица 5.1

Данные экспериментов по определению контактных напряжений

№ п/п	μ	Опытные данные							Расчетные данные		
		P, кН	$H_к$, мм	к, мм	$D_K/H_к$,	h_{max}, мм	h_{min}, мм	F_K, мм^2	Pp, МПа	P_0, МПа	σ_{max}, МПА
1	0,50										
2											
3											
4											
5	0,28										
6											
7											
8											
9	0,10										
10											
11											
12											

Таблица 5.2

Данные экспериментов по влиянию относительных размеров образца на сопротивление деформации и усилия при осадке

№ п/п	D_0,мм	H_0, мм	D_0/H_0	$D_к$, мм	$H_к$, мм	D_K/H_K	F_K, мм^2	P_0, кН	P_P, МПа	P_p, кН
1	30	10	3,0							
2	30	30	1,0							
3	30	60	0,5							

5.7. ЛИТЕРАТУРА

Я.М. Охрименко, - Технология кузнечно-штамповочного производства - М.: Машиностроение, 1976 С. 142-154.

5.8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему возникает неравномерность деформации при осадке?
2. 0бьясните причину одинарного и двойного бочкообразования наружной поверхности образца при осадке?
3. Какие стадии различают при свободной осадке?
4. Как влияют относительные размеры образцов на усилие осадки?
5. Какие напряжения действуют в зоне затрудненной деформации, в зоне локализованной деформации?
6. Почему образуются трещины на боковой поверхности осаживаемого образца?
7. От каких факторов зависит величина контактного трения?

8. Какими способами изучают распределение удельных усилий по контактной поверхности при осадке?
9. Как рассчитать степень деформации при осадке?
10. Как рассчитать приведенный диаметр осаживаемого образца?
11. Как влияют коэффициент трения и относительные размеры образцов на неравномерность распределения удельных усилий по контактной поверхности?
12. Как рассчитать величину сопротивления деформации металла при осадке ?
13. Как рассчитать полное усилие осадки?

Лабораторная работа 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ СКОЛЬЖЕНИЯ И УЧАСТКОВ ПРИЛИПАНИЯ НА КОНТАКТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОСАДКЕ

(2 часа)

6.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Углубление и закрепление знаний закономерностей при контактной деформации материалов в процессе осадки. Закрепление опыта работы на инструментальном микроскопе.

6.2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

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

Осадка в обычных условиях сопровождается объемной неравномерностью деформации, характеризующейся искажением наружной внеконтактной поверхности в виде бочкообразования, переходом боковой поверхности на контактные. На контактной поверхности инструмента с заготовкой в процессе деформации локализуются участки скольжения металла по поверхности (зоны застоя) и полного прилипания металла, где перемещения по поверхности контакта полностью отсутствуют (зоны прилипания).

Тенденция к скольжению на контактной поверхности объясняется стремлением каждой частицы, находящейся в области контакта, смещаться на величину, пропорциональную расстоянию от оси объекта вследствие естественного процесса его раздачи в поперечных (радиальных) направлениях.

В реальных условиях при осадке скольжение металла по поверхности контакта задерживается силами трения, что приводит к торможению металла, образованию участков застоя и прилипания, наблюдаемых в виде матового пятна в средней части контактной поверхности образцов, окруженного светлой каймой, свидетельствующей об интенсивном скольжении металла по плитам в этом месте. Поверхность торможения подразделяется на участок прилипания и участок застоя, причём последний является переходным к участку скольжения.

6.3. ОПИСАНИЕ ОБРАЗЦОВ, ИНСТРУМЕНТА, УСТАНОВКИ

Процесс осадки изучают на образцах цилиндрической формы из свинца. Для выполнения задач, поставленных в данной работе, необходимы высокие заготовки с соотношением исходных размеров $\frac{D_O}{H_O} \le 2$ и низкие образцы $\frac{D_O}{H_O} \ge 4$. Образцы имеют одинаковые диаметры D_O = 40 мм и разные высоты H_O = 10, 40, 80 мм. Образцы изготавливают из технического свинца $\sigma_S = 20$ МПа. Для осадки применяют стальные закаленные шлифованные плиты. Осадка осуществляется на гидравлическом прессе с номинальным усилием P_H = 400 КН.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТ И УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

На контактные поверхности свинцовых образцов (D_O = 40 мм и высотами соответственно 80 мм; 40 мм; 10 мм) наносят концентрические окружности с радиусами r_o, равными 3; 6; 9; 12; 15 мм, в диаметральную линию. Пересечения окружностей с этой линией образуют точки, равноудаленные относительно центра торцевой поверхности, и подлежат фиксации в начальный момент до осадки. Образцы осаживают постадийно со степенями деформации $\varepsilon_{\text{ОН}} = 20$, 40 и 60 %.

Методика количественного исследования скольжения на контактной поверхности состоит в определении величины смещения (Δr) точек пересечения концентрических окружностей с диаметральной линией после каждой стадии осадки

$$\Delta r = r_m - r_{\text{О}}, \qquad (6.1)$$

где r_m – вектор -радиусы фиксируемых точек после каждой осадки.

На рис. 6.1 показан график, характеризующий теоретическое скольжение по всему торцу образцов $\Delta r^{\text{Т}}$ при полном отсутствии контактного трения при различных степенях деформации.

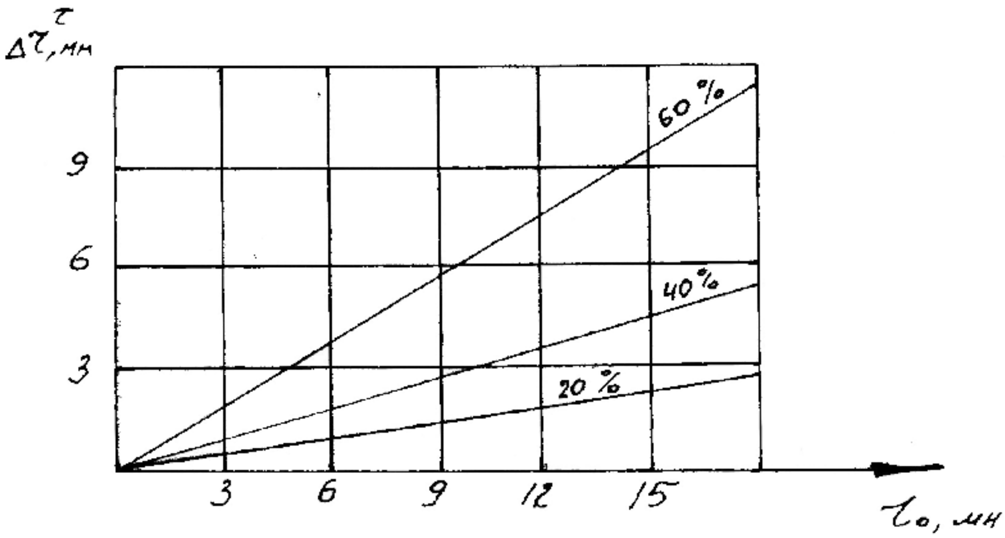


Рис. 6.1. Смещение фиксируемых точек на торце образца при отсутствии контактного трения , $\varepsilon_{\text{ОН}} =$ 20, 40, 60 %.

Отношение фактического скольжения точек Δr, определенного экспериментальной осадкой, к величине $\Delta r^{\text{Т}}$ теоретического смещения при соответствующих значениях исходного радиус – вектора Δr и величины степени деформации называется интенсивностью скольжения по поверхности контакта.

$$\Delta = \frac{\Delta r}{\Delta r^{\text{Т}}}. \qquad (6.2)$$

Величины Δr и Δ определяются после каждой стадия осадки для всех фиксируемых точек на пересечении концентрических окружностей с диаметральной линией.

Степень деформации $\varepsilon_{\text{ОН}}$ при осадке образцов определяется по формуле

$$\varepsilon_{\text{ОН}} = \frac{\text{Н}_\text{О} - \text{Н}}{\text{Н}_\text{О}} \cdot 100\% \ , \qquad (6.3)$$

где H_O - исходная высота заготовки, мм;

H - текущая высота заготовки, мм.

При проведении работ на прессе студенты обязаны соблюдать основные правила безопасности работы в соответствии с инструкцией для студентов, работающих в лаборатории по обработке металлов давлением, "Основы техники безопасности".

6.5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКПЕРИМЕНТА

Результаты вводятся в таблицу 6.1.

Таблица 6.1

Данные для построения графических зависимостей

<table>
<tr><td rowspan="4">№ образца</td><td rowspan="4">Н$\text{Н}_\text{О}$, мм</td><td rowspan="4">$\frac{D_\text{О}}{\text{Н}_\text{О}}$</td><td rowspan="4">Нк, мм</td><td rowspan="4">$\varepsilon_{\text{ОН}}$ %</td><td colspan="10">Радиусы концентрических окружностей, мм</td></tr>
<tr><td colspan="2">3</td><td colspan="2">6</td><td colspan="2">9</td><td colspan="2">12</td><td colspan="2">15</td></tr>
<tr><td colspan="10">Приращение радиусов Δr и интенсивность скольжения Δ</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">1</td><td rowspan="3">80</td><td rowspan="3">0,5</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">2</td><td rowspan="3">40</td><td rowspan="3">1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">3</td><td rowspan="3">10</td><td rowspan="3">4</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

По данным табл. 6.1 строят графики зависимости величины смещения Δr и интенсивности скольжения Δ от указанных факторов. По этим графикам выявляют влияние величины деформации $\varepsilon_{\text{ОН}}$ на интенсивность скольжения и протяженность участков прилипания, застоя и скольжения.

Путем экстраполирования экспериментальных кривых (на участке застоя) находят точки их пересечения с осью абсцисс, определяя таким образам радиус r_{np}, ограничивающий зону прилипания. Полученные денные заносят в таблицу 6.2 и по ним строят графики зависимости величины участка прилипания от отношения $\frac{D_\text{О}}{\text{Н}_\text{О}}$.

Таблица 6.2

Данные для построения графической зависимости $F_{pr}=f(F_1)$

№ образца	$H_О$, мм	$\frac{D_О}{H_О}$	$\varepsilon_{ОН}$, %	$r_{пр}$, мм.	F_{pr}, мм^2	$F_Т$, мм^2

6.6. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ ПО РАБОТЕ

Отчёт по работе должен включать:

1. Конспект теоретической части работы.
2. Эскизы образцов до и после осадки с исходными и конечными размерами.
3. Таблицы, содержащие исходные данные измерений и соответствующие результаты расчётов с оценкой точности измерения.
4. Графическое выражение $\Delta r = f(r_c, \varepsilon_{ОН})$, $\Delta = f(r_0, \varepsilon_{КН})$, $F_{pr} = \gamma(F_Т)$.
5. Выводы, содержащие анализ зависимостей скольжения от величины $\frac{D_О}{H_О}$ образцов и их степени деформации, а также о влиянии этих факторов на величину участка прилипания.

6.7. ЛИТЕРАТУРА

Охрименко Я. М. Технология кузнечно-штамповочного производства. – М.: «Машиностроение», 1966, С. 81-82.

6.8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение технологической операции "осадка".
2. Какими явлениями сопровождается осадка?
3. Какое влияние оказывает контактное трение на характер формоизменения образца при осадке?
4. Какое влияние оказывают на характер формоизменения образца величины $\frac{D_О}{H_О}$, $\varepsilon_{ОН}$?
5. Что такое участки прилипания, застоя и скольжения?
6. Как зависит протяженность участков прилипания, застоя и скольжения от соотношения геометрических размеров образцов и степени деформации?

Лабораторная работа 7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ДЕФОРМАЦИОННОГО ТРЕНИЯ МЕТОДОМ ОСАДКИ КОЛЬЦА

(2 часа)

7.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Закрепление знаний закономерностей деформационного трения, экспериментального метода определения коэффициента трения, математического планирования эксперимента; приобретение навыка работы по приготовлению смазок, нанесение смазочных покрытий и измерению геометрических размеров образца.

7.2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В процессах ОМД важную роль играют силы контактного трения. От их величины в распределения по контактным поверхностям зависят напряженное, кинематическое и деформированное состояние металла, формоизменение и требуемое для деформации усилие при прокатке, ковке, штамповке, прессовании и т.д. Знание закономерностей процессов трения необходимо для расчета напряжений и деформаций, а также для решения многих технологических задач.

Трение в процессах ОМД называют деформационным, т.к. один из компонентов пары трения подвергается пластической деформации. Отличительными особенностями деформационного трения по сравнению с машинным являются наличие ювенилыной (обновляющейся в процессе контакта) поверхности заготовки и разнонаправленность эпюр относительных перемещений на поверхности контакта.

В последние годы становятся актуальней задача интенсификации процессов ОМД посредством управления силами деформационного трения (гибридные процессы прокатка-прессование, процессы гидро - и квазигидроэкструзия и др.)

Для расчетов сил трения необходимо пользоваться опытными константами (коэффициентами). Каждый метод определения коэффициентов базируется на соответствующей теории, которых весьма много. Однако теории трения можно разбить на несколько основных групп [6]:

1. Геометрическая теория Амонтона-Кулона

$$\tau = \mu \sigma_n, \qquad (7.1)$$

где μ - коэффициент трения;

σ_n - нормальное напряжение.

По этой теории трение связывается с движением одного из абсолютно жестких тел по макронеравномерностям другого.

2. Молекулярная теория (Дезагюлье), по которой трение представляет собой результат молекулярного взаимодействия между трущимися телами.

3. Деформационная теория (Зибель, Губкин) по которой трение оценивают рабо-

той, затраченной на деформацию выступов контактирующих тел, если

$$\tau = \mu\sigma_S \qquad (7.2)$$

где σ_S - напряжение текучести сплава.

4. Комбинированное, объединяющие несколько теорий, первая такая теория, сформулированная Кулоном, рассматривает сухое трение как результат сцепления, молекулярного взаимодействия и подъема по микронеровностям:

$$\tau = C + \mu\sigma_n, \qquad (7.3)$$

где С - сила сцепляемости.

При σ_n = 0 имеем τ = С.

Известен закон, учитывающий величины σ_S и σ_n:

$$\tau = K_n \frac{\sigma_S}{2}\left(1 - e^{-1,25\frac{\sigma_n}{\sigma_S}}\right), \qquad (7.4)$$

где $K_n = \dfrac{2\tau}{\sigma_S}$ при $\sigma_n >> \sigma_S$.

Последнее уравнение хорошо согласуется с экспериментальными данными, полученными в условиях ОМД. Величину K_n называют "константой поверхности" (см. [6]).

Существует значительное количество методов экспериментального определения коэффициента трения μ. Одна группа методов основана на изучении кинематики течения материала и расчетном определении величины μ; другая - на непосредственном измерении нормального σ_n и касательного τ напряжений. Ниже рассматривается один из методов определения коэффициента трения, который относится к первой группе методов, которые назовем условно "экспериментально-аналитическими". Основу таких методов составляет деформируемый образец. Конфигурация образца после деформации в условиях значительной площади свободной поверхности должна зависеть в возможно большей степени от условий трения. Высокой чувствительность» к условию трения обладает "метод осадки кольца", предложенный в Японии (Kunogi) и развитый работами ряда советских (Колмогоров и др.), и зарубежных (Male, Kokroft и др.) исследователей.

Нижеописанный метод определения коэффициента трения заключается в осадке цилиндрического образца с круглым отверстием (рис. 7.1). Образец изготавливается из испытуемого материала, испытуемая смазка наносится на него или на инструмент - плоскопараллельные плиты. Образец осаживается в осевом направлении. Измеряются диаметры d’ и d’’ отверстия после деформации, определяется величина среднего диаметра d, по величинам d и h, пользуясь номограммой (рис. 7.2), определяется значение коэффициента трения.

Основные допущения метода:

1. Упругая деформация образца пренебрежимо мала по сравнению с пластической;

2. Весовые и инерционные силы пренебрежимо малы;

3. Инструмент – абсолютно жесткое тело;

4. Изменение деформации в осевом направлении образца пренебрежимо мало;

5. Величина напряжения текучести распределена равномерно по объему образца;

6. На торцевых поверхностях образца справедлив закон трения Амонтона с коэффициентом трения, неизменным в процессе осадки.

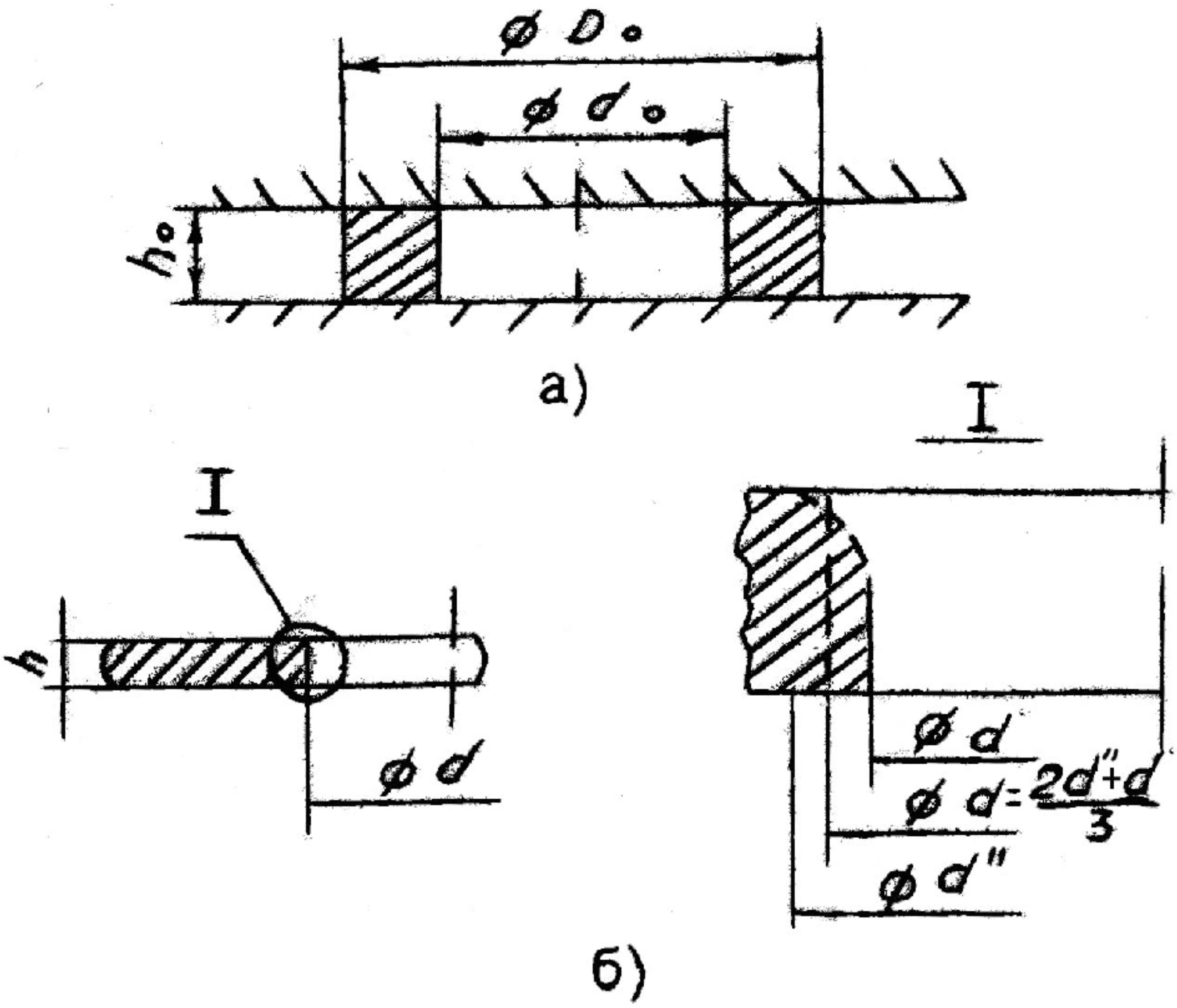


Рис. 7.1. Образец для определения коэффициента трения: а) – до деформации;

б) – после деформации.

Основой метода является поле скоростей перемещений, описываемое выражениями для радиальной (V) и осевой (V_2) составляющих скорости:

$$V = \frac{V_S}{2h}\left(\frac{r^2 - r_S^2}{r}\right), \; V_2 = -\frac{V_S}{h} z, \qquad (7.5)$$

где V_S - скорость перемещения подвижной плиты;

r_S - радиус кривизны нейтральной линии, по которой радиальная скорость равна нулю (рис. 7.2).

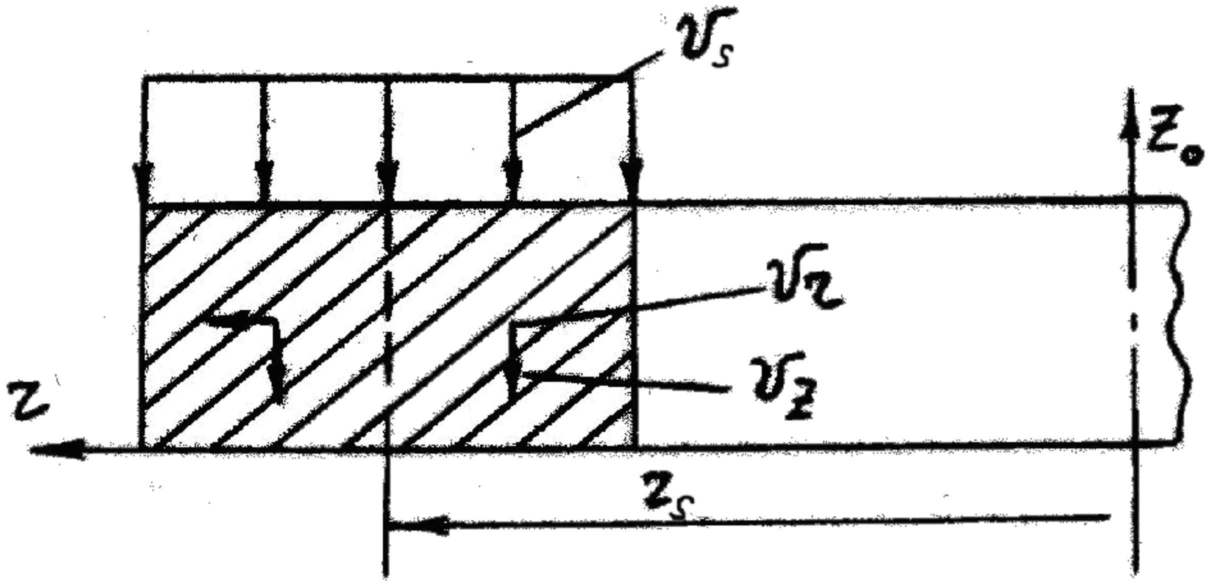


Рис. 7.2. Кинематика течений металла.

Положение нейтральной линии, т.е. величина r_S, до опыта неизвестны. Очевидно, что при μ = 0 (при отсутствии трения) кольцо будет деформироваться как часть сплошного диска, тогда величина будет равна нулю. Величина r_S с одной стороны связана с условиями трения (μ), с другой - с диаметром отверстия и текущей высотой кольца (через условия несжимаемости).

Используя уравнение равновесия для элемента кольца, как скоростей деформации, определенных по выражению (7.5), условия несжимаемости и пластичности по Мизесу, получена система уравнений, в которую входят геометрические размеры образца, величина r_S и коэффициент трения (ввиду громоздкости этой системы уравнений она полностью не проводится):

$$\left.\begin{aligned} &1.\ \varphi_1\left(d_o, D_o, h_o.r_S, d, h, \mu\right) = 0 \\ &2.\ \varphi_2\left(d_o,, h_o.r_S, d, h,\right) = 0 \end{aligned}\right\} \qquad (7.6)$$

В уравнения системы (7.6) подставляют известные значения и итерационным путем на ЭВМ находят два неизвестных - величины r_S и μ. При определении величины μ целесообразно воспользоваться номограммой (рис. 7.3), рассчитанной на ЭВМ. Для проверки постоянства коэффициента трения по ходу процесса рекомендуется провести 2-3 опыта с различной степенью деформации (до различной конечной высоты *h)* и сравнить полученные значения величины μ..

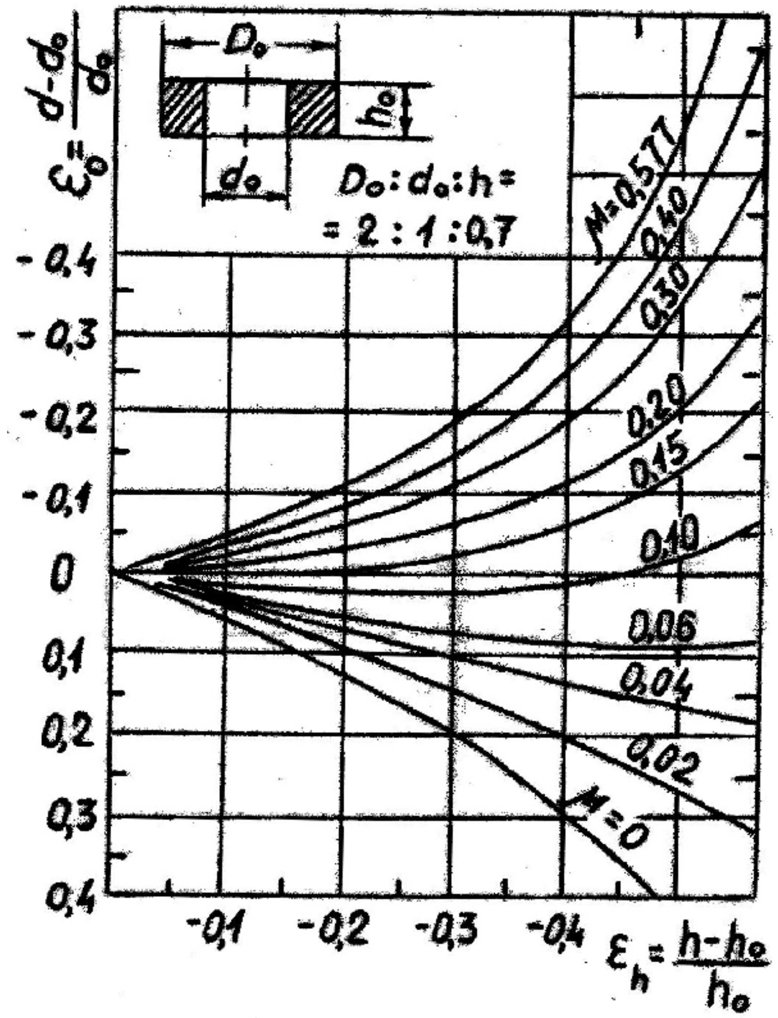


Рис. 7.3. Номограмма для определения коэффициента трения.

Данный метод эффективно применяется при выборе технологических смазок, температурно-скоростных условий обработки, материалов инструмента и температуры его подогрева. Метод отличается простотой с высокой чувствительностью к условиям трения.

7.3. ОБОРУДОВАНИЕ, ИНСТРУМЕНТ, МАТЕРИАЛЫ

Образцы. Типоразмер следует выбирать в зависимости от температуры подогрева образцов перед деформацией материала (табл. 7.1).

Оборудование.

1. Образцы из свинца и из сплавов на его основе деформируются на испытательной машине усилием 50 кН или 60 кН. Образцы из остальных металлов и сплавов деформируются на гидропрессе усилием 400 кН .

2. Ограничительные кольца высотой 4,2; 6,3; 10,2 мм.

3. Измерительный микроскоп марки УШ-23.

4. Штангенциркурль.

5. Печь нагревательная (до 1100°С).

6. Термопара типа ХА, потенциометр КП – 4.

7. Комплект плит осадочных шероховатостью R_Z 100;R_Z 20; R_Z 2.5; R_Z 0,63.

8. Комплект смазок: графит, Вапор - Т, солидол, масло И-30, парафиновое, касторовое, оливковое, ланолин, мыло.

9. Ацетон, сухая ветошь.

Таблица 7.1

Рекомендуемая величина диаметра отверстия d_o

Материал образцов	d_o, мм при температуре ^{O}C					
	20	200	400	600	800	1000
Железо и сплавы на основе железа	10	10	10	15	15	15
Медь и сплавы	15	15	15	15	15	-
Алюминий и сплавы	15	15	15	15	-	-
Свинец и сплавы	20	20	-	-	-	-

7.4. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Работа заключается в отыскании математической зависимости коэффициента трения от одного или нескольких факторов (режимных, переменных) процесса деформации.

В работе предусмотрено варьирование следующих факторов:

1. Шероховатость рабочей поверхности инструмента.
2. Тип смазки или способ нанесения.
3. Температура образца перед деформацией (см. табл. 7.1).
4. Материалы образцов.

Задание, выдаваемое преподавателем, состоит в выборе одного из следующих 15 вариантов заданий (табл. 7.2) и соответствующих планов эксперимента (см. приложение 1).

В каждом варианте за исключением 15-го рекомендуется использование восьми образцов, четыре опыта по два наблюдения в каждом, в 15 варианте - 8 опытов по одному наблюдению. Все варианты, кроме первых четырех, предусматривают варьирование каждого фактора на двух уровнях (две шероховатости, два типа смазки и т.д.).

Таблица 7.2

Варианты заданий

Вариант	Фактор	План	Вариант	Фактор	План	Вариант	Фактор	План
1	1	Не менее 4-х уровней изменения фактора 2^2	6	1,3	2^2	11	1,2,3	2^{3-1}
2	2		7	1,4	2^2	12	2,3,4	2^{3-1}
3	3		8	2,3	2^2	13	3,4,1	2^{3-1}
4	4		9	2,4	2^2	14	4,1,2	2^{3-1}
5	1,2		10	3,4	2^2	15	1,2,3,4	2^{4-1}

Последовательность выполнения работы:

1. Измерить исходные размеры восьми кольцевых образцов, при этом образцы номеруются.

2. Подготовить образцы к испытанию: обезжирить, смазать, или нагреть в соответствие с планом эксперимента.

3. Провести обжатия образцов до степени деформации от 30 до 50 % с использованием ограничительных колец.

4. Измерить конечные геометрические размеры образца (см. рис. 7.1) h, d’, d’’, эти измерения проводятся дважды в двух взаимноперпендикулярных направлениях. Все полученные данные заносятся в протокол эксперимента (табл. 7.3).

Таблица 7.3

Результаты измерения геометрических размеров образцов

№ образца	Результаты измерений											
	h_o	d_o	h_1	h_2	$h=\frac{h_1+h_2}{2}$	$\varepsilon_n=\frac{h-h_O}{h_O}$	d_1'	d_2'	d_1''	d_2''	d	$\varepsilon_O=\frac{d-d_O}{d_O}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

7.5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Первоначальный этап обработки – это расчет величин *h, d* и деформации ε_o, ε_n , при этом:

$$d' = \frac{(d_1' + d_2')}{2};\ d'' = \frac{d_1'' + d_2''}{2};\ d = \frac{2d'' + d'}{3}.$$

$$d = \frac{2(d_1'' + d_2'') + d'_1 + d_2'}{6}.$$

2. По вычисленным значениям деформации ε_o, ε_n с использованием номограммы (см. рис. 7.2) определить значение коэффициента трения μ и заполнить соответствующие колонки протокола (Табл. 7.4, колонки 5, 6, 7).

Таблица 7.4

План эксперимента типа 2^{3-1}

№ опыта	Факторы			Значения функции отклика		
	X_1	**X_2**	**X_3**	**μ_1**	**μ_2**	$\mu = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2}$
1	2	3	4	5	6	7
1						
2						
3						
4						

3. Определить дисперсию воспроизводимости D_H и среднеквадратичную ошибку опыта (см. приложение 1).

4. Вычислить коэффициенты регрессии, например B_O, B_1, B_2, B_3 в математической модели $\mu = B_O + B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_3$.

5. Оценить значимость полученных коэффициентов регрессии, определить "теоретические" значения коэффициента трения μ в точках плана по уравнению регрессии.

6. Определить дисперсию адекватности и оценить адекватность модели по критерию Фишера (выполняется по указанию преподавателя).

7. Построить график зависимости $\mu = f(x)$.

8. Сделать общие выводы по работе относительно характера влияния исследуемого фактора (-ов) на величину коэффициента трения μ.

7.6. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ ПО РАБОТЕ

Отчет должен содержать конспект теоретической части, цель работы, перечень используемых материалов, оборудования (соответственно варианту задания), заполненные табл. 7.3, 7.4, зависимость $\mu = F(X)$ в виде графиков и уравнений

$\mu = B_O + B_1X_1 + B_2X_2 + B_{12}X_1X_2$ для вариантов опыта 5-10;

$\mu = B_O + B_1X_1 + B_{11}X_1^2$ для вариантов опыта 1-4;

$\mu = B_O + B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_3 + B_4X_4 + B_{12}X_1X_2 + B_{14}X_1X_4 + B_{24}X_2X_4$ для вариантов опыта 15.

После отбрасывания незначимых членов уравнения могут быть существенно упрощены.

7.7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы основные допущения использованного метода?

2. Как определяется величина коэффициента трения?

3. Каков характер зависимости величины μ от исследуемых факторов процесса трения?

4. Как определяется математическая модель этой зависимости?

7.8. ЛИТЕРАТУРА

1. Сторожев М.В., Попов Е.А. - Теория обработки металлов давлением. - М.: Машиностроение, 1971. - 424 с. с илл. С. 157-163.

2. Громов Н.П. - Теория обработки металлов давлением. - М.: Металлургия, 1978 - 360 с., о ил. С. 166-180, 183-190.

3. Охрименко ЯМ., Тюрин В.А. Теория ОМД. Часть Ш. - М.: МИСиС, 1972, - 146 с. с илл. С. 5-62.

4. Охрименко Я.М., Тюрин В.А. - Теория процессов ковки, - М.: Высшая школа, 1977, С. 42-70.

5. Манегин Ю.В., Анисимова И.В., - Стеклосмазка и защитные покрытия для горячей обработка металлов. - М.: Металлургия, 1978, 223. С. ¯172-181.

6. Лизанов А.Н. и др. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением. - М.: Металлургия, 1976, 416 с. с ил, С. 177-190.

Лабораторная работа 8

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ УСИЛИЙ ПРИ ПРЯМОМ И ОБРАТНОМ ПРЕССОВАНИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОЭФФИЦИЕНТА ВЫТЯЖКИ И ФОРМЫ МАТРИЧНОЙ ВОРОНКИ

(4 часа)

8.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомление с одной из методик экспериментального и теоретического определения усилий и установление закономерностей изменения суммарного усилия прессования в зависимости от коэффициента вытяжки и формы матричной воронки.

8.2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

При разработке технологического процесса получения изделий нового сортамента или при замене материала заготовки часто возникает необходимость в определении необходимого усилия прессования.

Усилие прессования определяется как экспериментальными, так и аналитическими методами. Экспериментальные методы определения являются более точными, но и наиболее трудоемки. Точность математических методов зависит от степени точности учета всех факторов, влияющих на усилие прессования.

К числу наиболее важных параметров, влияющих на усилие прессования, следует отнести:

1) способ прессования;
2) температуру нагрева заготовок перед прессованием;
3) величину поверхности контакта материала с инструментом;
4) степень деформации, определяющуюся коэффициентом вытяжки;
5) скорость прессования;
6) профиль очка матрицы;
7) сопротивление деформации прессуемого материала при температуре деформации;
8) условия контактного трения материала по поверхности инструмента и др.

Полное усилие прессования для прямого процесса определяется соотношением |1,2|:

$$P = P_{М} + T_{М} + T_{Р} + T_{КР} + T_{П} \qquad (8.1)$$

где $P_м$ - усилие на прессшайбе для осуществления основной деформации без учета трения, МН;

$T_{М}$, $T_{Р}$, $T_{КР}$, $T_{П}$ - усилия на прессшайбе для преодоления трения соответственно на боковых границах ОЧПЗ, на рассекателе матрицы, на боковой поверхности контейнера и в пояске матрицы, МН.

Усилие на прессшайбе для осуществления основной деформации - $P_м$ определяется выражением

$$\mathrm{P_М} = \beta\left(\frac{\pi D_{\text{Н}}^2}{4}\cos^2\frac{\alpha}{2}\right) i\sigma_{\text{Т}} \qquad (8.2)$$

где i - интегральный показатель основной деформации, $i = \ln\mu = \ln\frac{F_{\text{К}}}{f_{пр}}$;

α - угол наклона образующей ОЧПЗ к оси прессования;

β - коэффициент, учитывающий влияние среднего главного нормального напряжения $(1 \le \beta \le 1{,}15)$.

При прессовании профилей имеет место нарушение равенства $\sigma_n = \sigma_{\text{О}}$, что требует изменения условий пластичности. Коэффициент β зависит от угла конусности матрицы; так, при α = 60° β = 1,1.

Для этого случая:

$$\mathrm{P_М} = 1{,}15 D_{\text{К}}^2 \cdot i \cdot \sigma_{\text{Т}}, \qquad (8.3)$$

где D_K - диаметр контейнера, мм;

σ_m - среднее значение сопротивления деформации, которое определяется по формуле

$$\sigma_{\text{Т}} = \sqrt{\sigma_{\text{ТК},} \cdot \sigma_{\text{ТН}}}, \qquad (8.4)$$

где $б_{т,к}$, $б_{т,н}$ - сопротивления деформации в конце и начале обжимающей части пластической зоны соответственно.

Усилие на преодоление трения на боковой границе очага деформации определяется по формуле

$$\mathrm{T_М} = \frac{\pi D_{\text{Н}}^2}{2 Sin\alpha} \cdot \ln\frac{D_{\text{Н}} - d_{\text{К}}}{D_{\text{К}} - d_{\text{К}}} \cdot f_S \cdot \sigma_{\text{Т}}, \qquad (8.5)$$

где D_K, α_K - приведенные наружный и внутренний диаметры профиля соответственно;

f_s - коэффициент трения.

В случае прессования без смазки f_s следует брать по максимальному значению, равному 0,5. Так, при α = 60° и f_s = 0,5 выражение (8.5) упростится:

$$\mathrm{T_М} = 0{,}9 D_{\text{М}}^2 \cdot \ln\frac{D_{\text{Н}} - d_{\text{К}}}{D_{\text{К}} - d_{\text{К}}} \cdot \sigma_{\text{Т}}. \qquad (8.6)$$

Для прессования изделий через матрицу с рассекателем сила трения на рассекателе принимается как:

$$\mathrm{T}_{\mathrm{Р}} = \left(\frac{\pi D_{\mathrm{Н}}^{2}}{4} \cdot Sin\gamma \right) \mathrm{K}_{\mathrm{Р}} \ln \frac{0{,}8 D_{\mathrm{Н}}}{0{,}8 D_{\mathrm{Н}} - a_{\mathrm{К}}}, \qquad (8.7)$$

где K_P - среднее значение напряжения трения металла о рассекатель матрицы, которое принимается равным *$б_T/2$;*

γ - угол наклона образующей рассекателя к оси прессования;

a_K - ширина стола рассекателя у основания; после упрощения

выражения (8.7) принимает вид:

$$\mathrm{T}_{\mathrm{Р}} = 0{,}4 \frac{D_{\mathrm{Н}}^{2}}{Sin\gamma} \cdot \sigma_{\mathrm{Т}} \cdot \ln \frac{0{,}8 D_{\mathrm{Н}}}{0{,}8 D_{\mathrm{Н}} - a_{\mathrm{К}}}. \qquad (8.8)$$

Для прямого процесса прессования сила трения на контейнере определяется как:

$$\mathrm{T}_{\mathrm{КР}} = \pi D_{\mathrm{Н}} \left[L - h_{у,з} - (0{,}2 - 0{,}3) D_{\mathrm{Н}} \right] \mathrm{K}_{\mathrm{Р}}, \qquad (8.9)$$

где L - длина распрессованного слитка;

$h_{у.з.}$ - высота упругой зоны по границе с контейнером;

K_P - среднее напряжение трения металла о поверхность контейнера, равное $б_т/2$.

$$h_{у,з} = 0{,}64 \frac{D_{\mathrm{Н}} - D_{\mathrm{К}}}{2}. \qquad (8.10)$$

При упрощении выражения (8.9) получаем:

$$\mathrm{T}_{\mathrm{КР}} = 1{,}6 \cdot D_{\mathrm{Н}} \cdot \left[L - 0{,}6 D_{\mathrm{Н}} + 0{,}3 D_{\mathrm{К}} \right] \cdot \sigma_{\mathrm{Т}}. \qquad (8.11)$$

Для обратного способа прессования

$$\mathrm{T}_{\mathrm{КР}} = \pi D_{\mathrm{Н}} h_{п,з} \mathrm{K}_{\mathrm{Р}}, \qquad (8.12)$$

где $h_{у.з}$ -высота обжимающей части пластической зоны, которая определяется:

$$h_{п,з} = 0{,}5 D_{\mathrm{Н}} \frac{0{,}73}{\sqrt{\mu}}. \qquad (8.13)$$

Таким образом, для обратного процесса прессования трение на контейнере принимается только вблизи поверхности матрицы, и оно практически составляет 15 – 20 % от $T_{кр}$ при прямом процессе прессования.

Усилие трения металла в рабочем пояске матрицы T_n можно определить по формуле:

$$T_n = f_{s,n} \cdot \sigma_{TK} \cdot \mu \cdot \left(П_{НАР} + П_{ВН} \right) \cdot l_n , \qquad (8.14)$$

где $f_{s,n}$ - коэффициент трения о поверхность матрицы в зоне рабочего пояска матрицы;

$П_{нар}$, $П_{вн}$ - параметры наружного и внутреннего контура профиля соответственно;

l_n - длина рабочего пояска матрицы.

Сопротивление металла деформированию определяется с учетом объема ОЧПЗ и деятельности деформации.

Длительность деформации определяется отношением:

$$\tau = \frac{B_{ОНПЗ}}{B_{cek}} , \qquad (8.15)$$

где $B_{ОЧПЗ}$ - объем ОЧПЗ, который определяется как:

$$B_{ОЧПЗ} = 0{,}2\left(D_n^3 - D_К^3\right), \qquad (8.16)$$

где D_n - приведенный диаметр, равный

$$D_n = D_К = \sqrt{\frac{4F_{np}}{\pi}} \qquad (8.17)$$

$B_{сек}$ - секундный объем металла:

$$B_{сек} = F_{пр} \, . \, W_{ист} , \qquad (8.18)$$

где $F_{пр}$ - площадь поперечного сечения прессизделия;

$W_{ист}$ - скорость истечения прессизделия из канала матрицы.

Зная длительность деформации, определяем по номограмме сопротивление деформированию σ_T [1,3].

Возможно определение сопротивления деформации через скорость деформации, которая определяется для прутка по выражению (8.19):

$$\dot{\varepsilon} = \frac{3 \cdot \ln \mu \cdot Sin^3 \alpha \cdot W_{ucm}}{\left(1 - Cos\alpha\right)\left(\mu D_Н - D_К\right)} \qquad (8.19)$$

В этом случае нужно пользоваться диаграммами рис. 8.1 и 8.2, позволяющими определить значения $6_т$ при высоких значениях ε.

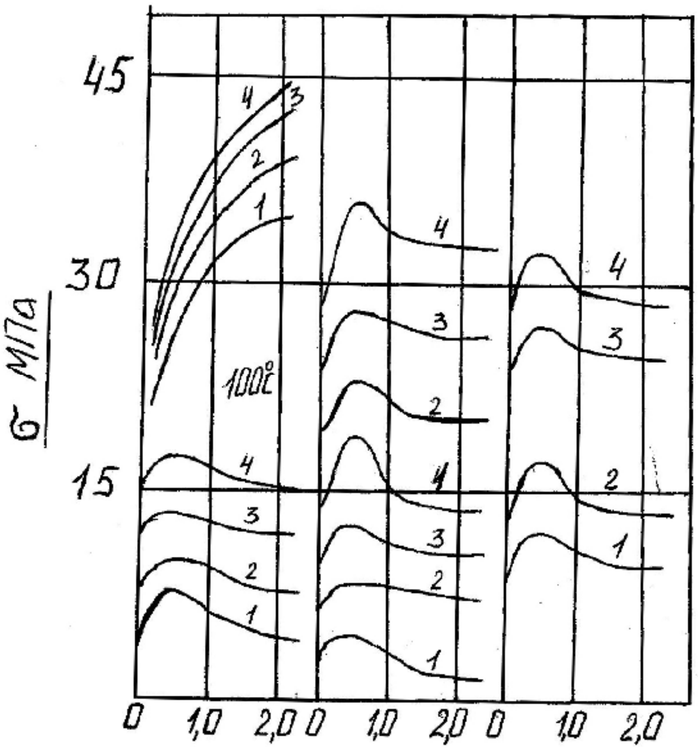


Рис. 8.1. Кривые деформационного упрочнения свинца CI (99,98%). Скорость деформации, с$^{-1}$: 1 -0,04; 2 -9; 3- 101; 4 –311.

В этом случае величину $б_т$ можно определить непосредственно как значение сопротивления деформированию для середины обжимающей части пластической зоны. Для этого предварительно определяют степень деформации, соответствующей середине ОЧПЗ, $\ln\sqrt{\mu}$.

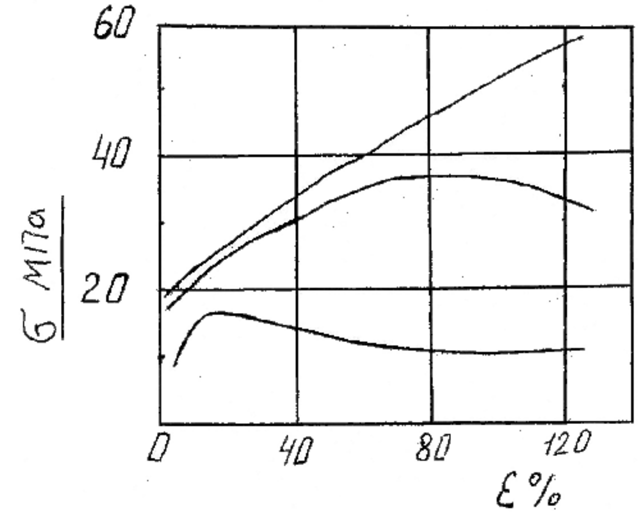


Рис. 8.2. Кривые деформационного упрочнения свинца С006. Скорость деформации, с-^{1}: I – 3.10^{-4}; 2 - 2,7; 3-40.

Теоретическое определение усилия прессования позволяет определить номинальное усилие, затрачиваемое на осуществление процесса. Однако изучение закономерностей изменения полного усилия прессования и его составляющих осуществляется экспериментальными методами исследования.

Наиболее просто усилие на прессшайбе определить путем регистрации показаний давления на главном цилиндре по манометру. Эти давления, за вычетом потерь в рабочем цилиндре, дают искомые давления. Запись показаний с манометрического датчика производится на осциллограф или самописец.

Однако для получения истинной картины изменения усилий на контейнере, прессштемпеле и матрице целесообразно оснащать установки тремя силоизмерителями. Для этой цели применяют безинерционные электрические силоизмерителные приборы, состоящие из упругого элемента, тензометрического датчика - преобразователя, наклеиваемого на упругий элемент, и силоизмерительного блока.

В качестве упругого элемента можно использовать или непосредственно детали пресса или рабочего инструмента, или элементы специальной конструкции, помещаемые в зону измеряемых сил и входящие в состав месдоз /4/.

Месдозой называют прибор, предназначенный для определения силы по величине деформации или изменению напряженного состояния упругого элемента.

Месдоза состоит из упругого элемента, преобразователя упругой деформации или изменения напряженного состояния в изменение какой-либо электрической величины, вспомогательных элементов, служащих для установки и закрепления месдозы, для передачи усилия к другому элементу, для вывода проводов, для охлаждения и герметизации проводов.

Месдозы на прессах работают в тяжелых условиях и чаще всего их устанавливают под пуансоны, прессштемпели, матричные узлы и т.п.

В качестве датчика, чаще всего используют проволочные или фольговые датчики сопротивления.

Изменение электрических характеристик системы фиксируется силоизмерительным блоком, и по заранее составленным тарировочным кривым определяется соответствующая величина искомого давления.

Таблица 8.1

Варьируемые параметры процесса прессования

№ варианта	Коэффициент вытяжки λ			Высота образца, мм			Угол конусности матрицы 2α, градусы		
	10	15	20	30	60	90	120	150	180
1	+		+			+	+		
2		+	+			+	+		
3		+	+			+	+		
4	+	+			+			+	
5		+	+		+			+	
6	+		+		+			+	

Силоизмерительные блоки включают осциллографы в комплекте со специальными усилителями различных конструкций.

На рис. 8.3 приведена схема установки для измерения давления с применением электрической силоизмерительной установки при прессовании с прямым и обратным истечением, использованной при исследовании силовых условий прессования свинца.

На этой установке одновременно с давлением регистрируется ходографом и путь прессштемпеля.

8.3. ОБОРУДОВАНИЕ, ИНСТРУМЕНТ, ОБРАЗЦЫ

Данная работа проводится на гидравлическом прессе модели ДБ2426А усилием 0,4 МН на образцах диаметром 30 мм и высотой 30, 60 и 90 мм из свинца. Схема инструментальной наладки приведена на рис. 8.3.

Установка состоит из инструмента, вспомогательных средств и электрической аппаратуры; предназначена для записи силовых параметров, перемещений инструмента процессов прямого и обратного прессования.

Инструмент состоит из контейнера 1, в который помещается образец *2*, полого прессштемпеля 3, прессшайбы 4, разъемной матрицы 5 и матрицедержателя 6. Для вспомогательных целей имеются комплект плит 7 с шаровой поверхностью, месдоза 8 и комплект аппаратуры (9 - усилитель; 10,11 - выпрямители; 12 - осциллограф).

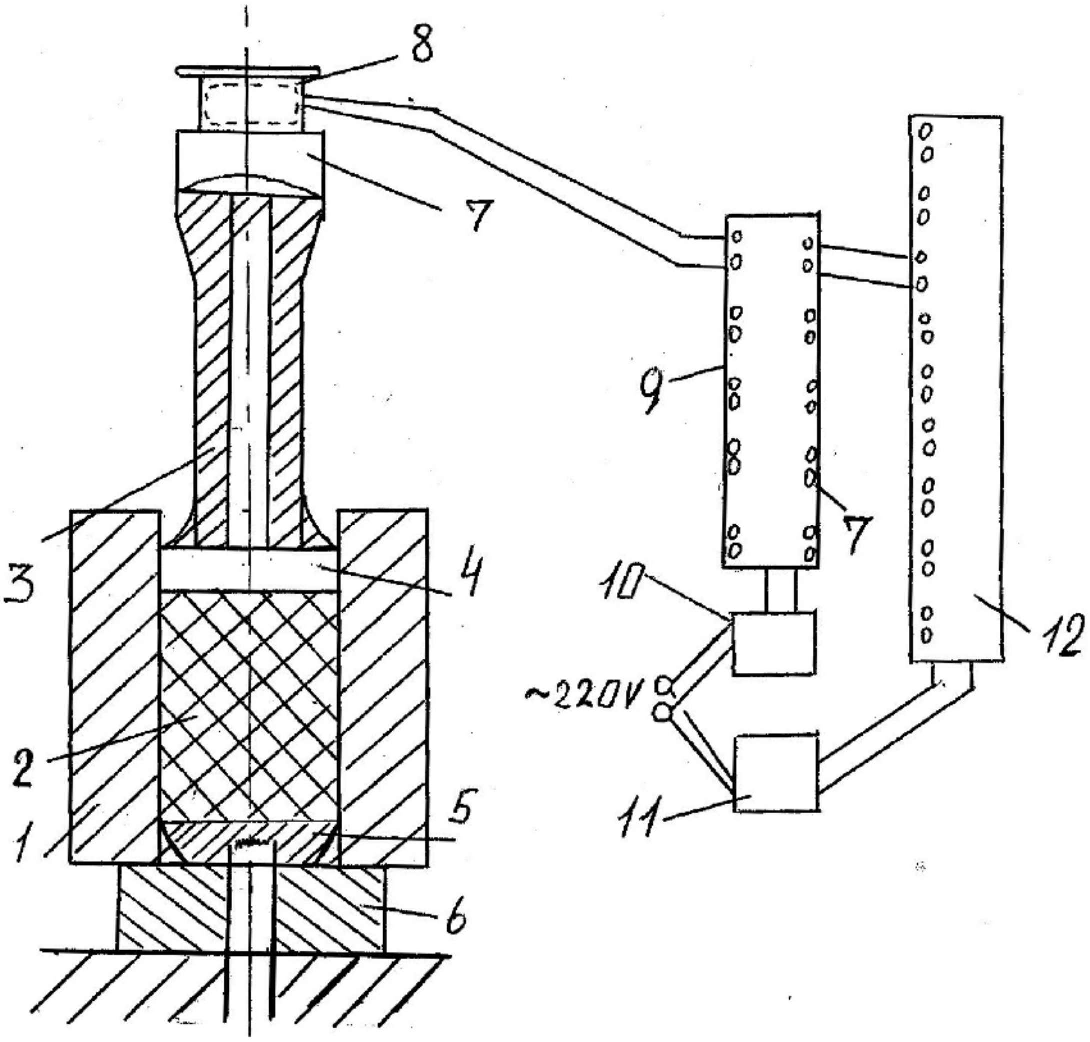


Рис. 8.3. Схема установки для прессования прутков прямым способом.

8.4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ И УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

1. На бригаду из 2-3 студентов выдается индивидуальное задание и четыре образца. Индивидуальное задание выбирается из сочетания трех параметров процесса: коэффициента вытяжки λ_{cp}, высоты образца и угла конусности матрицы 2α (таб. 8.1).

2. Изучить инструкции по работе на гидравлическом прессе, сборку и разборку инструментальной наладки.

3. Включить электрическую измерительную аппаратуру для прогрева в течение 15-20 мин.

4. Измерить штангенциркулем длину и диаметр образцов и размеры канала матрицы.

5. Обезжирить образцы и инструмент для получения максимальных сил трения.

6. Провести тарировку силоизмерителя. Для расшифровки полученных данных необходимо построить тарировочный график (рис. 8.4) при ступенчатом нагружении месдоз на прессе ДБ2426А.

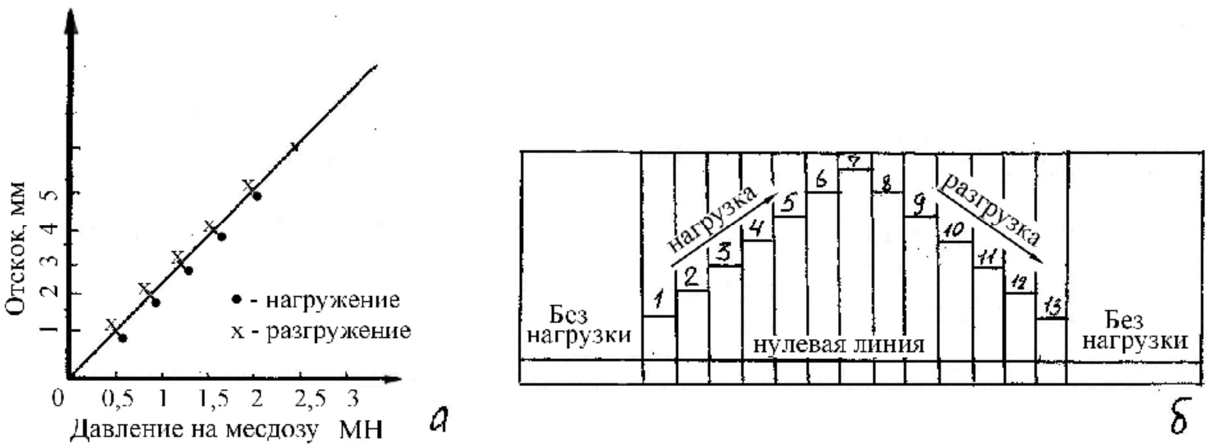


Рис. 8.4. Типовой тарировочный график силоизмерительной месдозы (а) и типовая тарировочная осциллограмма (б).

Тарировка – это определение зависимости выходного сигнала от измеряемого усилия. Усилие фиксируется силоизмерителем пресса, а выходящий сигнал осциллографом, ЭВМ или другим прибором, который используется в опытах по измерению параметра.

Все тензометры необходимо периодически подвергать тарировке, что объясняется ползучестью материала датчика и клеевого слоя, передающего деформацию от детали к решетке месдозы.

Тарировку провести на прессе при его нагружении до 300 кН через каждые 50 кН при нагружении в течение 1 минуты, а при разгружении - в обратном порядке. Тарировку проводить при включенной регистрирующей аппаратуре. После тарировки полученный тарировочный график зафиксировать для дальнейшего использования в опытах при определении усилия нагрузки.

7. Собрать инструментальную наладку согласно схеме на рис. 8.3, а для прямого процесса прессования ввести образец в полость контейнера, включить регистрирующую аппаратуру и отпрессовать образец с записью исследуемых параметров на осциллограмму.

8. Разобрать инструмент, освободить матрицу от прутка и прессостатка, подгото-

вить инструмент для прессования второго образца тем же методом, а далее для обратного прессования (рис. 8.3, б), и отпрессовать оба образца.

9. Провести теоретический расчет для прямого и обратного способов для этих же образцов.

8.5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Обработать кривые изменения усилия на осциллограммах по стандартной методике, согласно рис. 8.5.

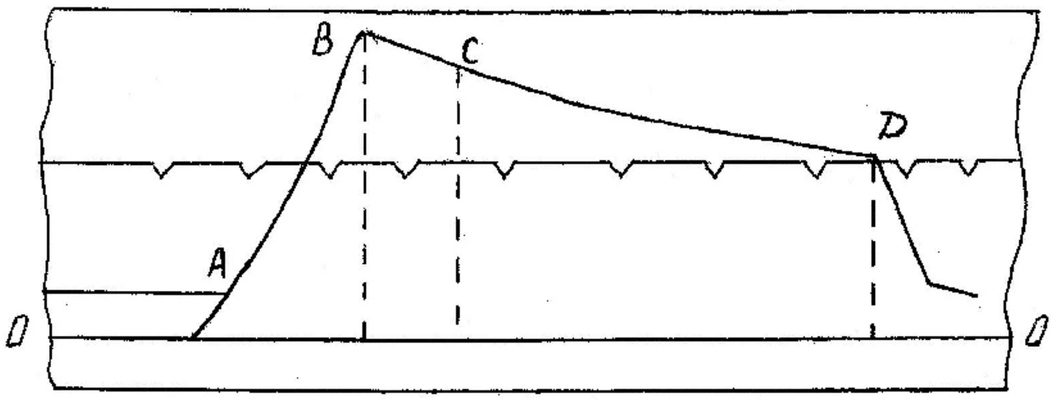


Рис. 8.5. Типовая осциллограмма при прессовании.

Результаты замеров занести в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Протокольные данные осциллографирования процесса прессования

Способ и условия прессования	Отскок O_1B, мм	Отскок O_2B, мм	Отскок $O_3Д$, мм	P_1, кН	P_2, кН	P_3, кН	$AO_1=H_1$, мм	$AO_2=H_2$, мм	$AO_3=H_3$, мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Прямое прессование с λ_1, 2α=									
Прямое прессование с λ_2, 2α=									
Обратное прессование с λ_1, 2α=									
Обратное прессование с λ_2, 2α=									

По результатам расшифровки построить графики зависимостей $P = f\left(\frac{H_T}{H_O}\right)$.

8.6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Конспект теоретической части работы.

2. Таблицы, содержащие результаты обработки осциллограмм, расчетные результаты силовых параметров.

3. Графические выражения $P = f\left(\frac{H_T}{H_O}\right)$.

4. Выводы, содержащие:

а) констатирующую часть (что получено);

б) теоретическое объяснение закономерностей изменения усилий при прямом и обратном прессовании при их сопоставлении с аналитическими методами расчета.

8.7. ЛИТЕРАТУРА

1. Ермаков М.З., Фейгин В.И., Сухоруков Н.А. Прессование профилей из алюминиевых сплавов. - М.: Металлургия, I977, С.82
2. Перлин И.Л., Райтбарг Л.Х. Теория прессования металла. - М.: Металлургия, I975.
3. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. – М.: Металлургия, I976; С. 441-444.

8.8. КОНТРОЛЬНЫЕ В0ПРОСЫ

1. Какие способы прессования вам известны?
2. Из чего складывается полное усилие прессования при прямом и обратном способах?
3. Как зависит сопротивление деформации от температуры и длительности деформации?
4. Как проводится тарировка силоизмерителя и расшифровка осциллограмм?
5. Из каких элементов состоит месдоза?
6. Как объяснить снижение сопротивления деформации по направлению к каналу матрицы?

Лабораторная работа 9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ В ОТПРЕССОВАННОМ ИЗДЕЛИИ ПРИ ПРЕССОВАНИИ ПРЯМЫМ, ОБРАТНЫМ СПОСОБОМ И С АКТИВНЫМ ДЕЙСТВИЕМ СИЛ ТРЕНИЯ

(2 часа)

9.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомление с методикой определения конечных деформаций в прессизделии и установление основных закономерностей распределения деформации в поперечном сечении и по длине прессизделий при различных способах прессования.

9.2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Основным видом напряженного состояния деформируемого прессованием металла в пластическое зоне является всестороннее неравномерное сжатие. Однако на некоторых участках обрабатываемого объема металла, вследствие неравномерности деформации, имеет место другой вид напряженного состояния.

При прессовании деформированное состояние металла в пластической зоне определяется двумя укорочениями и одним удлинением. Удлинение в большей части пластической зоны, где имеет место всестороннее сжатие, пассивно, так как происходит без приложения растягивающих сил в направлении удлинения,

Для изучения деформации применяют различные экспериментальные методы исследования: координатной сетки, визиопластичности, составных образцов, вставок, структурный, поляризационно-оптический (фотопластичность), "муар", измерения твердости.

К аналитическим методам исследования относятся методы линий скольжения, конечных элементов, характеристик и т.д..

Наиболее наглядно закономерности деформированного состояния наблюдаются на образцах с нанесенными на диаметральной плоскости координатными сетками (рис. 9.1).

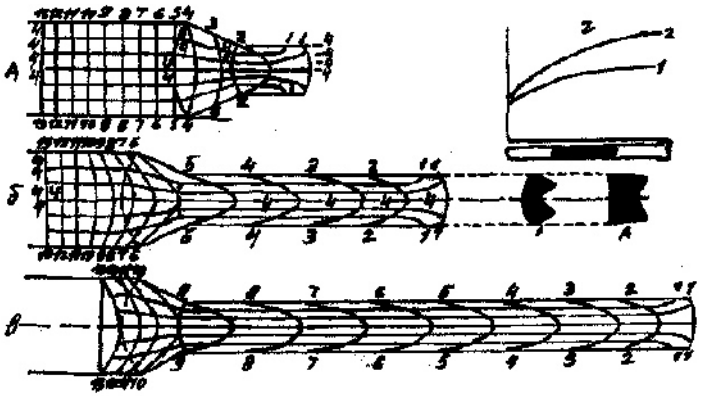


Рис. 9.1. Общая схема координатных сеток и деформированного состояния прессуемого металла А - в начале; Б - в середине; В - в конце основной стадии течения; Г - схема эпюры главных деформаций удлинения у выхода из обжимающей части пластической зоны; Д - схема эпюры главных деформаций удлинения по диаметру прессизделия; Б -схема изменения величин главных деформаций удлинения вдоль прессизделия; I - осевой слой; П -периферийный слой.

Основные положения деформированного состояния:

1. Все прямые продольные линии начальной координатной сетки, оставаясь, за исключением переднего конов, практически прямыми после прессования, претерпевают изгибы у входа в обжимающую часть пластической зоны и у выхода из этой части.

2. Эти изгибы направлены во взаимно противоположные стороны, что свидетельствует о немонотонности деформации.

3. Закономерность изменения углов свидетельствует об уменьшении немонотонности деформации от периферии к центру.

4. Торцовые поверхности обжимающей части пластической зоны представляют собой плавные осесимметричные поверхности, выпуклость которых направлена против движения прессуемого металла.

5. На некотором расстоянии от обжимающей части пластической зоны продольные линии сетки изгибаются по направлению к оси заготовки, образуя пережимы, утонения центральных и утолщения периферийных слоев, что объясняется влиянием контактных сил трения.

6. Все прямые поперечные линии координатной сетки изгибаются выпуклостью в направлении движения прессуемого металла, что объясняется отставанием периферийных слоев металла от центральных.

7. Наблюдается рост стрел прогиба поперечных линий в направлении от переднего конца к заднему.

8. Формы изгибов линий показывает, что все кольцевые слои прессизделия подвергаются, кроме основных деформаций (осевой и поперечной), деформации простого сдвига, которая растет от внутренних слоев к периферии.

9. Передний конец прессизделия всегда деформирован значительно меньше, чем его основная часть.

Процесс прессования с обратным истечением существенно отличается от прямого, поскольку на характер течения металла оказывает влияние отсутствие сил контактного трения. В этом случае пластическая деформация заготовки начинается около самой матрицы, что приводит к искажению поперечных линий координатной сетки только вблизи матрицы.

Такая локализация пластической деформации около матрицы заметно уменьшает неравномерность деформации в изделии как по длине, так и по сечению прессизделий, так как каждый из поперечных слоев, кроме торцовых, испытывает практически одинаковые деформации.

При обратном процессе прессования на большей части прессизделия вытяжки осевых слоев от переднего конца растут заметно менее интенсивно, чем у изделия, полученного при прямом истечении.

При прессовании с активным действием сил трения (СПАТ) наблюдается более равномерное распределение деформации в поперечном сечении прессизделий, что объясняется влиянием сил трения, направленных в сторону истечения металла.

При больших значениях величины кинематического коэффициента K_w, определяемого отношением скоростей движения контейнера и прессштемпеля (около двух), возможно получить деформацию в осевом слое выше, чем на периферии.

Перемещение контейнера в начале процесса позволяет лучше проработать передний конец прессизделий по сравнению с другими традиционными процессами прессования.

На деформированное состояние большое влияние оказывают условия процесса. К этим условиям относятся: сопротивление деформации прессуемого металла в пластической зоне, теплоемкость и теплопроводность прессуемого металла, структура и степень гетерогенности прессуемого металла, температура прессуемого металла и контейнера, размеры заготовки, величина деформации, скорость истечения, силы трения на контактной поверхности, форма прессового инструмента и др.

Для подсчета локальной деформации прессизделий удобно пользоваться интегральными показателями:

для поперечной деформации - $i_1 = \ln\frac{a_1}{a_0}; i_2 = \ln\frac{a_2}{a_0}; ... i_n = \ln\frac{a_n}{a_0}$,

для продольной деформации - $i_1' = \ln\frac{l_1}{l_0}; i_2' = \ln\frac{l_2}{l_0}; ... i_n' = \ln\frac{l_n}{l_0}$.

В зависимости от распределения деформации будут формироваться качественные показатели прессизделий.

Качество прессованных изделий, определяемое ГОСТами и ТУ, характеризуется уровнем механических свойств, макро- и микроструктурой, плотностью, геометрическими размерами и допусками на их отклонения по габаритным размерам изделия и его сечения, продольной геометрией и т. п.

Для обеспечения повышенного качества прессизделий необходимо равномерное распределение деформации как в продольном, так и в поперечном направлениях, о равномерности распределения деформации можно судить по размерам отпрессованного полуфабриката.

Ввиду того, что размеры очка матрицы определяются с учетом номинальных размеров изделия, плюсового допуска на данный размер и уменьшения размеров за счет утягивания, растяжения при правке и температурной усадки, то размеры прессизделия не будут постоянными по всей его длине.

Особенно большое влияние на размеры прессизделия оказывает температура прессизделия.

При различных способах прессования тепловыделение в процессе деформации будет существенно отличаться, что отразится на размерах прессизделия.

Изменение поперечных размеров можно оценить величиной Δ, равное разности размера в текущем сечении и номинального размера прессизделия:

$$\Delta = d - d_{\text{т}}. \tag{9.1}$$

Качественный анализ полученных закономерностей позволяет отметить участки интенсивного изменения поперечных размеров по длине изделий. Особенно следует обратить внимание на области выходного и утяжинного концов прутков.

Характер изменения величины Δ по длине прессизделий взаимосвязан с условиями трения в контакте пары заготовка-контейнер.

9.3. ОБОРУДОВАНИЕ, ИНСТРУМЕНТ, ОБРАЗЦЫ

Данная работа проводится на гидравлическом прессе модели ДБ2432А усилием 1,6 МН на разъемных образцах с нанесенной на диаметральной плоскости координатной сеткой диаметром 49 мм и высотой 80 и 100 мм из технически чистого свинца. Схемы установок с инструментальной наладкой приведены в работах 7 и 8. Установки позволяют проводить прямое (а), обратное (б) (рис. 8.3) и СІ1АТ (рис. 10.4) прессование.

Прямое прессование осуществляется при неподвижном закреплении на столе пресса контейнера и матрицы.

Обратное прессование проводится при прессовании по схеме рис. 8.3,б при закрытых дросселях и при условии, когда $K_w = \frac{W_к}{W_п} = 1$. СПАТ осуществляется при открытом дросселе.

Описание установки и порядок ее работы в режиме СПАТ приведены в работе 8.

Прессование проводится из контейнера Ø50 мм через плоскую матрицу $\lambda_{ср}$=10, 15 и 20.

9.4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ И УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

1. На бригаду из 2 - 3 студентов выдаются индивидуальное задание и три разъемных образца диаметром 40, длиной 80 - 100 мм.

Индивидуальное задание выбирается преподавателем из сочетания трех параметров процесса: коэффициента вытяжки $\lambda_{ср}$, высоты образца и величины кинематического коэффициента K_w (табл. 9.1).

2. Изучить инструкции по работе на гидравлическом прессе, сборку и разборку инструментальной оснастки.

3. Подготовить образец и оснастку к эксперименту: обезжирить их и нанести меловой слой.

4. Собрать последовательно инструментальную наладку согласно схеме; ввести образец и отпрессовать его до высоты прессостатка 40 мм.

Таблица 9.1

Варьируемые параметры процесса – прессования

№ варианта	Коэффициент вытяжки, $\lambda_{ср}$			Высота образца, мм		Способ прессования и кинематический коэффициент, K_w				
	10	15	20	80	100	Прямой	Обратный	K_w 1,1	1,4	1,8
1	+			+		+	+	+		
2	+			+		+	+		+	
3	+			+		+	+			+
4		+			+	+	+	+		
5		+			+				+	
6		+			+				+	

При прессовании по схеме СПАТ замерить положение плунжера до прессования и после с целью определения величины утапливания для подсчета среднего значения кинематического коэффициента K_w:

$$K_w = \frac{H_{пл.ут} + H_{отп}}{H_{пл.ут}}. \qquad (9.2)$$

где $H_{пл.ут}$. - величина утапливания плунжера при прессовании, мм;

$H_{отп}$. - отпрессованная высота заготовки, мм.

5. Разобрать инструмент, освободить матрицу от прутка и прессостатка, подготовить инструмент для следующего образца и отпрессовать его согласно выданному заданию.

9.5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На инструментальном микроскопе типа УИМ-23 провести замеры расстояния между продольными линиями сетки и поперечными линиями сетки по оси (рис. 9.2). Данные замеров занести в табл. 9.2.

Замеры на расстоянии не менее 5 мм от прессостатка, 100 мм от прессостатка и 20 мм от выходного конца.

С целью проведения статистической обработки в каждом сечении провести не менее трех замеров для каждого значения.

Таблица 9.2

Протокольные данные осциллографирования процесса прессования

Способ прессования, номер пересечения	Место замера	База сетки ,a_0, мм	Отчет по нонису для «а»						Среднестатистическое значение “а”	Доверительный интервал	Отчет по нониусу,l		l, мм	i	i’	Отчет по нонису дл		Среднестатистическое значение,
			Исходные в сеч			конечные					Исходные	конечные				Исходные	конечные	
			1	2	3	1	2	3										
Прямое	В.к.																	
	сер																	
	ут																	
Обратное																		
СПАТ																		

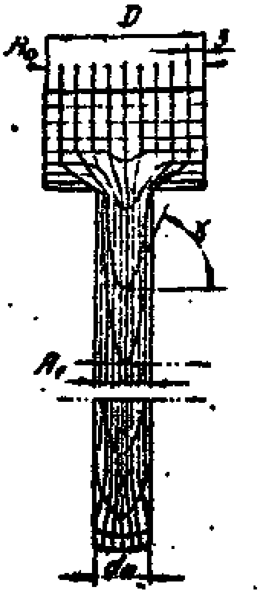


Рис. 9.2. Схема искажений линий координатной сетки в сечении отпрессованных образцов; стрелками указаны направления измерений расстояний между продольными и поперечными (на оси) линиями сетки a_o , a и l.

9.6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Конспект теоретической части работы.

2. Таблицы, содержащие результаты замеров делительной сетки и диаметров прутков.

3. Графические зависимости: $i = f\left(\frac{r_{\text{Т}}}{r_{\text{О}}}\right)$; $i' = f\left(\frac{l_{\text{Т}}}{l_{\text{О}}}\right)$; $\alpha = f\left(\frac{l}{d}\right)$.

4. Выводы, содержащие:

в) констатирующую часть (что получено);

б) теоретическое объяснение закономерностей по изменению распределения деформации при прямом, обратном и СПАТ способах прессования в продольном и поперечном направлениях.

9.7. ЛИТЕРАТУРА

Перлин И.Л., Райтбарг Л.Х. Теория прессования металла. – М.: Металлургия, 1975, С. 48-57.

9.8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как распределяется деформация в прессизделии от выходного к утяжинному концу?
2. Какой вид деформированного и напряженного состояний при прессовании?
3. Сформулировать основные положения деформированного состояния.
4. Какие особенности распределения деформации при прямом, обратном и СПАТ способах?
5. От чего зависят исполнительные размеры прессизделия и какие закономерности их изменения при различных способах прессования?
6. Как определяются конечные деформации (локальная вытяжка) при прессовании?

Лабораторная работа 10

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СИЛЫ ПРИ ПРЕССОВАНИИ С АКТИВНЫМ ДЕЙСТВИЕМ СИЛ ТРЕНИЯ

(2 часа)

10.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомление с методикой определения усилий на прессштемпеле, контейнере и матрице при прессовании с активным действием сил трения и установление закономерностей их изменения в процессе прессования.

10.2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Одним из способов существенного уменьшения структурной неоднородности в прессизделии за счет повышения равномерности течения металла является процесс прессования с активным действием сил трения. Отличительной особенностью этого процесса является опережающее по отношению к подвижному прессштемпелю движение контейнера, что обеспечивает наведение на поверхности заготовки сил трения, направленных в сторону истечения металла.

Соотношение скоростей перемещения контейнера w_K и прессштемпеля W_n характеризуется величиной кинематического коэффициента K_w.

Процесс прессования с активным действием сил трения позволяет увеличить предельные скорости истечения периферийных слоев слитка и уменьшить неравномерность деформаций по сравнению с традиционными прямым и обратным способами прессования. Так, при прессовании алюминиевых труднодеформируемых сплавов Д16, АМГ6 и других при переходе от прямого способа прессования удалось:

- снизить полное усилие прессования на 15-20 %, температуру прессования на 10-20 %, минимально необходимую вытяжку в 3-4 раза (с 7-12 до 2,5-в), показатель неравномерности деформации в поперечном сечении изделий в 4-5 раз и устранить крупнокристаллический ободок;
- повысить скорости истечения металла в 3-5 раз, выход годного на 20-25%, съем с пресса в 2-2,5 раза;
- повысить уровень свойств прессизделий с выравниванием их; распределения по длине и сечению.

Особенностью процесса прессования с активным действием сил трения (СПАТ) является наличие интенсивного течения металла вблизи втулки контейнера. Это позволяет устранить зону затрудненной деформации в угловой полости между контейнером и матрицей, позволяет снизить градиент скоростей течения металла в центральной и периферийной зонах.

Характер течения металла зависит от кинематических условий, выраженных через величину кинематического коэффициента K_w.

При увеличении этого коэффициента с 1,1 до 1,6 происходит возрастание продольной скорости металла вблизи контейнера и ее некоторое замедление в осевой области слитка, что позволяет увеличить предельную скорость истечения металла через очко матрицы.

Такой характер течения металла в условиях периферийного подпирающего воздействия металла на осевую область слитка обеспечивает дополнительное обжатие металла в нижней части очага деформации, что положительно отражается на прочностных и пластических показателях прессованного металла.

К преимуществам процесса СПАТ относится наличие благоприятных условий для более равномерного течения металла по сечению пресс-изделия. Таким условием является распространение деформации сжатия практически по всему деформирующемуся объему. Это позволяет расширить скоростной порог истечения труднодеформируемых сплавов в условиях трещинообразования.

Известно, что при прямом способе прессования в центральной области заготовки наблюдаются деформации растяжения.

Деформационно-силовой режим процесса СПАТ, как и любой традиционный процесс, зависит от прочностных и пластических характеристик материала, температуры деформации и характера распределения тепловых полей в деформируемом объеме, температуры нагрева инструмента, величины и направления напряжения пластического трения, степени деформации, формы и состояния поверхности инструмента, формы и соотношения поперечных размеров прессуемых профилей, размеров исходной заготовки, скоростных параметров процесса.

Полное усилие прессования при СПАТ складывается из тех же составляющих, что и при прямом прессовании, и отличается только их значениями и знаком сил деформационного трения.

Полное усилие распределяется пропорционально между прессштемпелем $P_п$ и контейнером $P_к$, отсюда:

$$P_а = P_п + P_к. \qquad (10.1)$$

Из анализа силовых графиков и характера течения металла можно наметить четыре характерные стадии процесса (рис. 10.1): 1-я стадия - распрессовка заготовки в контейнере до момента начала истечения; 2-я стадия - начало истечения и формирование зон в деформируемой заготовке; 3-я стадия - условно установившееся течение материала через канал матрицы; 4-я стадия (завершающая) - нестационарное истечение остаточной части заготовки.

Для начала 1 - й стадии процесса характерно отсутствие усилия на контейнере, так как этому моменту соответствует период, когда заготовка не соприкасается со втулкой контейнера, и только после соприкосновения заготовки начинается рост усилия на втулке контейнера. 2-я стадия сопровождается развитием сдвиговой деформации, приводящей к росту максимального значения усилия на контейнере и матрице.

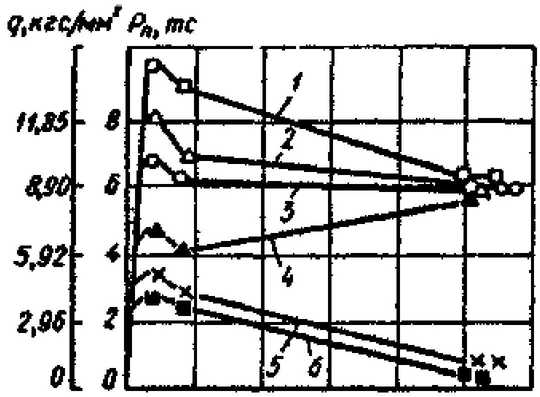


Рис. 10.1. Диаграмма усилий и сил трения при прессовании без смазки; 1 - усилие при прямом способе; 2 - усилие при активном способе; 3 - усилие при обратном способе; 4 - усилие прессования на прессштемпеле при активном способе; 5 - сила трения на контейнере при активном способе; 6 - сила трения на контейнере при прямом способе.

При СПАТ матрица воспринимает полное усилие прессования, которое в определенной пропорции распределяется между контейнером и прессштемпелем.

Для 3 - й стадии истечения характерны плавное снижение усилий на контейнере и плавный рост усилия на прессштемпеле. Снижение усилия на контейнере объясняется уменьшением контактной поверхности заготовки, а рост усилия на прессштемпеле - тем, что к завершающей стадии большую долю работы для осуществления основной деформации затрачивает прессштемпель.

Для 4 - й, завершающей стадии характерно резкое снижение усилия на контейнере и его возрастание на прессштемпеле.

Отношение усилий на прессштемпеле и контейнере зависит от кинематического коэффициента, скорости прессования и коэффициента вытяжки. Так, с увеличением коэффициента вытяжки значение $P_к/P_п$ уменьшается, а с увеличением K_w - увеличивается (рис. 10.2).

Установление этих зависимостей необходимо для выбора оптимальных параметров силовых приводов специализированных прессов для СПАТ.

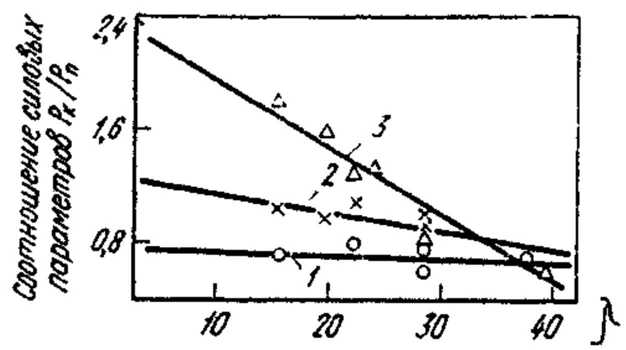


Рис.10.2. Распределение усилий между контейнером и пресс-штемпелем в зависимости от коэффициента вытяжки $\lambda_{ср.}$ и кинематического коэффициента K_w*:* 1 - 1,06; 2 - 1,18; 3-1,28.

Из сопоставления трех традиционных способов прессования установлено, что соотношение суммарных усилий при обратном, СПАТ и прямом способах имеет вид 1:1, 1:1,9. Максимальная нагрузка на контейнер при сопоставлении обратного, активного и прямого способов прессования имеет соотношение 1:1, 9:2,6. Наибольшие нагрузки контейнер испытывает в начальной стадии, а к концу процесса в связи с уменьшением контактной поверхности заготовки и инструмента усилие на нем снижается в 5 – 6 раз.

Учитывая, что процесс СПАТ можно проводить в различных кинематических условиях, то наиболее корректно оценку правильности выбора того или иного решения проводить по затратам энергии на перемещение силовых органов оборудования.

Сопоставление значений энергии, затраченной на перемещение прессштемпеля и контейнера, при различных значениях кинематического коэффициента и при различных условиях их изменения, при прочих равных условиях, позволяет оценить энергоемкость элементов привода.

Работа, совершаемая элементом привода при перемещении, вычисляется из выражения:

$$E = \int_0^S P(S) \cdot \alpha s \,, \qquad (10.2)$$

где P - текущее (по перемещению) значение полного усилия на элементе привода.

Вычисление экспериментального значения величины работы, затрачиваемой на перемещение рабочих органов пресса, необходимо производить с использованием правила трапеций или по обобщенной формуле Симпсона:

$$E = \int_0^S P(S)\, \alpha s = \Delta S \cdot \left(\frac{P_O}{2} + P_1 + P_2 + \ldots + P_{n-1} + \frac{P_n}{2} \right), \qquad (10.3)$$

где ΔS - шаг интегрирования, выбирается равным одному шагу измерения перемещений соответствующего годографа.

Величина энергии вычисляется в единицах системы СИ - джоулях. Геометрическая интерпретация правила трапеций дана на рис. 6.3: площадь криволинейной трапеции заменяется суммой площадей прямолинейных трапеций.

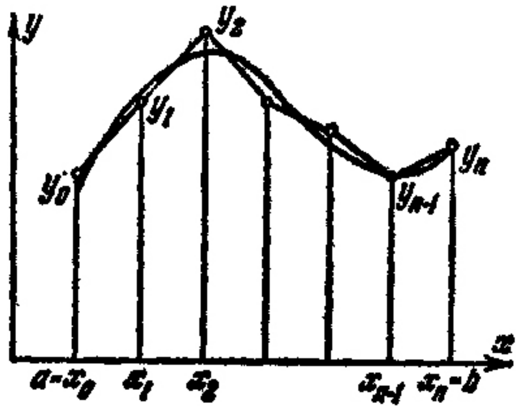


Рис. 10.3. Применение правила трапеций для вычисления работы, совершаемой элементами привода инструмента при прессовании.

Если значения функция измерены не в равноотстоящих точках, то правило трапеций можно применять в виде:

$$E = \int_0^S P(S)\, \alpha s \approx \sum_{i=0}^{n-1} \frac{P_i + P_{i+1}}{2} \Delta S ,$$

где $\Delta S = H_{i+1} - H_i \quad (i = 0,1,2,\ldots n-1)$.

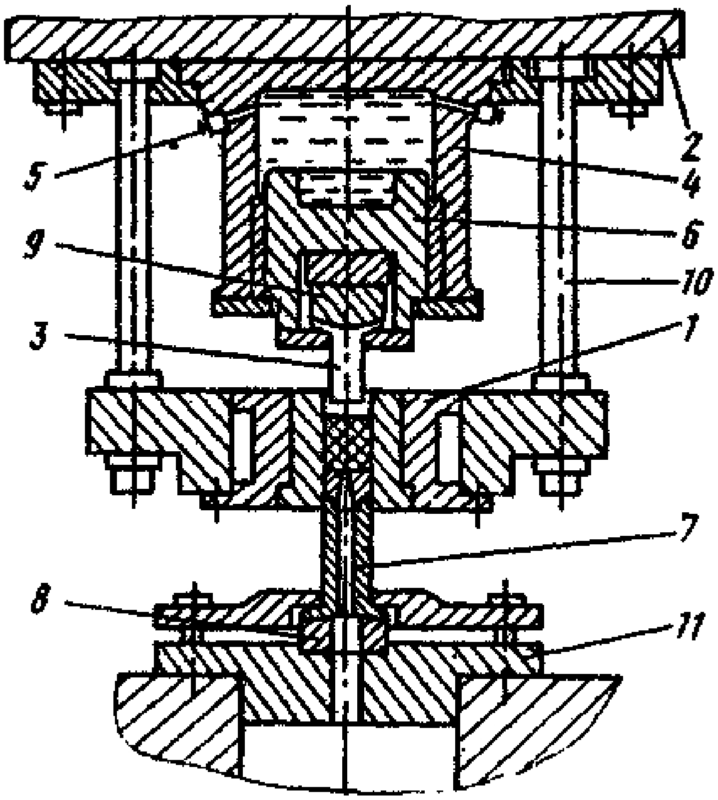


Рис. 10.4. Схема установки для СПАТ прессования на безе пресса ДБ2432А усилием 1600 кН.

10.3. ОБОРУДОВАНИЕ, ИНСТРУМЕНТ, ОБРАЗЦЫ

Данная работа проводится на гидравлическом прессе модели ДБ2432А усилием 1,6 МН на сплошных заготовках диаметром 49 мм и высотой 100 мм из технически чистого свинца.

Схема установки, установленной на прессе для СПАТ, представлена на рис. 10.4.

Оригинальное устройство установки позволяет получить два различных по скорости движения на прессе простых действия; относительно большую скорость перемещения получает контейнер от траверсы пресса и меньшую скорость прессштемпель, который перемещается плунжером цилиндра, размещенного на траверсе пресса. Разность скоростей перемещения обеспечивается за счет выпуска жидкости из цилиндра подпора через дроссельное устройство.

На рис. 10.4 выполнение условий $W_к > W_п$ достигается тем, что контейнер 1, связанный с подвижной траверсой 2, опережает пресс-штемпель 3 благодаря работе цилиндра подпора 4 с независимым от давления расходом жидкости через дроссель 5.

В этом случае обеспечивается самостоятельное движение плунжера 6 внутрь цилиндра. Прессштемпель с прессшайбой 3 и неподвижный матрицедержатель 7 с матрицей опираются на шаровые поверхности месдоз 8 и 9, причем контейнер укреплен с помощью колонн 10 на траверсе, а матрицедержатель - на опорной плите II. На колоннах 10 наклеены датчики для замера усилий на контейнере. Измерение усилий на прессштемпеле и матрице осуществляется с помощью месдоз 8 и 9.

Установка оснащена регистрирующей и тензометрической аппаратурой для записи силовых параметров и перемещений контейнера и прессштемпеля.

Для регистрации перемещений установка оснащена двумя ходографами.

10.4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ И УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

На бригаду из 2-3 студентов выдаются индивидуальное задания и три сплошных образца диаметром 49 мм и длиной 100 мм. Индивидуальное задание выбирается преподавателем из сочетания трех параметров процесса: коэффициента вытяжки λ_{cp}, величины кинематического коэффициента K_W и угла конусности матрицы 2α (табл. 10.1).

1. Изучить инструкцию по работе на гидравлическом прессе, сборку и разборку инструментальной наладки.

2. Включить электрическую измерительную аппаратуру для прогрева в течение 15-20 мин.

3. Обезжирить образцы и инструмент для получения максимальных сил трения.

4. Собрать инструментальную наладку по схеме рис. 10.4; ввести образец в полость контейнера, установить дросселем заданную величину K_w включить регистрирующую аппаратуру и пропрессовать образец с записью усилий на прессштемпеле и контейнере и перемещений на контейнере и прессштемпеле на осциллограмму.

5. Разобрать инструмент, освободить матрицу от прутка и прессостатка, подготовить инструмент для следующего образца, установить заданное значение K_w отпрессовать следующий образец с записью изучаемых параметров на осциллограф и т.д.

Таблица 10.1

Варьируемые параметры процесса давления

№ варианта	Коэффициент вытяжки, $\lambda_{ср}$			Кинематический коэффициент, K_W			Угол конусности матрицы, 2α, градусы		
	1	2	3	I	II	III	120	150	180
	10	15	20	1,05	1,1	1,2			
				1,2	1,3	1.4			
				1,6	1,7	1,8			
1	+			+					+
2		+			+			+	
3			+			+	+		
4		+			+				+
5			+	+			+		
6	+					+		+	

10.5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Обработать кривые, зарегистрированные на осциллограммах, по стандартной методике, согласно рис. 10.5.

Результаты замеров занести в таблицу 10.2. Типовая осциллограмма представлена на рис. 10.5.

По результатам расшифровки построить графики зависимостей изменения усилия

$$P = f\left(\frac{H_T}{H_0}\right), \quad \frac{P_K}{P_П} = f\left(K_W\right).$$

Таблица 10.2

Протокольные данные осциллографирования процесса прессования

Варианты прессования	Усилие на пресс-штемпеле, кН Отношение отскока, мм к усилию, кН				Усилие на контейнере, кН Отношение отскока, мм к усилию, кН				Отношение усилий контейнера и пресс-штемпеля, $P_к/P_п$			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
K_{w1}												
K_{w2}												
K_{w3}												

С использованием метода трапеций по построенным графикам провести расчет энергозатрат и сопоставить их.

10.6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Конспект теоретической части работы.
2. Типовая диаграмма изменения усилий при СПАТ с разбивкой ее по стадиям.
3. Таблицы, содержащие результаты измерения усилий на прессштемпеле, контейнере и на различных участках.

4. Графические зависимости $P = f\left(\frac{H_T}{H_0}\right), \quad \frac{P_K}{P_П} = f\left(K_W\right), \; E = f\left(K_w\right)$.

5. Выводы, содержащие:
а) констатирующую часть (что получено);
б) теоретическое объяснение полученных зависимостей.

10.7. ЛИТЕРАТУРА

Перлин И.Л., Райтбарг Л.Х. Теория прессования металлов. М.: Металлургия, 1975, с.124-126, 342-843.

10.8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Отличительная особенность процесса СПАТ. Из чего складывается полное усилие прессования с активным действием сил трения?
2. От чего зависит характер течения металла при СПАТ?
3. Какие преимущества и недостатки процесса СПАТ по сравнению с традиционными процессами?
4. Какие характерные стадии процесса СПАТ?
5. Как определяются затраты энергии на перемещение контейнера и прессштемпеля?
6. Как объяснить закономерности изменения $P = f\,(Hт/Hо)$ и $Pк/Pп = f\,(K_w)$?

Лабораторная работа 11

ИЗУЧЕНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

(2 часа)

11.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Закрепить и углубить знания по изучению неравномерности деформации, в частности:

1) Оценить влияние различных факторов (сил трения, конфигурации образцов перед деформацией и неравномерности механических свойств по объему образца) на неравномерность деформации и пластичность сплава.

2) Приобрести практические навыки работы на инструментальных микроскопах, лабораторном оборудовании (п. 11.3).

3) Научиться самостоятельно анализировать причины разрушения сплавов в процессах ОМД.

11.2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Деформация материалов при пластической деформации образцов протекает, как правило, неравномерно. При рассмотрении процессов деформации отдельных зерен, субзерен, гранул и т.д. говорят о микронеравномерности деформации. Различие степени деформации материала в зонах, соизмеримых по размерам с самими образцами, характеризует макронеравномерность деформации, называемую ниже просто неравномерностью деформации 1-3.

Неравномерность деформации вызывается следующими причинами:

1. Силами трения, действующими на контактной поверхности образца и препятствующими относительному смещению деформируемого материала относительно поверхности инструмента.

2. Конфигурацией образца: с усложнением его формы неравномерность деформации увеличивается.

3. Конфигурацией инструмента: с усложнением формы рабочей поверхности инструмента неравномерность деформации увеличивается.

4. Различием механических свойств в объеме образца или различием напряжения течения материала в разных зонах объема образца, что может быть вызвано, например, различием химического состава или температуры в этих зонах.

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

При этом следует иметь в виду следующие отрицательные явления, которые связаны с неравномерностью деформации при обработке металлов и сплавов давлением:

1. Разрушение заготовки во время пластической деформации или потеря правильной геометрической формы (искажения разного рода и т.п.).

2. Превышение степени деформации выше некоторого критического значения, которое приводит к образованию крупнокристаллической структуры после горячей деформации или при последующей термообработке.

3. Недостаточная проработка исходной (например, литой) структуры.

Разрушение заготовки объясняют существенным различием скоростей течения материала в соседних зонах заготовки и возникновением при этом т.н. «дополнительных» направлений в заготовке. В результате неравномерной деформации отдельные слои и элементы заготовки, изменяя свои размеры, взаимно влияют друг на друга. Т.о., неравномерность деформации ведет к возникновению неоднородного напряженного состояния. С.И. Губкиным сформулировано следующее положение (1, с. 168-171): «При любом пластическом изменении формы в слоях и элементах тела, стремящихся к большому изменению размеров, возникают дополнительные напряжения, знак которых отвечает уменьшению размеров, а в слоях и элементах тела, стремящихся к меньшему изменению размеров, возникают дополнительные напряжения, знак которых отвечает увеличению размеров».

Так, при деформации композита, состоящего из двух материалов с различными прочностными свойствами, в материале с большим напряжением течения, следовательно, менее податливом, возникают дополнительные напряжения растяжения, которые приводят порой к разрушению.

11.3. ОБОРУДОВАНИЕ, ИНСТРУМЕНТ, МАТЕРИАЛЫ

1. Стан ДУО-150.
2. Пресс усилием 0,4 Мн.
3. Инструментальный микроскоп.
4. Штангенциркуль.
5. Специальные образцы (рис. 11.1).

5.1. Образец 1 из малоуглеродистой стали со штифтом ∅10х60 из того же материала.

5.2. Образец 2 из малоуглеродистой стали, отожженной при 930^0С, размеры ∅30х10.

11.4. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Эскизирование образцов по деформации (входит в самостоятельную подготовку к работе).

2. Проведение измерений по изучению неравномерности деформаций при сжатии образца шероховатыми плитами (рис. 11 а).

Деформация штифта (см. рис. 11 а) описывает неравномерность деформации по высоте образца в осевой зоне и определяется следующим выражением:

$$\varepsilon = \frac{h - h_o}{h_o} = \frac{h}{h_o} - 1 = \frac{d_o^2}{d^2} - 1. \qquad (11.1)$$

Причем средняя по высоте деформация образца

$$\varepsilon_{ср} = \frac{H - H_0}{H_o}. \qquad (11.2)$$

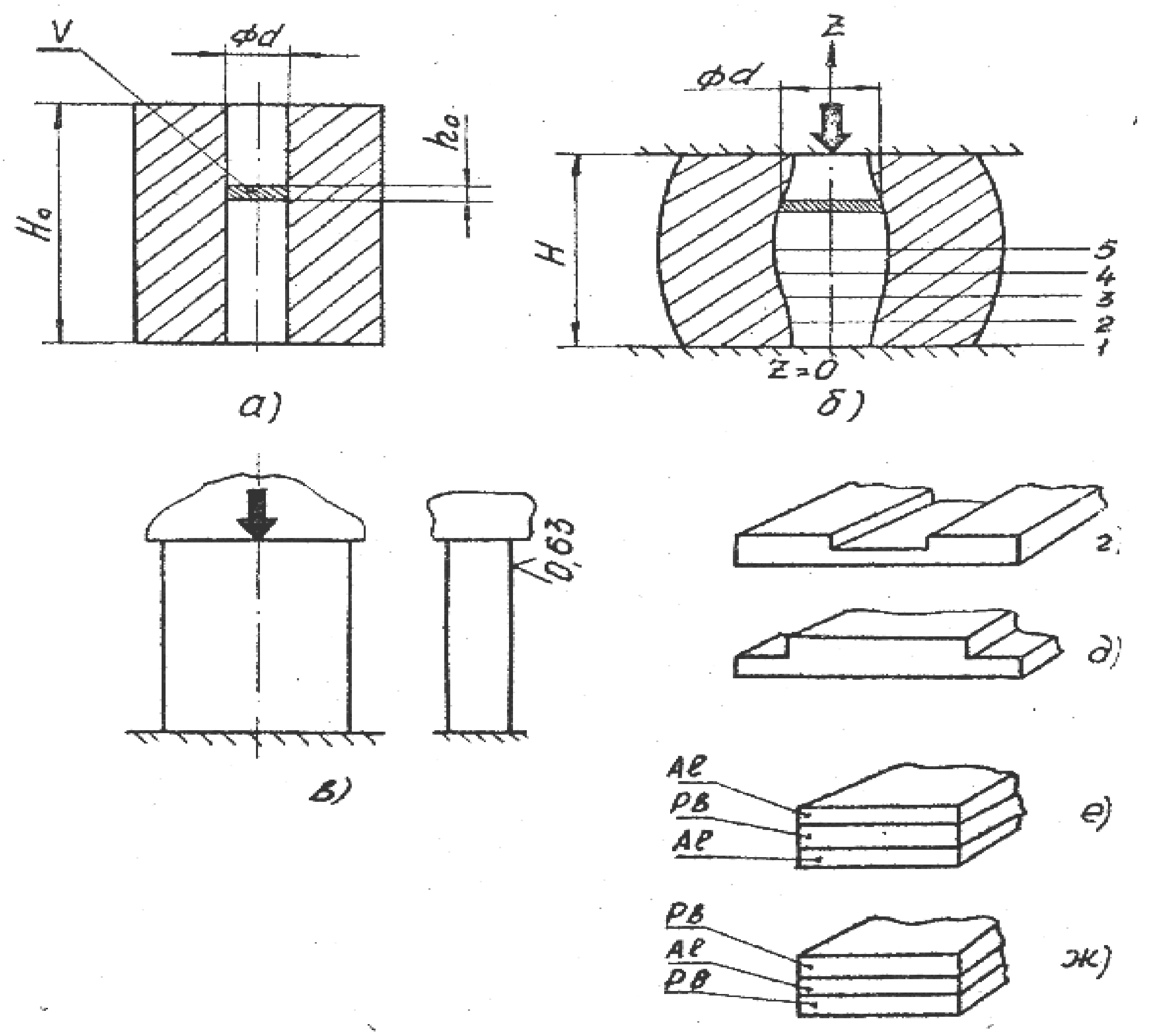


Рис. 11.1. Образцы для выполнения работы: а) и б) - образец 1 до и после деформации (метод штифта); в) образец 2 для определения полей линии скольжения; г), д), е), ж) - образцы 3 - 6 для деформации на стане продольной прокатки.

Измерения диаметров штифта d_0,, d проводятся на микроскопе, измерение высоты образца в начальном H_o и конечном H положениях – штангенциркулем, данные заносятся в табл. 11.1. (с. 1-4)

3. Выполнение опыта по экспериментальному определению полей линий скольжения (см. рис. 11 в).

Таблица 11.1

Определение деформаций штифта

№	Расстояние от тор-ца образца, Z (мм)	Данные измерения (мм)		Диаметр d = (3) – (4), (мм)	ε
1	2	3	4	5	6

Образец из малоуглеродистой отожженной стали полируется с одного торца, нагревается при 200-300 ^{0}C в печи с целью получения тонкого окисленного слоя. Во время работы образец осаживается на 5-10% (см.рис.11 в), поверхность образца слегка обрабатывается наждачной бумагой, полученное поле линий скольжения зарисовывается.

4. Прокатка образцов на стане с цилиндрическими валками (см. рис. 11, г-д). После деформации образцов необходимо заэскизировать их, качественно описать характер разрушений и дефектов.

11.5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Заполнить недостающие колонки в табл. 11.1, построить график зависимости $\varepsilon = f(z)$, рассчитать среднюю степень деформации $\varepsilon_{ср}$.

2. Сделать выводы относительно поля линий скольжения и размеров очага деформации.

3. Анализировать причины разрушения образцов (рис. 11, г-д) и механизм действия дополнительных напряжений.

11.6. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ ПО РАБОТЕ

Оформление отчета должно соответствовать общим требованиям, предъявляемым к лабораторным работам – записи делаются аккуратно, черным или синим цветом, рисунки, графики – в карандаше на миллиметровой бумаге, наклеиваемой на лист отчета. Таблицы должны иметь номер и заглавие, рисунки – номер и подрисуночные подписи. Содержание отчета должно включать название, цель работы, конспект теоретической части, используемые формулы, комментарии, рисунки. В случае значительного объема вычислений учебный мастер выдает готовые бланки протоколов испытаний, перфоленты для счета на ЭВМ или номограммы. Результаты всех расчетов округляются до трех значащих цифр.

В данном отчете предусмотрены: краткий конспект теоретической части, график $\varepsilon = f(z)$, эскизы образцов до и после деформации, выводы.

11.7 ЛИТЕРАТУРА

1. Сторожев В.М., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. – М.: Машиностроение, 1976, 424 с, С. 163-168, С. 32-39
2. Громов Н.П. Теория обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1978, С. 190-213, С. 102-107
3. Охрименко Я.М., Тюрин В.А. Теория ОМД. Часть Ш. – М.: МИСиС, 1972, С. 9-72.

11.8 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы основные факторы (причины), определяющие неравномерность деформации при ОМД?
2. Что такое макро- и микронеравномерность деформации?
3. Каковы возможные отрицательные последствия высокой неравномерности деформаций?
4. Каким образом можно определить знак дополнительных напряжений, вызванных деформацией композиционных материалов, имеющих различные прочностные свойства?
5. О чем свидетельствует разрушение образца из композиционного материала в его осевой зоне?

Лабораторная работа 12

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ ТЕЧЕНИЯ ОТ СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ МЕТОДОМ СЖАТИЯ

(2 часа)

12.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Углубить знания по изучению влияния холодной пластической деформации на напряжения течения, в частности:

- освоить стандартный метод испытаний материалов на сжатие;
- получить практические навыки работы на испытательных машинах;
- научиться пользоваться измерительным инструментом;
- закрепить навыки статистической обработки данных и аппроксимации с помощью ЭВМ.

12.2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Зависимость напряжения течения σ_s от степени деформации наиболее значительно проявляется при холодной пластической деформации, когда отсутствуют процессы разупрочнения и происходит, так называемый, «наклеп» (1, с. 73-83). Графическую зависимость $\sigma_s = \sigma_s(\varepsilon)$ называют кривой упрочнения. Развитие холодной пластической деформации сопровождается увеличением показателей прочностных свойств, одновременно уменьшаются пластические свойства, изменяются также физические и физико-химические показатели свойства сплавов.

Увеличение прочностных свойств (σ_s, $\sigma_{пу}$, $\sigma_{0,2}$, $\sigma_в$) объясняется возрастающим, по мере деформирования, сопротивлением смещению дислокаций. Дислокации одного знака накапливаются вблизи зеренных границ, которые являются значительным препятствием для движения дислокаций (2, с.39-40).

Причиной упрочнения являются также структурные изменения, например, измельчение кристаллитов, выделение в плоскостях сдвига субмикроскопических частиц (например, карбидов в стали), препятствующих процессу сдвигов внутри зерна.

Для определения зависимости $\sigma_s = \sigma_s(\varepsilon)$ обычно проводят испытания на сжатие, растяжение или кручение. Испытания на сжатие позволяют подвергать образцы относительно большим пластическим деформациям ($\varepsilon_i \le \frac{2}{3}\ln\frac{h_0}{d_0}$; h_0, d_0 – исходные высота и диаметр образца, рис. 12.1).

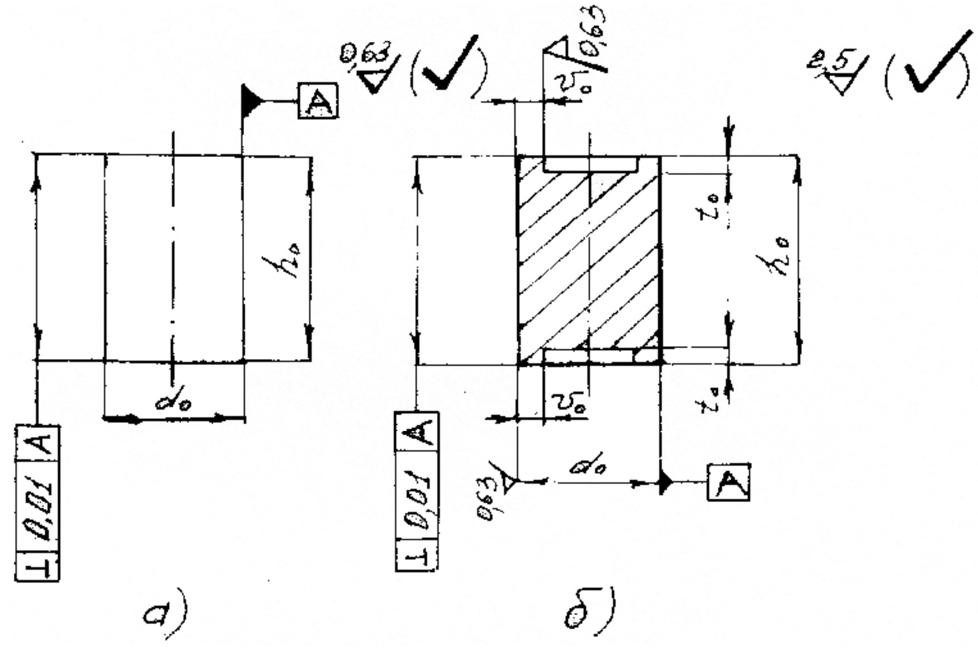


Рис. 12.1. Образцы для испытания на сжатие: а) образец 3 - го типа;
б) образец 4 - го типа.

Недостаток этого метода состоит во влиянии на результаты сил трения на торцевых контактных поверхностях. Поэтому образцы перед осадкой тщательно смазывают или делают неглубокие выточки, заполняемые густой смазкой (см. рис. 12.1). Смазку можно считать удовлетворительной, если бочкообразование образцов невелико. Его оценивают коэффициентом бочкообразования Кσ:

$$\mathrm{K}_{\sigma} = \frac{\left| \ln \frac{h_o}{h_k} - \ln \frac{A_K}{A_0} \right|}{\ln \frac{h_0}{h_K}} \le 0{,}1 \qquad (12.1)$$

В этом случае напряженное состояние можно принять линейным, и величина напряжения течения σ_S определяется в каждый момент делением усилия деформирования P на площадь поперечного сечения A:

$$\sigma_S = \frac{P}{A}. \qquad (12.2)$$

Степень деформации при сжатии определяют величиной «истинной», или логарифмированием деформации ε_l

$$\varepsilon_l = \ln \frac{h_0}{h}, \quad \varepsilon_l = \ln \frac{A_1}{A_0} = 2 \ln \frac{d}{d_0} \qquad (12.3)$$

Согласно ГОСТ 25503-80 (3) допускается использование относительной деформации: $\varepsilon = \frac{h_0 - h}{h_0}$.

При испытаниях материалов на сжатие определяют также модуль упругости, предел пропорциональности, условный предел текучести, предел прочности и др. [3].

12.3. ОБОРУДОВАНИЕ, ИНСТРУМЕНТ, МАТЕРИАЛЫ

1. Испытательные машины типа УИМ усилием 50-60 кН;
2. Самопишущий двухкоординатный потенциометр типа ПДП-04-002;
3. Микрометр;
4. Осадочные плиты, шероховатость рабочей поверхности $R_a = 1,25$;
5. Смазки:

а) Масло машинное, графит (50%) или СОЖ марки В-32К и укринол 5/5 – для образцов Ш типа (3);

б) Стеарин, парафин или воск – для образцов IV типа (3);

6. Осаживаемые образцы по ГОСТ 25503-80 (3) (рис. 12.1).

Образцы для построения кривой упрочнения: а – образец III типа; б – образец IV типа (образцы I и II типа по ГОСТ 25503-80 здесь не приведены, так как применяются для определения показателей упругой деформации. Материал образцов и их тип определяет преподаватель. Диаметр образцов d_0 = 5-20 мм. Высота h_0 – определяется расчетом из условия обеспечения допускаемой устойчивости:

$$h_0 = 2{,}24 d_0 \frac{\sqrt{m}}{\upsilon}. \quad (12.4)$$

где m – показатель деформационного упрочнения (табл. 12.1) (3);

ν - коэффициент приведения высоты (ν = 0,50 для образцов III типа,

ν = 0,76 – для образцов IV типа).

Ниже приведены исходные высоты образцов для ряда сплавов, округленные до целых.

Ширина буртика V_0 = 0,6 ±0,1 мм (см.рис. 12.1 б).

Высота буртика t_0 = 0,3±0,1 мм для всех материалов.

7. Твердомер.

12.4. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Эксперименты проводятся на гидравлических испытательных машинах усилием 50, 60 кН или прессе усилием 400 кН.

1. Получить комплект образцов у учебного мастера.
2. Изучить твердомер, измерить твердость образцов по шкалам Бринелля или Виккерса, измерить образцы и заполнить верхнюю часть табл. 12.2.
3. Ознакомиться с устройством и управлением испытательной машины и прибором для регистрации испытательных диаграмм.

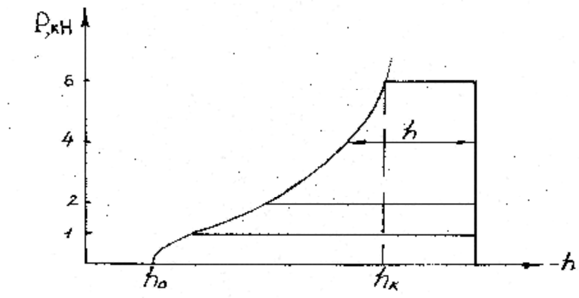


Рис. 12.2. Измерение текущей высоты образца по индикаторной диаграмме процесса сжатия

Таблица 12.1

Исходные высоты образцов h_0 при диаметре d_0 равном 10 мм

№	Материалы	Состояние материала	m	Высота h_0	
				образцы III типа	образцы IV типа
Металлы					
1.	Алюминий технич.	отожженный	0,15	17	11
2.	Медь техническая	-«-	0,47	31	20
3.	Железо техническое	-«-	0,28	24	16
Стали с содержанием углерода, %					
4.	С = 0,10÷0,25	отожженный	0,24	22	14
5.	С = 0,35÷0,75	-«-	0,18	19	13
6.	С= 0,05÷0,15	горячая прокатка	0,24	22	14
7.	С = 0,30÷0,70	-«-	0,16	18	12
Стали					
8.	65Г, 40ХНМА	горячая прокатка	0,16	18	12
9.	20Х	закалка отпуск при 650 ^{0}С	0,11	15	10

Таблица 12.2

Протокол испытания образцов для построения кривой упрочнения

Испытательная машина. Тип ________________ Записывающий прибор ____________________

Смазочный материал _______________________________________

Образцы. Тип ________________________ Состояние __________________ Твердость __________________

Начальные размеры образцов: d_0 = ______________ h_0 = ________________

<table>
<tr><td rowspan="3">№</td><td colspan="2">Нагрузка, P</td><td colspan="6">Высота образцов, h_{ij}</td><td rowspan="3"></td><td rowspan="3"></td><td rowspan="3"></td><td rowspan="3"></td><td rowspan="3"></td><td rowspan="3"></td><td rowspan="3"></td><td rowspan="3"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">кГс</td><td rowspan="2">КН</td><td colspan="2">Образец 1</td><td colspan="2">2</td><td colspan="2">3</td></tr>
<tr><td colspan="2">h_{1j}</td><td colspan="2">h_{2j}</td><td colspan="2">h_{3j}</td></tr>
<tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td><td>11</td><td>12</td><td>13</td><td>14</td><td>15</td><td>16</td><td>17</td></tr>
<tr><td>1</td><td>1000</td><td>9,810</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>2</td><td>2000</td><td>19,620</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>3</td><td>4000</td><td>39,240</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>4</td><td>6000</td><td>59,860</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

Результаты аппроксимации C = __________;

n = __________

1. Порядок испытаний приведен ниже.

Образец нагружают, например, до усилий 10, 20, 40 и 60 кН* (по шкале 1000, 2000, 4000, 6000 кгс), измеряя и записывая значения высоты образца h (столбцы 4-9 табл. 12.2) для каждой нагрузки. Перед каждым нажатием дополнительно наносят смазку, если при изменении производилась разгрузка машины.

2. При использовании регистрационного прибора ПДП-04-002 высоту образца *h* рекомендуется снимать с записанной диаграммы (рис. 12.2), а процесс нагружения вести непрерывно от 0 до 6000 кгс (60 кН). Масштаб шкалы по оси X определяют, сопоставляя перемещения пера самописца и величины рабочего хода, равного разности высот образца в начальном (P=0) и конечном положениях. Масштаб шкалы по оси У определяют, сопоставляя величину максимального перемещения пера по оси У и величину фактической максимальной нагрузки испытательной машины.

Определив значения ординат, соответствующие заданным нагрузкам, находят по графику значения h (см. рис. 12.2). Для работы удобно найти положение пера при сомкнутых бойках, когда h = 0. В течение всего эксперимента подстройку прибора (изменение масштабов записи и пр.) производить нельзя!

3. После окончания эксперимента выключить испытательную машину и приборы, протереть бойки, сдать инструменты и пособия.

12.5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Результаты измерений высоты образца h усреднить для каждой j-той нагрузки *P*:

$$h_j = \frac{h_{1j} + h_{2j} + ... + h_{nj}}{n}, \quad j = 1,2,3,...,k .$$

значения числа наблюдений в примере n=3, числа нагрузок K = 4 (табл.12.2).

Определить оценку дисперсии ошибки величины h для каждой j-той нагрузки:

$$S_{hj}^{2} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(h_{ij} - h_j\right)^2}{n-1}, \quad n = 2: \; S_{hj}^2 = \frac{\left(h_{ij} - h_{2j}\right)^2}{2}. \qquad (12.5)$$

Заполнить столбцы 10, 11 табл. 12.2. В случае значительного различия этих дисперсий проверить их однородность по критерию Кохрена (см. приложение 1).

2. Определить усредненную дисперсию ошибки измерения высоты образца h по данным всего эксперимента в целом $S_{h.}$

При этом число степеней свободы f усредненной дисперсии:

$$f = K (n - 1)$$

Если n > 2, то при вычислении величин h_j и S_h^2 целесообразно использовать ПК (см. приложение 8).

Среднеквадратичная ошибка измерения величины *h:*

$$S_h = +\sqrt{S_h^2} .$$

3. Рассчитать значения логарифмических деформаций ε_l по выражению (2), заполнив столбец 12.

4. Рассчитать величину напряжения течения σ_s для указанных нагрузок:

---

* Примечание: с учетом выбранного материала образцов и ожидаемого вида зависимости $\sigma_s = \sigma_s (\varepsilon_l)$.

$$\sigma_{Sj} = \frac{P_j}{A_j} = \frac{P}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{4P}{\pi\left(d_0^2 \frac{h_0}{h_j}\right)} = \frac{4}{\pi d_0^2 h_0} P_j h_j \qquad (12.6)$$

Измеряя усилия в ньютонах, а линейные размеры – в мм, получим значение величины σ_S в МПа (столбец 13).

5. Рассчитать погрешность величин σ_S и ε_l (см. приложение 2). Среднеквадратичные погрешности S_σ и S_ε определяются на основании известных погрешностей величин, по которым производится расчет значений σ_S и ε_l (см. выражения (12.7) и (12.2).

Основные источники погрешностей здесь – это погрешность, вызванная нестабильностью высоты образца при фиксированной нагрузке и выражаемая величиной S_h , а также погрешность силоизмерительного прибора S_p.

Эти величины включают в себя остальные погрешности, связанные с неточностью изготовления и измерения начальной высоты и диаметра образца, нестабильностью химического состава, условий смазки и пр.

Расчет ведется по следующим выражениям:

$$S_\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\partial \varepsilon_l}{\partial h_0}\right)^2 S_{h_0}^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon_l}{\partial h}\right)^2 S_h^2} = \sqrt{\left(\frac{S_{h_0}}{h_0}\right)^2 + \left(\frac{S_h}{h}\right)^2}\ . \qquad (12.7)$$

$$S_\sigma = \frac{4}{\pi d_0^2 h_0}\sqrt{\left(\frac{2Ph}{d_0} Sd_0\right)^2 + \left(\frac{2Ph}{h_0} Sh_0\right)^2 + \left(hS_p\right)^2 + \left(PS_n\right)^2}\ . \qquad (12.8)$$

Положим, что образцы изготовлены достаточно точно, тогда получим из (12.7) и (12.8):

$$S_\eta = \frac{S_h}{h};\ S_\sigma = \frac{4}{\pi d_0^2 h_0}\sqrt{\left(hS_p\right)^2 + \left(PS_h\right)^2}\ . \qquad (12.9)$$

Доверительные интервалы для величин σ_S и ε_l определяются следующим образом:

$$\Delta_\sigma = \pm \frac{S_\sigma}{\sqrt{n}} t_{\alpha,f}\ , \qquad (12.10)$$

$$\Delta_\varepsilon = \pm \frac{S_\varepsilon}{\sqrt{n}} t_{\alpha,f}\ , \qquad (12.11)$$

где $t_{\alpha f}$ - критерий Стьюдента, выбираемый при уровне значимости α = 0,1 (см. приложение). Полученные результаты занести в таблицу 2, столбцы 14-17.

6. Аппроксимировать экспериментальную зависимость $\sigma_S = \sigma_S(\varepsilon_l)$ степенной функции вида $\sigma_\varepsilon = C \cdot \varepsilon_l^n$. Использовать для этого программу расчета на ЭВМ, которую выдает учебный мастер. Исходные данные для расчета в «протоколе», столбцы 12,13.

7. Проверить адекватность модели. Если линия $\sigma_\varepsilon = C \cdot \varepsilon_l^n$ пересекает контуры эллипсов, полуоси которого являются величинами Δ_σ и Δ_ε, то данную модель можно считать «адекватной». Другими словами, адекватное уравнение должно давать теоретическое значение напряжения текучести, отличающееся от оценки математического ожидания (от усредненного значения σ_s) на величину, меньшую доверительной погрешности.

8. Сделать общие выводы по работе.

12.6. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать краткий конспект теоретической части, цель работы, перечень используемого оборудования и инструмента, чертеж образцов по прилагаемой форме (рис. 12.1), заполненный протокол испытаний (табл. 12.2), рис. 3, выводы по полученной аналитической зависимости. На рис.3 должны быть нанесены экспериментальные значения σ_s ε_l , например, в виде кружков диаметром 1,5-2 мм, полученная аналитическая зависимость в виде сплошной линии и доверительные интервалы.

12.7.ЛИТЕРАТУРА

1. Охрименко Я.М., Тюрин В.А. Теория обработки металлов давлением. Выпуск 1. Физические основы обработки металлов давлением. – М.: МИСиС, 1970, С. 73-77.
2. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. Изд.4-е, переработанное и доп. – М.: Машиностроение, 1976, С. 39-42.
3. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие. ГОСТ 25503-80. – М.: Стандарты, 1981, С. 1, 14-15.
4. Программа аппроксимации степенной функцией вида $y = cx^n$. Вычислительная лаборатория кафедры ОМД.

12.8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каков механизм упрочнения при холодной пластической деформации?
2. Какие методы известны вам для определения кривых упрочнения?
3. Каковы основные преимущества и недостатки испытания на сжатие по сравнению с испытанием на растяжение?
4. В чем заключается причина бочкообразования при испытаниях на сжатие?
5. Назовите способы исключения влияния трения при испытании на сжатие.
6. Как рассчитываются оценки математического ожидания (среднее арифметическое), дисперсия воспроизводимости (дисперсия ошибки), среднеквадратичные отклонения, доверительный интервал.
7. Адекватно ли полученное уравнение, если вычисленное по уравнению напряжение текучести σ_s отличается от экспериментального σ_s на величину, большую, чем Δ_σ , меньшую, чем Δ_σ?
8. Какой метод используется при аппроксимации (нахождении неизвестных коэффициентов C_1 и C_2) и в чем его суть?
9. Какова абсолютная, относительная погрешности экспериментального определения величины σ_s?
10. Какова вероятность того, что истинное значение предела текучести при заданной степени деформации находится в пределах $\sigma_S - \Delta_\sigma \le \sigma_S \le \sigma_S + \Delta_\sigma$? Чем эта вероятность задается?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 13

ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ И ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ОТ СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ

(2 часа)

13.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Закрепление знаний реологии металлических материалов, в частности, изучение:

1) влияния скорости деформации на напряжение течения и пластичность сплавов;

2) метода определения скорости деформации при одноосном нагружении;

3) аппроксимация экспериментальных зависимостей и оценка адекватности полученного уравнения;

4) получение практических навыков работы с электропечами сопротивления типа «СНОЛ», двухкоординатными самописцами типа «ПДП-04»;

5) закрепление опыта работы с ПК.

13.2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Скоростью деформации называют изменение степени деформации в единицу времени (13.1):

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt}. \qquad (13.1)$$

Скорость деформации измеряется в «обратных секундах» (сек$^{-1}$), при постоянной скорости деформации

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{t}. \qquad (13.2)$$

При одноосном растяжении – сжатии мгновенная скорость деформации однозначно определяется текущей длиной образца l и скоростью деформации v (рис. 13.1):

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v}{l}\,. \qquad (13.3)$$

Чем меньше длина образца l, тем больше скорость деформации при неизменной скорости деформирования v.

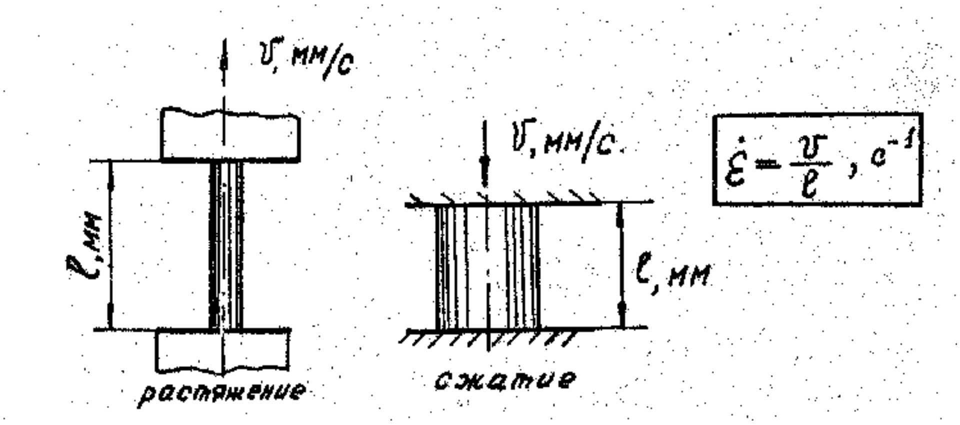


Рис. 13.1. К определению скорости деформации при одноосном нагружении.

Выражение (13.3) наиболее часто используют при пластометрических испытаниях материалов.

Влияние скорости деформации на напряжение течения σ_S неоднозначно, т.к. определяется рядом условий – прежде всего, степенью деформации и температурой деформации в момент измерения.

При холодной деформации величина σ_S практически не зависит от $\dot{\varepsilon}$. С повышением температуры влияние $\dot{\varepsilon}$ на σ_S увеличивается. Каков характер этого влияния?

В первом приближении можно считать, что при увеличении скорости деформации напряжение течения возрастает, а пластичность падает.

Однако при сверхвысоких скоростях деформации (например, при штамповке взрывом или на скоростных молотах) в условиях высокой локализации пластической деформации и мощных тепловыделений происходит обратный эффект – уменьшение напряжения течения и увеличение пластичности. В ряде случаев возможно проявление эффекта «сверхпластичности» (СП), когда при определенной скорости деформации и температуре обнаруживается пластичность сплава на один-два порядка выше, чем при обычных условиях. Напряжение течения при этом на два порядка уменьшается. Для возникновения эффекта СП желательна равноосная мелкозернистая структура металла, которая часто наблюдается у эвтектических и эвтектоидных сплавов (Sn + Pb, Sn + Bi, Zn + Al) после пластической деформации. В меньшей степени эффект СП проявляется в сплавах и металлах, имеющих полиморфные превращения (например, в стали). Особые пластические свойства металлов в состоянии СП объясняют высоким значением показателя скоростного упрочнения «*m*».

Зависимость $\sigma = f(\varepsilon)$ носит сложный характер и определяется рядом факторов: взаимодействием процессов упрочнения и разупрочнения (1, с.49-51), развитием процессов течения внутри зерен и межзеренного скольжения, тепловым эффектом деформации и т.д. Степень влияния каждого из этих факторов на рассматриваемую зависимость определяется составом и структурой материала, температурой и скоростью деформации. Поэтому зависимость $\sigma_s = f(\varepsilon)$ изучают при фиксированных прочих условиях – процесс деформации выдерживают изотермическим, данные σ_s берут при одной степени деформации, чтобы деформационное упрочнение не оказывало влияния на характер этой зависимости.

Зависимость $\sigma_S = f(\dot{\varepsilon})$ при различных температурно-скоростных условиях представляют в виде линейной, степенной или логарифмической функции ε:

Линейная (закон Ньютона – Стокса):

$$\sigma_S = a \cdot \dot{\varepsilon} \tag{13.4}$$

или

$$\sigma_S = \sigma_0 + a \cdot \dot{\varepsilon} \tag{13.5}$$

степенная (по Э. Зибелю и А. Помпу):

$$\sigma_S = a \cdot \dot{\varepsilon}^m \tag{13.6}$$

$$\sigma_S = \sigma_0 + a \cdot \dot{\varepsilon}^m \tag{13.7}$$

степенная (по С.И. Губкину и П. Рейто):

$$\frac{\sigma_S}{\sigma_0} = \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)^m \tag{13.8}$$

логарифмическая (по А. Надаи и П. Людвику)

$$\sigma_S = \sigma_0 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}, \tag{13.9}$$

где $a, a_1, \sigma_0, C, C_1, \dot{\varepsilon}_0, m$ – константы материала, причем величину (13,6-13,8) называют показателем скоростного упрочнения. Для большинства сталей при 1000 ^{0}C он изменяется в пределах 0,10 – 0,16: для меди – 0,16; титана – 0,13; молибдена (при 1200 ^{0}C) – 0,12. Для сверхпластичных сплавов m > 0,3.

Прологарифмируем степенное уравнение (13.6) и получим:

$$\lg\sigma_S = \lg C + m\lg\dot{\varepsilon} \tag{13.10}$$

Следовательно, степенная зависимость σ_S – $\dot{\varepsilon}$ имеет линейный вид в логарифмических координатах, что, как правило, хорошо согласуется с экспериментальными данными (рис. 13.2).

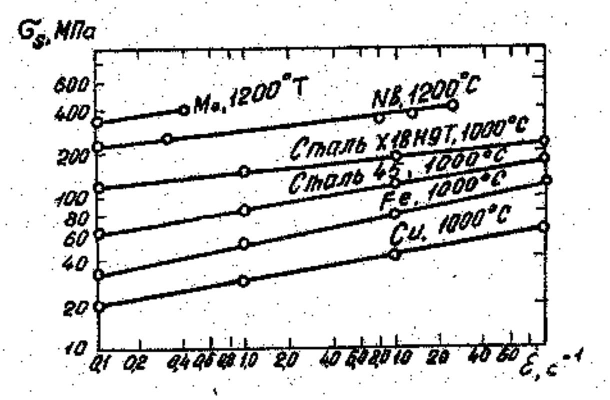


Рис. 13.2. Зависимость напряжения течения сплавов от скорости деформации.

Для моделирования процесса горячей деформации металлических материалов используются обычно сплавы свинца с сурьмой или оловом. При выборе исходящего моделирующего материала учитывается, помимо прочих условий, вид исследуемой зависимости $\sigma_s = f(\varepsilon)$, а также $\sigma_s = f(\dot{\varepsilon})$.

При описании зависимостей (13.4 – 13.9) используют метод наименьших квадратов, приемы графического или аналитического интерполирования.

13.3. ОБОРУДОВАНИЕ, ИНСТРУМЕНТ, МАТЕРИАЛЫ

1. Испытательная машина Р-5,50 кН.
2. Испытательная машина.
3. Пресс ДБ2426А 400 кН.
4. Образцы цилиндрические на сжатие ∅10х20 сплавов:

- свинец технической чистоты;
- свинец с сурьмой (3%);
- свинец с оловом;
- алюминий АД1;
- медь М1;
- сталь Ст1.

5. Образцы для испытаний на растяжение сплавов (рис. 13.3) свинец технической чистоты, свинец с оловом (20%).

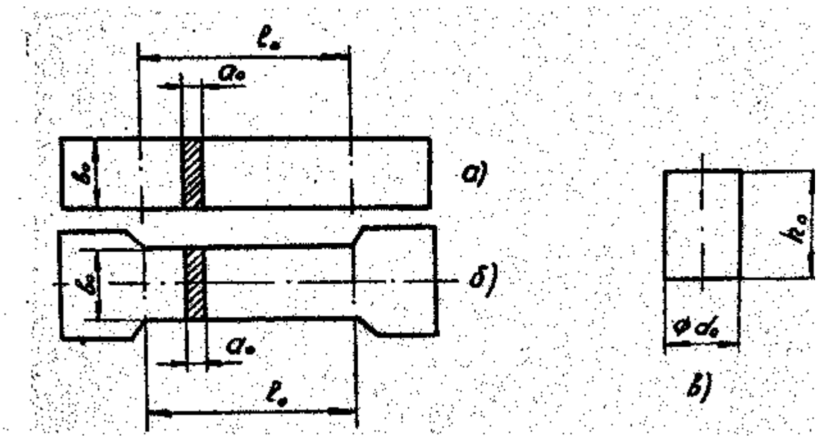


Рис. 13.3. Образцы для испытания на растяжение (а, б) и сжатие.

6. Печь типа СНОЛ.
7. Осадочные плиты из сплава ЖС6КП.
8. Потенциометр ПДП-04-002.
9. Штангенциркуль.
10. Секундомер.

13.4. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ (рис. 13.4)

1. Получить задание с конкретными условиями проведения эксперимента у преподавателя (табл. 13.1)

Таблица 13.1

Примеры вариантов задания

Материалы образцов	Коли-чество	Темпе-ратура	Метод	Искомая зависи-мость	Дополнительное указание
Алюминий АД1	8	350 ^{0}С	сжатие	$\sigma_s = f\,(\varepsilon)$	Определить коэффициенты с и m уравнения $\sigma_s = C \cdot \varepsilon^m$
Pb + 20% Sn	6	20 ^{0}С	растяжение	$\psi_к = \varphi\ (\varepsilon)$	Построить графики $\sigma_s = f\,(\varepsilon)$ и $\psi_к = \varphi(\varepsilon)$

Таблицы 13.1, 13.2, 13.3 в виде «протокола испытаний» выдаются учебным мастером к моменту начала выполнения работы.

2. Измерить и пронумеровать образцы серии опытов (табл. 13.2)

Таблица 13.2

Исходные размеры образцов, температура деформации

Номер	Размеры образца					Температура нагрева образцов
	d_0	h_0	a_0	b_0	l_0	

3. Если необходимо нагреть образцы, то загрузить их в печь вместе с бойками и установить регулятор на заданную температуру. Время выдержки образцов при нагреве до 400 ^{0}С – 10 минут; 900 ^{0}С – 20 минут, если печь была предварительно прогрета.

4. Если в задании указан сплав свинца с оловом, то для изучения режима СП подготовить мелкозернистую структуру сплава предварительной деформацией (рис. 13.4)

5. Подготовить оборудование и регистрирующую аппаратуру.

6. Провести деформацию образца, параллельно с записью индикаторной диаграммы регистрируя в табл. 13.3 данные по текущим значениям времени τ с момента начала деформации (сжатия) или скорости хода траверсы *v* (растяжение), а также длины образца *l* и усилия деформации Р (v_0 – объем образца или его рабочей части (a_0 х $в_0$ х l_0)).

Испытания на растяжение вести до разрыва образца, после разрыва измерить конечные размеры поперечного сечения: $a_к$; $в_к$.

7. После окончания испытания выключить аппаратуру, сдать инструмент, материалы и пособия учебному мастеру.

Таблица 13.3

[illegible]	Время, τ, с	Длина образца	v, мм/с	Усилия, Р, кН	= P * l/ V_0, мПа	$\acute{\varepsilon} = v / l$, $с^{-1}$	$\varepsilon = \ln(l/1_0)$	Примечание
1								$а_к$ = $в_к$ = $\psi_к$ =

13.5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Заполнить оставшиеся колонки табл. 13.3.

2. Построить график зависимости $\sigma_s = f(\varepsilon)$ по табличным данным (возможны варианты: $\sigma_S = f_1\left(\varepsilon, \dot{\varepsilon}\right)$; $\sigma_S = f_2\left(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, t^0\right)$.

3. Оценить погрешность измерения.

4. Вычислить по результатам опытов на растяжение значения относительного поперечного сужения в сечении разрыва образцов:

$$\psi_К = \frac{F_0 - F_К}{F_0} \cdot 100\% = \frac{a_0 b_0 - a_К b_К}{a_0 b_0} \cdot 100\%$$

5. Построить график зависимости $\psi_к = \varphi(\varepsilon)$.

6. Аппроксимировать найденную зависимость (п. 13.5.2) функций заданного вида (например, вида $\psi_К = \varphi\left(\dot{\varepsilon}\right)$). Примечание: возможны варианты: метод наименьших квадратов, интерполяция по числу точек, равному числу неизвестных коэффициентов (см. приложение). Рассчитать дисперсию адекватности $S^2_{ад}$ для полученной модели.

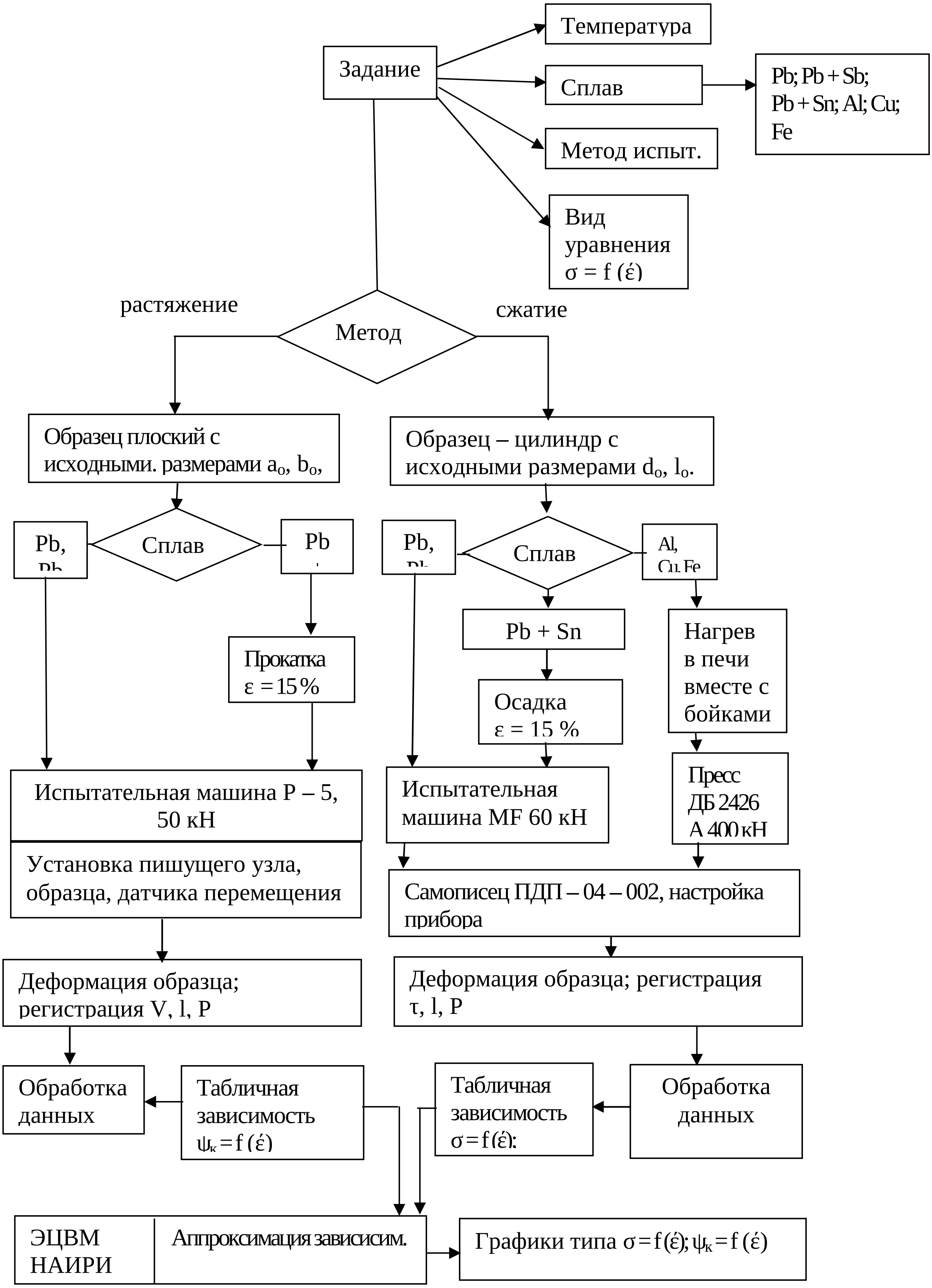


Рис. 13.4. Блок-схема экспериментов по определению зависимостей $\sigma = f\left(\dot{\varepsilon}\right)$ и

$$\psi_{\text{к}} = \varphi\left(\dot{\varepsilon}\right).$$

7. Нанести на график (см. п. 13.5.2) линию, соответствующую полученному уравнению. В учебной лаборатории кафедры имеется библиотека программ, соответствующих задачам аппроксимации указанных зависимостей (13.4)-(13.8), а также моделей более сложного типа, например, $\sigma_S = C\varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m$.

Расчет величины $S^2_{ад}$ входит в алгоритм аппроксимации для уравнений указанных типов.

8. Оценить адекватность модели по критерию Фишера.

Сделать выводы в виде качественного описания полученных закономерностей.

13.6. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ ПО РАБОТЕ

В отчет должны входить: название и номер работы, цель, конспект теоретической части, заполненный протокол испытаний, графики зависимостей

$\sigma = f(\varepsilon)$ и (или) $\psi = \varphi(\varepsilon)$, указанные в задании, погрешность измерения, уравнение вида $\sigma = f(\varepsilon)$ с конкретными значениями коэффициентов, вывод об адекватности этого уравнения и выводы общего характера.

13.7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему при горячей деформации зависимость напряжения течения от скорости деформации имеет более ярко выраженный характер, чем при холодной?

2. Каков механизм разупрочнения сплавов при тепловой, горячей деформации?

3. Какими уравнениями можно описывать процесс скоростного упрочнения металлов и сплавов?

4. Каким образом находят коэффициенты уравнения σ - ε?

5. С помощью какого критерия проверяется адекватность полученного уравнения?

13.8. ЛИТЕРАТУРА

1. Сторожев М. В., Попов Е. А. Теория обработки металлов давлением. –М. : Машиностроение, 1971. – С.67-70.

2. Громов Н. П. Теория обработки металлов давлением. – М. : Металлургия, 1978. – С.150-156.

3. Охрименко Я. М., Тюрин В. А. Теория ОМД. Вып. 1. Физические основы ОМД. – М. : МИСиС, 1970. – С.87-88, 92.

4. Смирнов О. М. Теория ОМД. Вып. IV. Реологические основы процессов ОМД. – М. : Металлургия, 1973.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 14

СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА СХЕМЫ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА

(2 часа)

14.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Закрепление знаний ряда методов расчета главных деформаций, интенсивностей деформаций и напряжений.

2. Приобретение практических навыков работы по нанесению, измерению координат узлов делительной сетки на микроскопе, сопоставительной оценке точности методов расчета схемы напряженно-деформированного состояния (НДС).

3. Изучение устройства и работы твердомера, разрывной испытательной машины Р-5.

14.2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В условиях одноосного нагружения, например растяжения, величина интенсивности логарифмических деформаций

$$\varepsilon_i = \ln\frac{F_0}{F} = \ln\frac{l}{l_0} = \varepsilon_l\,, \qquad (14.1)$$

где F_0 и F – площади поперечного сечения образца до и после деформации;

l_0 и l – длины рабочего участка разрывного образца до и после деформации.

Величина может быть выражена через главные логарифмические деформации:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{(\varepsilon_1-\varepsilon_2)^2+(\varepsilon_2-\varepsilon_3)^2+(\varepsilon_3-\varepsilon_1)^2}\,, \qquad (14.2)$$

которые отражают деформированное состояние в условиях произвольной, т.е. объемной схемы НДС.

Интенсивность напряжений в условиях объемной схемы НДС:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{12}}\sqrt{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\omega_3-\sigma_1)^2}\,. \tag{14.3}$$

При равномерном растяжении, когда $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, равенство (14.3) приводится к виду $\varepsilon_i = \varepsilon_i$ и равенство (14.2) – к виду $\sigma_i = \sigma_i$. При этом известно, что $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$, поэтому $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\frac{1}{2}\varepsilon_1$.

Т.е. при одноосном нагружении любая материальная точка рабочего участка разрывного образца находится в напряженно-деформированном состоянии, описываемом уравнениями:

$$\begin{aligned} &\varepsilon_1 = \ln\frac{F_0}{F} = \varepsilon_i; \qquad && \sigma_1 = \frac{P}{F} = \sigma_i;\\ &\varepsilon_2 = -\frac{\varepsilon_1}{2}; && \sigma_2 = 0;\\ &\varepsilon_3 = -\frac{\varepsilon_1}{2}; && \sigma_3 = 0, \end{aligned} \tag{14.4}$$

где P – усилие по шкале силоизмерителя перед снятием нагрузки.

В данной работе исследуются несколько методов, базирующихся на основных положениях теории конечных деформаций (1 – 4), эти методы основаны на изучении искажений деформацией сетки. Параметры деформированного состояния определяются путем сопоставления конечной и начальной формы и размеров ячейки.

Следует иметь в виду, что методы конечных деформаций основаны на допущении о том, что главные оси напряжений совпадают с направлением главных осей деформаций (1, 2, 3). Поэтому исследуемые процессы должны быть монотонными, т.е. главные оси скорости деформаций должны совпадать с одними и теми же материальными волокнами тела, а вид напряженного состояния оставаться неизменными.

1. Метод, основанный на искажении круглой сетки

Суть метода состоит в нанесении на образец сетки в виде семейства кружков диаметром, равным $2a_0$. Обозначим этот метод «о». После деформации измеряются размеры главных осей эллипсов и $2a_1$, $2b_1$, которые совпадают с направлением главных деформаций:

$$\varepsilon_1 = \ln\frac{a}{a_0}; \quad \varepsilon_2 = \ln\frac{b}{a_0}. \tag{14.5}$$

Учитывая, что $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0, \quad \varepsilon_3 = -(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$ из уравнения (14.2) получаем:

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}}\sqrt{\varepsilon_1{}^2 + \varepsilon_2{}^2 + \varepsilon_1\varepsilon_2}\,. \tag{14.6}$$

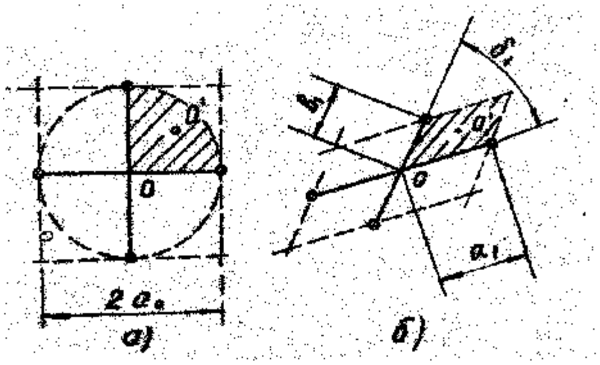
Величину интенсивности напряжения определяют по кривой упрочнения, полученной для данного материала в условиях одноосного сжатия – растяжения при равных температурно-скоростных режимах деформации:

$$\sigma_i = f(\varepsilon_i). \tag{14.7}$$

2. Метод Зибеля

Исходная сетка является квадратной (рис. 14.1). Обозначим этот метод « ». Параметр исходной ячейки – a_0. После деформации ячейка превращается в параллелограмм, а вписанный круг – в эллипс.

Рис. 14.1. Схема деформации по Зибелю: а) до деформации, б) после



Главные деформации находятся по уравнениям:

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \frac{1}{2}\ln\left[\left(a_1^2 + b_1^2 + \sqrt{\left(a_1^2 + b_1^2\right) - 4a_1^2 b_1^2 Sin\delta}\right)/\,2a_0^2\right]\\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{2}\ln\left[\left(a_1^2 + b_1^2 - \sqrt{\left(a_1^2 + b_1^2\right) - 4a_1^2 b_1^2 Sin\delta}\right)/\,2a_0^2\right]\end{aligned} \qquad (14.8)$$

Величины ε_1 и σ_1 определяются по выражениям (14.6) и (14.7). При использовании этого метода можно рассматривать деформацию лишь четверти вписанного круга (показано заштрихованным на рис. 14.1 а, б), тогда относят результаты расчета $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ не к центру – точке *O*, а к середине заштрихованной площади – точке O'.

3. Метод И.Р. Ренне

Исходная сетка может иметь ячейки в виде параллелограмма (см. рис. 14.1 б), конечный их вид – также параллелограмм. Главные деформации определяются из выражения:

$$\varepsilon_j = \frac{1}{2}\ln\frac{b_2^2 + n_j^2 a_2^2 + 2n_j a_2 b_2 \cos\delta_2}{b_1^2 + n_j^2 a_1^2 + 2n_j a_1 b_1 \cos\delta_1}; \quad j = 1{,}2\,.$$

где a_2, b_2, δ_2 – параметры параллелограмма после деформации (рис. 14.1 б),

$$\begin{aligned}&n_{1,2} = \left(B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}\right)/\,2A;\\ &A = a_1 b_1 a_1^2 \cos\delta_1 - a_2 b_2 a_2^2 \cos\delta_2;\\ &B = b_2^{\ 2}\ a_1^2 - b_1^{\ 2} a_2^2;\\ &C = a_1 b_1 b_2^2 \cos\delta_1 - a_2 b_2 b_1^2 \cos\delta_2.\end{aligned}$$

а величины ε_1 и σ_1 определим также из выражения (14.6) и (14.7).

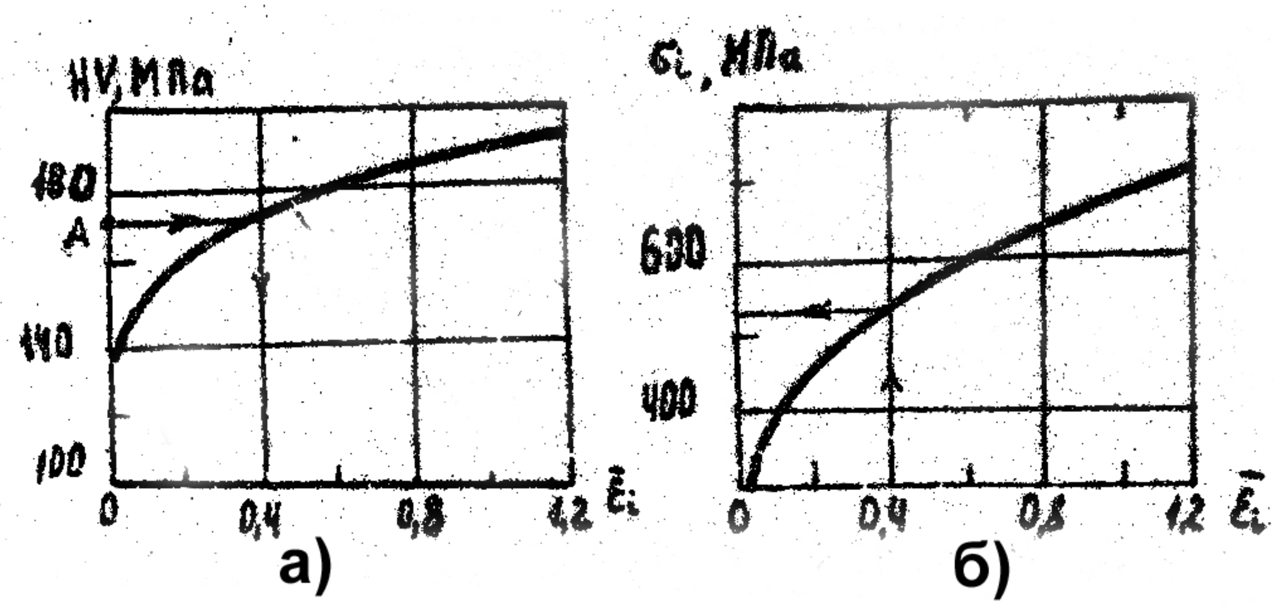
4. Определение величин ε_1 и σ_1 испытанием твердости

Этот метод основан на предположении о том, что между твердостью деформированного металла и интенсивностью напряжений существует однозначная связь.

Г.Д. Делем и другими исследователями доказано, что эта зависимость справедлива для различных схем НДС и способов нагружения.

Поскольку для этого метода не требуется координатной сетки, то метод весьма прост и эффективен, в особенности в промышленных условиях, при изучении объемных процессов нагружения, например, при винтовой прокатке, когда работать с координатными сетками невозможно. Метод заключается в измерении твердости H_V на поверхности или в глубине образца (после разрезки).

Поскольку зависимость твердости от степени деформации имеет монотонный характер (рис. 14.2 а), то по измеренному значению твердости HV (т.А) найдем



величины ε_1 и σ_1 (рис. 14.2 а, б).

Рис. 14.2. Диаграммы состояния металла: а) H_V; б) σ_1.

14.3. ОБОРУДОВАНИЕ, ИНСТРУМЕНТ, МАТЕРИАЛЫ

1. Испытательная машина Р-5 усилием 50 КН.
2. Твердомер.
3. Микрометр 0-25 мм.
4. Инструментальный микроскоп.*
5. Образец плоский (рис. 14.3).
6. Комплект оснастки для нанесения координатной сетки.
7. ПК.

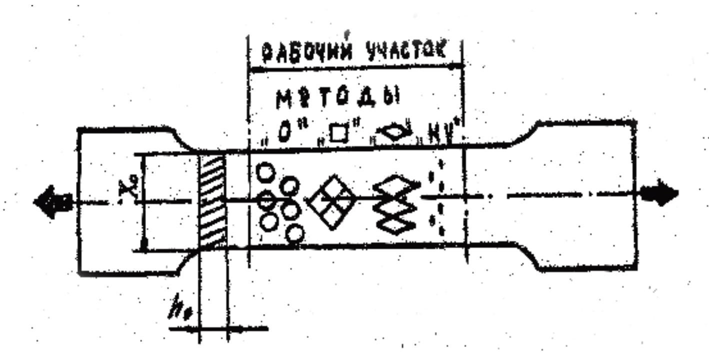


Рис. 14.3. Пример плоского образца с нанесенной координатной сеткой.

14.4. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Выполняемая работа состоит из следующих основных этапов:

1. Получение у преподавателя варианта задания (табл. 14.1), у учебного мастера – необходимых приспособлений, образцов (рис. 14.3) и бланков протоколов испытания.

2. Нанесение координатных сеток на рабочем участке образца, как показано на рис. 14.3. Можно использовать обратную плоскость образца. Измерение твердости (H_V или HB) исходного материала (не менее 5 точек).

---

*В работе может использоваться прибор «кодировщик графической информации» (вычислительная лаборатория кафедры).

3. Измерения поперечных размеров образца h_0, x_0 и нанесенной исходной сетки. Метод измерения см. на рис. 14.4. Измерения проводятся с помощью микрометра или штангенциркуля и измерительного микроскопа.

Для анализа третьего метода (метода «◊») целесообразно использовать в качестве исходной – деформированную квадратную сетку.

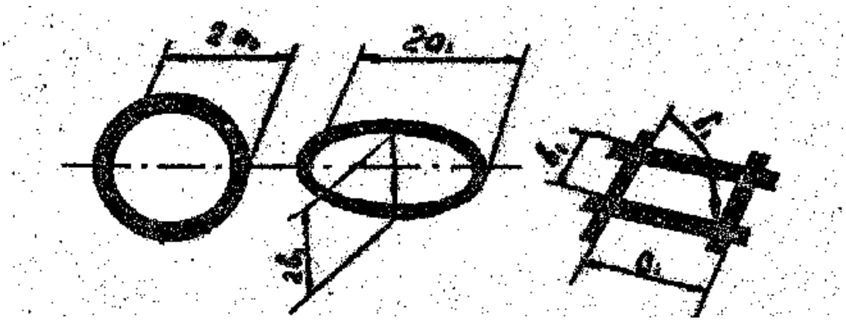


Рис. 14.4. Рекомендуемая схема измерения координатных сеток.

4. Деформации растяжения образца на испытательной машине Р-5 с записью усилия в момент остановки, $\varepsilon = (20 \div 40)\%$.

5. Измерения размеров образца в рабочей части для точного определения фактических деформаций образца; измерение размеров поперечного сечения проводится микрометром или штангенциркулем.

6. Измерения конечных размеров координатной сетки (рис.14.4) проводятся на микроскопе.

7. Сделать заданное количество отпечатков на приборе Виккерса или Бринелля. Для каждого отпечатка определить соответствующие числа твердости. Все результаты измерений регистрировать в протоколе испытания. Бланки протоколов выдаются учебным мастером. Все измерения проводятся с точностью, соответствующей не менее четырем значащим цифрам.

14.5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ

1. Определяются параметры схемы НДС по поперечным размерам рабочей части образца после трехкратного измерения до и после деформации и по усилию растяжения Р (табл. 14.2).

По вычисленным трем значениям величины ε_i найти математическое ожидание $\varepsilon_{i\ \text{ср}}$ и среднеквадратичную погрешность S_i.

Таблица 14.1

Пример варианта задания

Дата	Количество ячеек (наблюдений) Методы 14.2.1-14.2.4				Задаваемая деформация образца, ε, %	[illegible] a_0^2	Материал образца, состояние	Примечание
Группа	○	□	◇	H				
1	2	3	4	5	6	7	8	9
[illegible]	6	6	-	12	Не варьи-руется 40%	Не варьи-руется 9 мм^2	Сталь 08 отжиг	-

Таблица 14.2

Определение контрольных значений параметров схемы НДС по размерам образца

№ измерения	h_0, мм	X_0, мм	h_1, мм	X_1, мм	F_0, мм^2	F_i, мм^2	Усилие Р	ε_1	ε_2	ε_i	σ_i, МПа
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1											
2											
3											

2. Определяются параметры схемы НДС по каждому методу, указанному в задании (табл. 14.3-14.5).

Таблица 14.3

Расчет параметров НДС по методу «о»

№ ячейки j	$2a_0$	$2a_1$	$2b_1$	ε_1	ε_2	ε_3	ε_i	σ_i МПа
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1								
2								
…								
n								

Таблица 14.4.

Расчет параметров НДС по методу « »

(по методу «◊» – вид тот же)

№ ячей-ки j	$2a_0$	$2a_1$	$2b_1$	δ_1	ε_1	ε_2	ε_3	ε_i	σ_i МПа
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Таблица 14.5

Расчет параметров НДС по методу «HV»

Номер отпечатка j	Диаметр отпечатка	Твердость H	По зависимости $\varepsilon_i = f(H)$	σ_i МПа

1	2	3	4	5

3. Рассчитываются: математическое ожидание, среднеквадратичная ошибка и дисперсия величины интенсивности деформации ε_i по каждому методу. Результаты свести в табл.14.6.

Таблица 14.6

К оценке точности методов определения ε_i

Статические оценки	Контрольный (по размерам образца)	Метод ○	Метод □	Метод ◇	Метод **Н**
1	2	3	4	5	6
Мат. ожидание					
Ср. кв. ошибка Sε					
Дисперсия S_ε^2					

4. Проверяется статистическая значимость различия точности методов путем проверки однородности соответствующих дисперсий S_ε^2 (по критерию Фишера, см. приложение).

5. Выводы.

14.6. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ ПО РАБОТЕ

В отчет должны войти: задание, цель работы, конспект теоретической части, схема измерений, заполненные табл. 14.2-14.6, выводы о точности и трудоемкости каждого метода расчета параметров схемы НДС, данные о статическом различии точности методов.

14.7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какая теория лежит в основе рассматриваемых методов?

2. Каким основным условиям должна отвечать кинематика реального процесса деформации при использовании этих методов? Налагает ли метод «Н» ограничения на кинематику процесса деформации, напряженное состояние?

3. Какие преимущества и недостатки имеют рассматриваемые методы (простота, вычислительные возможности, универсальность и т.д.)?

4. Какой величиной оценивается случайная погрешность методов?

14.8. ЛИТЕРАТУРА

1. Сторожев М. В., Попов Е. А. Теория обработки металлов давлением. – М. : Машиностроение, 1971. – С. 61-64, 90, 112.

2. Громов Н. П. Теория обработки металлов давлением. – М. : Металлургия, 1978. – С. 27, 44-46.

3. Смирнов-Аляев Г.С. Экспериментальные методы исследования процессов обработки металлов давлением. Л.: Машиностроение, 1972. – С. 184-187, 260-263.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 15

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА НА СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

(2 часа)

15.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Закрепление знаний метода расчета характеристик напряженно-деформированного состояния материала;
- Анализ зависимости пластичности материала от показателя жесткости схемы НДС;
- Приобретение практических навыков работы на промышленном гидропрессе ДБ2426А, изучение характера разрушения материала в условиях объемного НДС;
- Закрепление опыта работы с делительными сетками.

15.2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Необходимость расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) сплавов обусловлена тем, что НДС определяет в значительной мере структуру и свойства поковок, технологическую пластичность, скоростные возможности технологических процессов. Значение НДС сплава в тех или иных условиях процесса деформации позволяет находить оптимальные параметры технологического процесса, поскольку от НДС зависит решающим образом пластичность сплавов и энергоемкость операций.

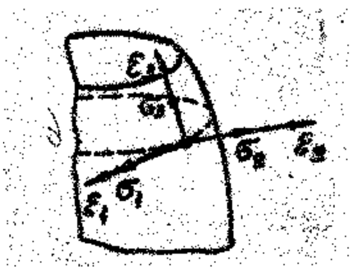
Для экспериментального определения НДС сплава необходимо выяснить:

1) кинематику процесса деформации по объему тела;

2) реологию сплава при данных условиях деформации, т.е. зависимость напряжения текучести от этих условий (степени, скорости деформации, температуры и пр.);

3) значение одного из напряжений в материальной точке деформируемого тела, от которой начинают вести расчет напряжений по объему тела.

На любой свободной поверхности в любой ее точке напряжения нормальное и касательное к поверхности равны нулю. Поэтому одно из главных нормальных напряжений здесь всегда равно нулю, а два других расположены касательно к свободной поверхности образца. Деформации сдвига здесь отсутствуют. Обычно полагают, что главные оси деформации совпадают по направлению с главными осями



напряжений (рис. 15.1) (1, с. 76-90).

Рис. 15.1. Расположение главных осей деформации и напряжений на свободной поверхности.

Главные деформации можно определить, например, путем измерения осей эллипсов «а» и «в» (рис. 15.2), полученных из первоначального изображения окружности диаметром d, нанесенной на поверхность исходного образца (рис. 15.2);

при этом: $\varepsilon_1 = \ln\frac{b}{d}; \quad \varepsilon_3 = \ln\frac{a}{d}.$ (15.1)

Из условия несжимаемости $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0$ получим

$$\varepsilon_2 = -(\varepsilon_1 + \varepsilon_3) \quad (15.2)$$

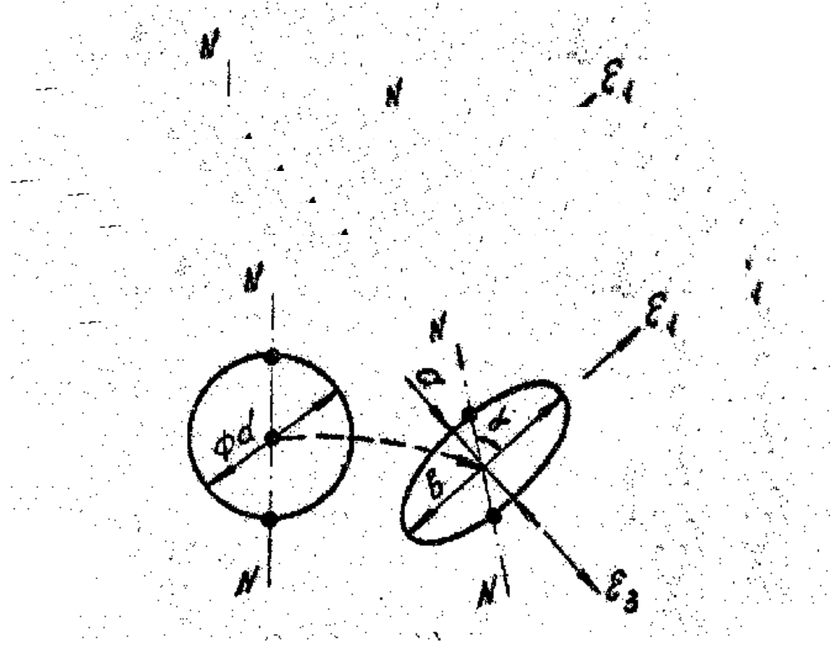


Рис. 15.2 К определению степени деформации элемента координатной сетки.

Окружность диаметром d наносят на поверхность путем специального клеймения, царапания, типографскими или фотографическими методами. При осесимметричной деформации для определения главных деформаций в точке М достаточно нанести две или три кольцевые риски (рис. 15.3). При использовании трех рисок (рис. 15.3)

$$\varepsilon_1 = \ln\frac{D}{D_0};\ \varepsilon_3 = \ln\frac{h}{h_0};\ \varepsilon_2 = -(\varepsilon_1 + \varepsilon_3). \qquad (15.3)$$

При значительной искривленности свободной поверхности следует воспользоваться алюминиевой фольгой в виде тонких полосок, делая ими оттиск рисок и измеряя выпрямленную фольгу под микроскопом. При малой кривизне поверхности дугу АВ заменяем хордой.

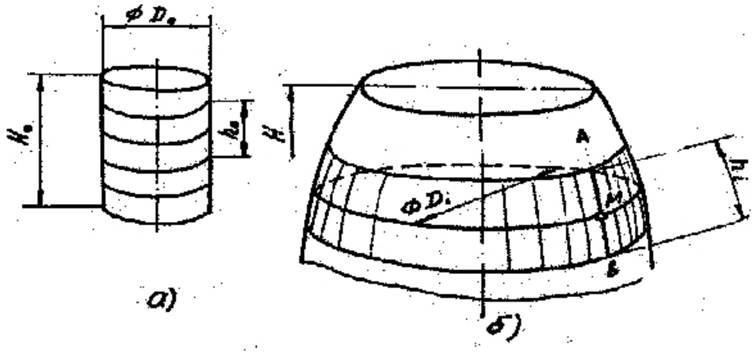


Рис. 15.3. Схема измерения кольцевой сетки при осесимметричной деформации:

а) сетка до деформации; б) после деформации (увеличенно).

Если положение главных осей известно заранее, то вместо круга можно нанести квадратную ячейку в виде двух пар рисок, что удобнее делать на исходных криволинейных поверхностях. На основе главных деформаций вычисляем интенсивность деформации [1]:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{(\varepsilon_i - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}\ , \tag{15.4}$$

интенсивность деформаций сдвига

$$\gamma_i = \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{(\varepsilon_i - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}\ , \tag{15.5}$$

октаэдрическую деформацию сдвига:

$$\gamma_0 = \frac{2}{3}\sqrt{(\varepsilon_i - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}\ , \tag{15.6}$$

которые отличаются лишь числовым коэффициентом. Уравнения связи напряжений и деформаций можно записать в следующей форме [1, с. 138]; [2, с. 53-57].

$$\sigma_1 - \sigma_{C\Sigma} = \frac{2}{3}\frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}\varepsilon_1 ... \tag{15.7}$$

$$\sigma_2 - \sigma_{C\Sigma} = \frac{2}{3}\frac{\sigma_i}{\varepsilon_2}\varepsilon_2 ... \tag{15.8}$$

$$\sigma_3 - \sigma_{C\Sigma} = \frac{2}{3}\frac{\sigma_i}{\varepsilon_3}\varepsilon_3 ...\ , \tag{15.9}$$

где $\sigma_{CP} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$ – среднее напряжение; (15.10)

σ_i – интенсивность напряжений, скалярная величина, равная напряжению течения σ_S , определенному по опытам на одноосное нагружение для данного материала в равных температурно-скоростных условиях процесса деформации (определяется по графику или уравнению $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$).

Поскольку одно из главных напряжений известно и равно нулю ($\sigma_2 = 0$), то из уравнения (15.8) находим $\sigma_{ср}$:

$$\sigma_{ср} = -\frac{2}{3}\frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}\varepsilon_2, \qquad (15.11)$$

тогда из (15.7) и (15.9) найдем остальные главные нормальные напряжения

$$\sigma_1 = \frac{2}{3}\frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2); \quad \sigma_3 = \frac{2}{3}\frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}(\varepsilon_3 - \varepsilon_2). \qquad (15.12)$$

При использовании уравнений (15.7)-(15.9) следует иметь в виду одно из двух допущений: малость исследуемых деформаций; монотонность процесса деформации при неизменности расположения главных осей относительно деформируемого материала в данной точке. При деформациях, больших 0,1, проводят сопоставление величин деформаций в направлении главных осей в нескольких стадиях процесса.

Вычисленные значения напряжений и деформаций позволяют оценить ряд всевозможных параметров, в частности, определить жесткость схемы НДС, оцениваемую каким - либо показателем, например величиной П:

Для сравнения: при одноосном растяжении величина П равна +1, при кручении – 0.

15.3. ОБОРУДОВАНИЕ, ИНСТРУМЕНТ, МАТЕРИАЛЫ

1. Испытательная машина усилием 50 кН (или др., см. ниже).
2. Штангенциркуль.

3. Шероховатые осадочные плиты.

4. Образцы цилиндрические, призматические или листовые с рисками на боковой поверхности (рис. 15.3).

5. Подкладные кольца, фиксирующие заданные стадии процесса деформирования.

15.4. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

В работе предусмотрены варианты выполнения работы с варьированием следующих параметров:

1) типов исходного образца (параллелепипед, цилиндр, пластина и пр.) и его размеры;

2) материалов образца (свинец, алюминий, медь, железо и их сплавы);

3) схем деформации (сжатие, растяжение, прокатка, гибка, вытяжка);

4) конфигурации и шероховатости поверхности инструмента;

5) степени деформации (от 0,1 до 1,0 в зависимости от ряда условий);

6) координат или меток точек на свободной поверхности образца, в которых проводится определение НДС.

Каждый вариант задания состоит из набора конкретных параметров и условий из п.п. 1-6. Последовательность выполнения работы состоит из следующих основных этапов работы:

1) получение варианта задания;

2) измерение и регистрация конкретных условий задания (исходные размеры образца и нанесенной сетки и пр.);

3) проведение процесса деформации в полном соответствии с заданием; возможно доводить процесс деформации до момента начала разрушения образца для определения критической предельной степени деформации материала в данных условиях;

4) измерение размеров деформированного образца в целом и размеров сетки (параметров D, h и а, в) в области разрушения поверхности или области, указанной в задании.

Все измерения регистрировать в протоколе испытания, выдаваемом вместе с заданием. Зависимость $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$ также полагается известной, определенной из опытов на одноосное нагружение, выдается учебным мастером в соответствии с испытуемым материалом.

15.5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Обработка результатов проводится по указанным выше соотношениям (см. раздел 15.2) с параллельным заполнением результатов расчета в протокол в следующей последовательности:

1) деформация образца ($\varepsilon_{\text{H}} = \ln\frac{\text{H}}{\text{H}_0}$ в случае осадки);

2) главные деформации ε_1 и ε_3;

3) главная деформация ε_2;

4) интенсивность деформации ε_i, интенсивность напряжения σ_I (график $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$ выдается учебным мастером);

5) напряжения $\sigma_{ср}$, σ_1, σ_3, ($\sigma_2 = 0$);

6) показатель П.

15.6. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ ПО РАБОТЕ

В отчет должны войти: конспект теоретической части; заполненные протоколы испытания; результаты расчета величин, указанных в п. 15.5; графики зависимости деформации, напряжений и показателя П от указанных факторов (конкретно указывается в варианте задания).

15.7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие величины, характеризующие напряженно-деформированное состояние сплава, определяются в работе?

2. Как рассчитываются главные деформации?

3. При помощи каких уравнений делается переход от деформаций к напряжениям?

4. Что определяет показатель жесткости схемы НДС? Каков физический смысл жесткости схемы НДС?

5. Как располагаются главные оси напряжений на свободной поверхности в случае осадки цилиндра (привести обоснование)?

15.8. ЛИТЕРАТУРА

1. Сторожев М. В., Попов В. А. Теория обработки металлов давлением. – М. : Металлургия, 1971. – С. 112, 134-139.

2. Громов Н. П. Теория обработки металлов давлением. – М. : Металлургия, 1978. – С. 35-57.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 16

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ (σ_T) И НАПРЯЖЕНИЯ ТЕЧЕНИЯ (σ_S) В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР ГОРЯЧЕЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

(2 часа)

16.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Обучение студента методике определения прочностных характеристик металла в нагретом состоянии, когда кривая Р – б имеет плавно возрастающий характер;

- Приобретение навыков по технике проведения эксперимента, оценке точности результатов;

- Ознакомление с устройством и работой используемых машин и приборов.

16.2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Определение величин основных механических характеристик металлов при нормальных температурах, выполняемое при изучении путем сопротивления материалов, не встречает затруднений в связи с относительно простой возможностью обнаружения начала остаточной (необратимой) деформации по графику «нагрузка – течение металла» (например, по площадке текучести при растяжении образцов, рис. 16.1, кривая 1).

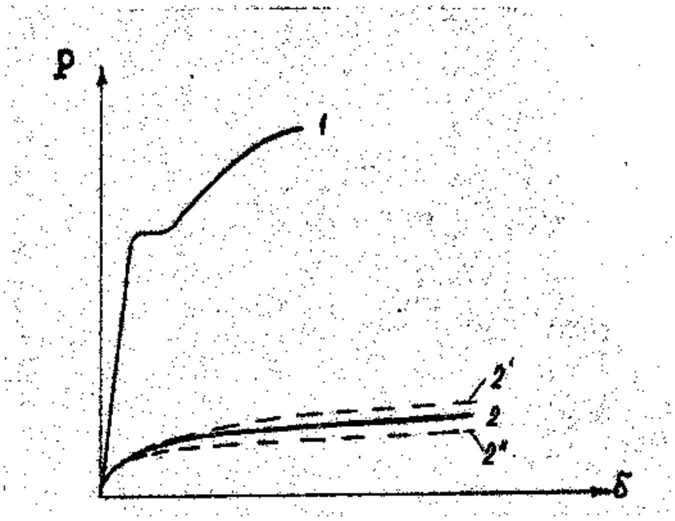


Рис. 16.1. График зависимости нагрузки от деформации холодного (1) и нагретого (2) металла.

При подобном эксперименте в условиях интервала температур теплой или горячей обработки давлением плавный характер указанного графика не позволяет установить момент начала появления остаточной деформации (рис. 16.1, кривая 2). Сложность определения рассматриваемых величин усугубляется тем, что они зависят при данной высокой температуре от соотношения противодействующих процессов упрочнения и разупрочнения металла, которые протекают неодинаково в зависимости от скорости деформирования и температуры металла. В отличие от этих процессов, протекающих последовательно (структурное упрочнение при нормальной температуре и возврат, рекристаллизация при нагреве наклепанного металла), термодинамические условия одновременности упрочнения и разупрочнения определяют положение кривой графика испытания – если при данной температуре и скорости деформирования частичное упрочнение наблюдается, то кривая $2^{/}$ (рис. 16.1) располагается выше кривой $2^{//}$, которая соответствует более интенсивному процессу разупрочнения металла в случае деформирования с меньшей скоростью. Установление той или иной скорости деформирования при этом имеет субъективный характер. Объективные данные могут быть получены в том случае, если измерение величин будет отнесено каждый раз к моменту полного устранения упрочнения, вызванного динамическими условиями эксперимента, т.к. осуществлено для разупрочненного металла, изучаемого не в момент деформирования, а после разупрочнения, но каждый раз при заданной температуре. На основании таких данных строят графики изменения величин и в зависимости от температур в заданном интервале.

16.3. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ, ПРИБОРОВ, МАТЕРИАЛОВ

Для выполнения работы необходимо ознакомиться с устройством и работой следующих установок и приборов:

1 – испытательная лабораторная машина на растяжение, модель Р5, усилие 50 кН;

2 – ходометр для точного измерения величины хода при деформировании образцов;

3 – подвесная электронагревательная печь для температур до 1250^0C;

4 – измерительный инструмент типа микрометра.

16.4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Стандартные образцы из исследуемого сплава в количестве 3-5 штук соответственно температурам испытания в заданном интервале (например, для стали 800-1200 ^{0}C), через каждые 100 или 200^0 устанавливаются поочередно в захваты установки, размещенные в подвешенной печи вдоль оси растяжения. По достижении нужной температуры заданного интервала и после выдержки для сквозного прогрева образца (5-10 минут) он подвергается растяжению на малую степень деформации, затем установка выключается (см. т. «а» на рис. 16.2) без снятия нагрузки и наступает пауза, при которой заданная температура испытания поддерживается неизменной

(t^0 = const) до окончания опыта.

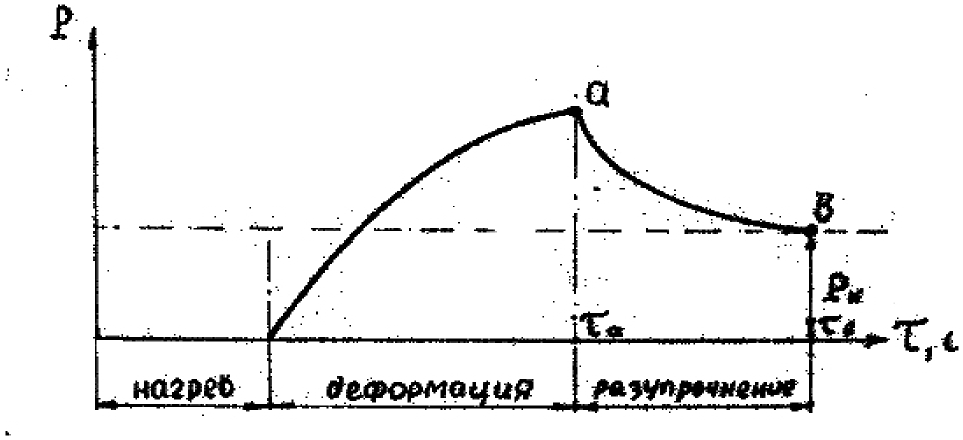


Рис. 16.2. График, характеризующий переходы нагрева, деформации и разупрочнения; τ_0 – момент остановки машины.

В период паузы $\Delta\tau$ осуществляется запись величин понижающейся нагрузки $P_т$ через каждые 15-20 с до тех пор, пока нагрузка практически станет неизменной (рис. 16.2, т. «в»). Обычно пауза составляет 2-3 минуты (чем выше температура испытания, тем меньше пауза в указанных пределах). Следующие опыты осуществляются в том же порядке. Нагрузки в конце опытов $P_к$ для каждой температуры отвечают условиям предела текучести (при $\sigma_Т = \frac{P_К}{F_0}$) и напряжению течения металла (при $\sigma_Т = \frac{P_К}{F_К}$), где F и F – начальные и конечные величины площади поперечного сечения образца, вычисленные по данным измерения диаметра каждого образца до и после опыта.

При проведении работы студенты пользуются утвержденной методикой по технике безопасности работы и правилами охраны труда.

Исходные данные для определения $\sigma_Т$ и σ_S заносятся в протокольную таблицу 16.1.

Таблица 16.1

Протокол записи исходных данных

№ образца	t^0C опыта	d_0	l_0	P_0, КН	Значения Р, кН									$P_к$, КН	lк, м	dк, м
					Через Δt, сек											
					20	40	60	80	100	120	140	160	180			
1	2	3	4	5	6а	6б	6в	6г	6д	6е	6ж	6з	6и	7	8	9

16.5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Точность результатов эксперимента оценивается соответственно методическим указаниям, приведенным в приложении. Обработка данных опытов осуществляется соответственно порядку, установленному в табл. 16.2.

Таблица 16.2

Расчетные данные

№ образца	Δt^0C опыта	F_0, $мм^2$	$F_К$, $мм^2$	$\sigma_Т$, МПА	σ_S, МПА

По данным табл. 16.2 и исходным данным (см. п. 16.3) строят графики абсолютных значений $\sigma_Т^{to}$ и σ_S^{to} и относительных их значений $\frac{\sigma_S^{t^o}}{\sigma_S}$ и $\frac{\sigma_Т^{t^o}}{\sigma_Т}$ в зависимости от температуры.

В заключение по работе отмечается влияние найденных величин на усилие и энергозатраты при деформации металла в нагретом состоянии, поскольку эти величины находятся в прямой пропорции к определяемым в данной работе. Эти данные должны послужить и для оценки эффективности обработки металлов давлением в их нагретом состоянии.

16.6. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ ПО РАБОТЕ

Содержание отчета составляется по следующей форме:

1 – реферат теоретической части;

2 – формулировка цели работы с конкретизацией характеристик материала образцов в холодном состоянии и температурных условий выполненной работы;

3 – таблицы, содержащие исходные и полученные данные;

4 – графики изменения величин σ_T^{to} и σ_S^{to} от температуры в заданном интервале;

5 – выводы, содержащие перечисление возможных объектов использования полученных данных.

16.7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Для чего необходимы сведения о пределе текучести и напряжения течения металла?
2. В каких расчетах необходимы значения величин σ_T и σ_S?
3. В чем заключаются трудности определения величин σ_T и σ_S?
4. Какое влияние оказывает термодинамическое разупрочнение металла на величины σ_T и σ_S?
5. Во сколько раз снижается предел текучести (напряжение течения) при температуре начала и конца обработки давлением?

16.8. ЛИТЕРАТУРА

1. Полухин П. И., Гун Г. Я., Галкин А. М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. Справочник. – М. : Металлургия, 1976.

2. Охрименко Я. М. Методика определения предела текучести металлов в нагретом состоянии. //Заводская лаборатория. Т. XX1X, № 8, 1963, с. 976-978.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 17

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ И КОМПОНЕНТ ДЕФОРМАЦИИ В ЗАГОТОВКЕ ПРИ ПРЯМОМ И ОБРАТНОМ ПРЕССОВАНИИ ПРУТКОВ

(2 часа)

17.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Изучение методики определения интенсивности и компонент деформации в заготовке при прямом и обратном прессовании, исследование зависимости распределения интенсивности и компонент деформации от способа прессования, коэффициента вытяжки, геометрии матрицы и скорости прессования;
- Приобретение практического навыка работы с инструментом для прессования и прессом, ознакомление с устройством и работой используемых приборов и приспособлений.

17.2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Для получения определенного ассортимента прутков, профилей и труб в промышленности нашли весьма широкое применение процессы прямого и обратного прессования [1].

При прямом прессовании (рис. 17.1 а) металл заготовки выдавливается через матрицу 1 из контейнера пресса 2 под воздействием сил, создаваемых прессштемпелем 3. При этом получается изделие 4 с поперечным сечением, соответствующим форме очка матрицы.

При прямом способе прессования вследствие сдвига заготовки относительно контейнера возникают силы трения сопротивляющегося действия, направленные против истечения металла через канал матрицы.

При обратном прессовании (рис. 17.1 б) металл заготовки выдавливается через матрицу 1 из контейнера пресса 2 под воздействием сил, создаваемых матрицей, закрепленной на полом шплинтоне 3.

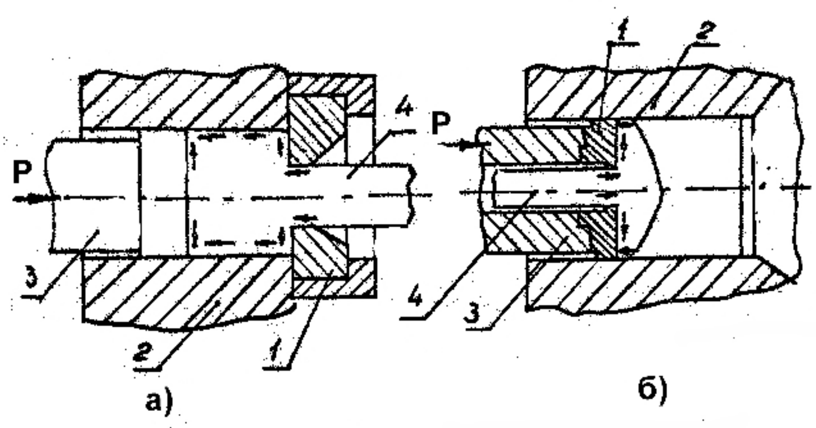


Рис. 17.1. Схемы прямого (а) и обратного (б) прессования.

Для обратного способа прессования характерно отсутствие сил трения практически по всей боковой поверхности заготовки и на ее торце у прессшайбы, так как смещение заготовки относительно контейнера отсутствует. Однако на небольшом участке боковой поверхности заготовки в зоне очага деформации имеются силы трения активного действия.

Характер течения металла при прямом и обратном прессовании отличен, чему соответствуют неодинаковая форма очага деформации и, как следствие этого, различные условия истечения металла.

Качественные различия пластического деформирования этих двух способов прессования можно получить при оценке деформированного состояния металлов с применением метода делительных сеток.

Все экспериментальные методы исследования процессов пластического формоизменения можно разделить на три основные группы [2], описанные ниже.

1. Метод конечных деформаций, основанный на сопоставлении конечной формы и размеров ячеек с исходными.

В основе метода конечных деформаций лежит теорема о преобразовании элементарной сферы в результате процесса конечного формоизменения в эллипсоид, главные оси которого совпадают с направлением главных осей деформации.

2. Поэтапные методы исследования базируются на деформационной теории. На каждом этапе все характеристики процесса формоизменения определяются так же, как и в случае конечных деформаций. Результирующее значение интенсивности главных логарифмических деформаций e_i получается суммированием этапных значения ε_{in} :

$$e_i = \sum_{1}^{n} \varepsilon_{in} \, . \qquad (17.1)$$

Поэтапные методы исследования конечных деформаций могут быть использованы для изучения немонотонных процессов. Направление главных осей деформации на каждом этапе должно совпадать с направлением главных осей напряжения.

3. Методы, базирующиеся на теории течения, в дальнейшем условно называемые методами течения, основанными на непрерывном наблюдении за изменением формы и размеров ячейки делительной сетки; которые рассматриваются как непрерывные функции некоторого параметра, чаще всего времени или перемещения.

Текущие значения компонентов скоростей деформации определяются в любой стадии процесса в произвольной системе координат и используются как для нахождения текущего положения главных осей скоростей деформаций, так и для определения интенсивности скорости деформации $\dot{\varepsilon}_i$.

Значение степени деформации находится интегрированием по параметру

$$e_i = \int_0^t \dot{\varepsilon}_i \cdot dt. \quad (17.2)$$

В соответствии с теорией пластического течения считается, что главные оси скорости деформации совпадают с главными осями напряжений.

Принимается допущение, что в пределах объема, ограниченного ячейкой делительной сетки, тело считается изотропным, а деформация однородной.

Полученные характеристики процесса формоизменения являются средними и при относительно небольшой площади ячейки могут быть отнесены к центру ячейки и рассматриваются как локальные. Точность такой локальной характеристики зависит от степени неоднородности деформации и должна увеличиваться с уменьшением размеров ячейки делительной сетки.

Для исследования осесимметричной деформации координатная сетка наносится в плоскости симметрии.

Сетка наносится любым из известных методов [2], наиболее простым является способ царапания, позволяющий получить главным образом прямоугольные сетки.

На плоскую поверхность сетки чаще наносят на строгальном станке. При этом образец закрепляется на столе станка, перемещение стола за один проход делают равным шагу сетки. Сетку наносят резцом или иглой. Достаточно точные сетки малого шага наносят с помощью инструментального микроскопа.

Для подсчета локальных деформаций использованы выражения (17.2) (рис. 17.2):

$$\varepsilon_2 = \ln\frac{l}{l_0};\ \varepsilon_r = \ln\frac{b}{b_0};\ \varepsilon_\theta = \ln\frac{r}{r_0}. \tag{17.3}$$

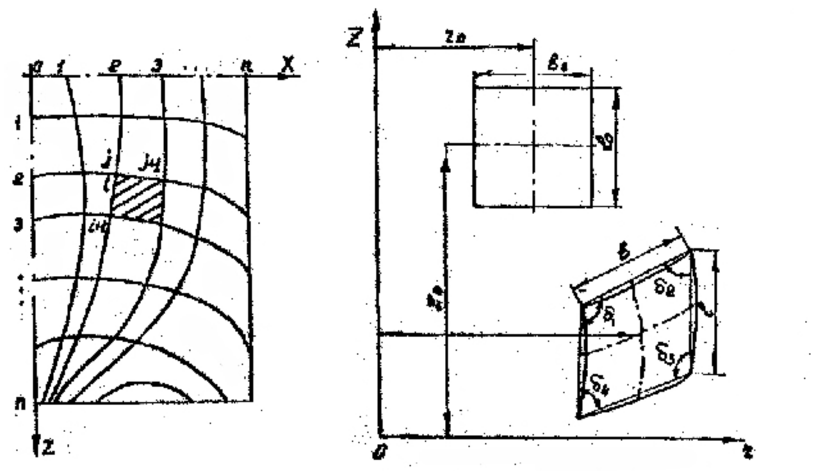


Рис. 17.2. Деформированная координатная сетка и схема определения компонентов деформации.

Интенсивность деформации определяется из выражения (17.3):

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{(\varepsilon_z - \varepsilon_r)^2 + (\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_z)^2 + \frac{2}{3}\gamma_{rz}}, \tag{17.4}$$

где ε_z, ε_r,ε_θ – осевые, радиальные и тангенциальные деформации;

l_0, l, b_0, b – начальные и конечные параметры ячеек;

r_0, r – расстояния от геометрического центра ячейки до оси симметрии до и после деформации;

γ_{rz} – деформация сдвига, определенная разностью значений углов до и после деформирования, которую найдем из выражения (17.5):

$$\gamma_{rz} = tg\gamma_{cp};$$

$$\gamma_{cp} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\gamma_i^2}{}}; \qquad (17.5)$$

$$\gamma_{rz} = tg0{,}5\sqrt{\left(\frac{\pi}{2}-\delta_1\right)^2+\left(\frac{\pi}{2}-\delta_2\right)^2+\left(\frac{\pi}{2}-\delta_3\right)^2+\left(\frac{\pi}{2}-\delta_4\right)^2}.$$

Данные деформированной координатной сетки снимались на инструментальном микроскопе или с помощью кодировщика графической информации.

Блок-схема алгоритма расчета интенсивности и компонент деформации показана на рис. 17.3, а программа расчета на ЭВМ дается в конце работы в приложении 8.1.

17.3. ОБОРУДОВАНИЕ, ИНСТРУМЕНТ, ОБРАЗЦЫ

Данная работа проводится на гидравлическом прессе модели ДБ2426А усилием 0,4 МН с использованием разъемных координированных образцов ∅ 50х60 мм из технически чистого свинца с $\sigma_т$ = -16+20 МПа. На двух образцах с шагом 2 мм нанесена сетка. Схема инструментальной наладки приведена на рис. 17.4.

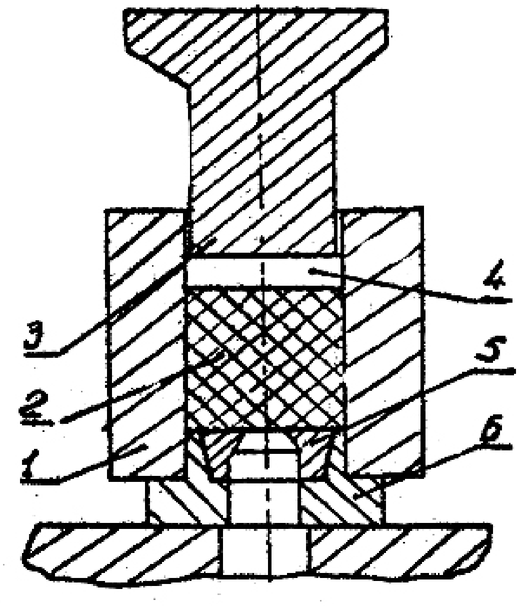


Рис. 17.4. Схема установки для прессования прутков прямым и обратным способом.

Инструмент состоит из контейнера 1, в котором помещается образец 2, полого пресс-штемпеля 3, пресс-шайбы 4, разъемной матрицы 5 и матрицедержателя 6.

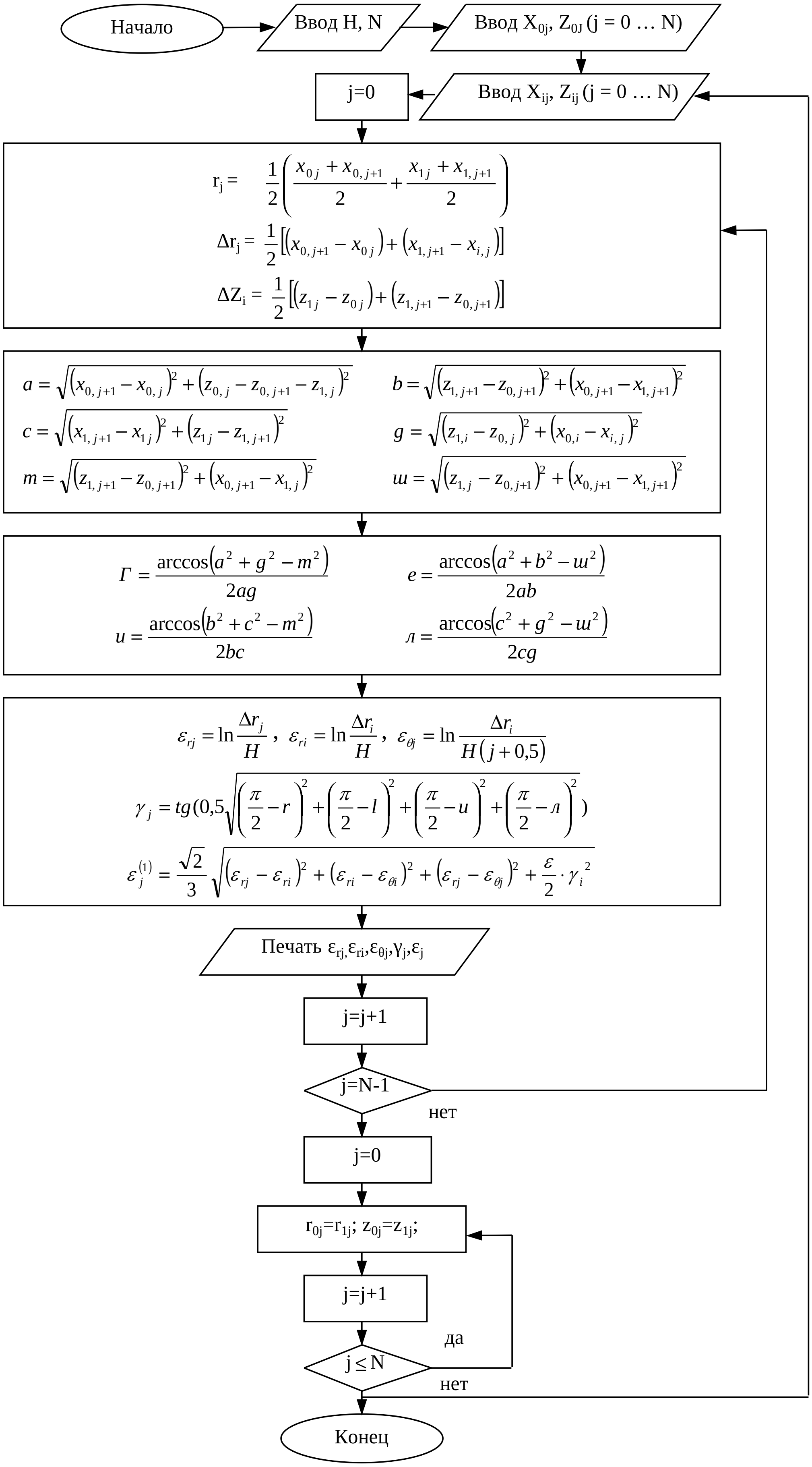


Рис. 17.3. Блок-схема алгоритма расчета компонентов и интенсивности деформации для процессов прессования.

17.4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ И УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

1. На бригаду из 2-3 студентов выдается индивидуальное задание и два образца с координатной сеткой.

Индивидуальное задание выбирается руководителем из сочетания трех параметров процесса: коэффициента вытяжки λ_c, геометрии матрицы 2α и скорости прессования (табл. 17.1)

Таблица 17.1

Варьируемые параметры процесса прессования

№ варианта	Скорость прессования		Коэффициент вытяжки			Геометрия матрицы,		
	1 мм/с	5 мм/с	10	15	20	180^0	150^0	120^0
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	+				+	+		
2		+	+			+		
3	+			+		+		
4		+			+	+		
5	+		+				+	
6	+		+					+
7		+		+			+	
8		+			+		+	

9		+			+			+
10		+		+				+

2. Измерить штангенциркулем длину и диаметр образцов и размеры канала матрицы.

3. Изучить инструкцию по технике безопасности при работе на гидравлическом прессе, сборке и разборке, инструментальной наладки.

4. Обезжирить образцы и инструмент для получения сил контактного трения.

5. Собрать инструментальную наладку, ввести образец в полость контейнера и пропрессовать его по заданному режиму до высоты прессостатка, равной 0,5 его начальной высоты.

6. Разобрать инструмент, освободить матрицу от прутка и прессостатка, разделить прессостаток, подготовить инструмент для второго образца и отпрессовать его по требуемому режиму.

7. При проведении работ на прессе студенты обязаны соблюдать основы безопасной работы в соответствии с инструкцией для студентов «Основы техники безопасности».

8. Снять координаты с деформированной делительной сетки на микроскопе УИМ-23 и записать данные в табл. 17.2.

Таблица 17.2

Результаты снятия координат делительной сетки

Способ прессования	Номера продольных линий делительной сетки			
	1	2	3…	n

	1	1	2	2	X_3	$У_3$	n	n
1								
2								
3								
…								
К								

9. Ввести программу в память ЭВМ (программа дается в приложении) и исходные данные из табл. 17.2.

10. Просчитать данные эксперимента согласно программы.

17.5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

По данным распечатки построить графики зависимостей $\varepsilon_z = f(r,z)$; $\dot{\varepsilon} = f(r,z)$.

17.6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Конспект теоретической части работы.
2. Эскиз прессостатка с искаженной координатной сеткой.
3. Таблицы, исходные измерения и расчетные результаты компонент ε_z и интенсивности деформации $\dot{\varepsilon}$.
4. Графическое выражение зависимости $\varepsilon_z = f(r,z)$; $\dot{\varepsilon} = f(r,z)$.
5. Выводы, содержащие:

а) констатирующую часть (что получено);

б) теоретическое объяснение расхождения характера течения металла при прямом и обратном прессовании.

17.7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем принципиальная разница процессов прямого и обратного прессования?
2. Какие методы исследования процессов пластического формоизменения основаны на изучении искаженной деформированной сетки?
3. При каких условиях процесс течения металла при прессовании является установившимся?
4. Как по координатной сетке отличить установившийся процесс от неустановившегося?
5. Как определяется средняя скорость и степень деформации?
6. Как определяются при осесимметричной деформации компоненты и интенсивность деформации?
7. Как объяснить закономерности распределения компонент и интенсивности деформации при прямом и обратном прессовании?

Приложение

Таблица переменных

Пере-менная	Иденти-фикатор	Размер-ность	Обозначает
1	2	3	4
Исходные данные			
H	H	мм	сторона ячейки
N	ы,i	«	количество ячеек
X_{oj}	Y_j	«	горизонтальная координата верхних узлов
Z_{oj}	t_i	«	вертикальная координата верхних узлов
X_{1j}	X_j	«	горизонтальная координата нижних узлов
Z_{1j}	Z_j	«	вертикальная координата нижних узлов
Переменные			
j	j,S	«	номер ячейки
r_j	r_1	«	расстояние до середины ячейки
Δr_j	r_0	«	деформация ячейки в горизонтальном направл.
Δz_j	l	«	деформация ячейки в вертикальном направл.
a	a	«	сторона ячейки
b	b	«	«

с	с	«	«
у	у	«	«
m	m	«	диагональ ячейки
ш	ш	«	диагональ ячейки
г	г	рад	угол ячейки
е	е	«	«
и	и	«	«
л	л	«	«
Результаты			
ε_{rj}	M_1	«	радиальная деформация
ε_{zj}	M_2	«	осевая деформация
ε_{0j}	M_3		тангенциальная деформация
γ_j	M_4		сдвиговая деформация
ε_j	M_5		интенсивность деформации

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 18

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КАСАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И СДВИГОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗАГОТОВКИ У КОНТЕЙНЕРА И ИГЛЫ-ОПРАВКИ ПРИ ПРЕССОВАНИИ ТРУБ

(2 часа)

18.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Ознакомление с одной из методик определения интенсивности деформации и касательных напряжений на контактной поверхности заготовки и иглы-оправки при прямом прессовании с закрепленной и незакрепленной иглой-оправкой;
- Изучение зависимости распределения интенсивности деформации и касательных напряжений вдоль контактной поверхности иглы-оправки для двух сопоставительных способов прессования.

18.2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Одним из существенных недостатков прямого прессования труб с применением технологической смазки является низкое качество внутренней поверхности изделия. Получение труб указанным способом приводит к образованию плен, отслоений, надиров и других дефектов. Прессование труб без применения технологической смазки приводит к обрыву иглы-оправки в результате появления в ней недопустимо больших растягивающих напряжений.

Наиболее широкое применение нашел способ прямого прессования, когда игла-оправка неподвижна W_n = 0. Однако этот способ осуществляется только при применении смазки иглы-оправки, что приводит к выше перечисленным дефектам.

Закрепление иглы-оправки на прессштемпеле улучшает условия работы иглы-оправки, но затрудняет процесс отделения пресс-остатка (рис. 18.1).

В настоящее время большинство отечественных прессов оснащены мощным приводом перемещения иглы-оправки, который позволяет в процессе прессования перемещать иглу-оправку по любому кинематическому режиму, когда:

а) $W_{иг} < W_{пm}$, б) $W_{иг} = W_{пm}$, в) $W_{иг} > W_{пm}$.

Увеличение скорости иглы-оправки выше скорости перемещения прессштемпеля, но меньше скорости истечения, позволяет навести на поверхности заготовки силы трения активного действия, которые направлены в сторону истечения металла за исключением участка вблизи и в самом канале матрицы, где они оказывают сопротивление течению металла.

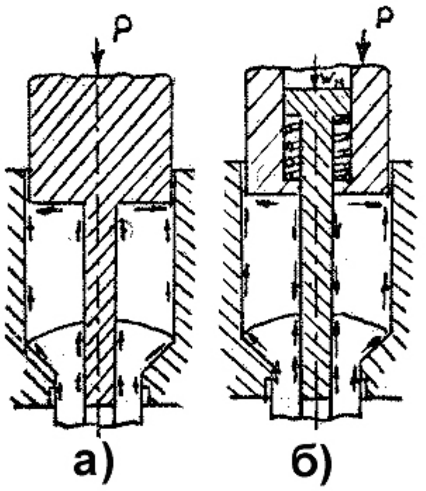


Рис. 18.1. Кинематическая схема прессования труб с закрепленной (а) и незакрепленной (б) иглой – оправкой.

Такой способ прессования труб перспективен и может быть осуществлен без применения смазки на игле-оправке. Изделия отличаются повышенным качеством внутренней поверхности.

Дальнейшее увеличение скорости иглы-оправки до скорости истечения и даже выше позволяет навести силы трения активного действия на всей контактной поверхности заготовки, однако это требует применения чрезмерно длинных игл-оправок.

Вызывает определенный интерес способ прессования труб с применением незакрепленной иглы-оправки. Такой процесс прессования осуществляется на прессе, когда в исходном положении игла-оправка отведена в крайнее заднее положение и имеет возможность свободно перемещаться внутри прессштемпеля.

В момент прессования на части иглы-оправки, находящейся в зоне очага деформации, появляются силы трения, направленные в сторону истечения металла. При этом незакрепленная игла-оправка перемещается в ту же сторону со скоростью меньшей, чем скорость истечения, но большей, чем скорость прессования.

Принудительное протаскивание иглы-оправки через деформируемый объем заготовки сопровождается наведением сил трения активного действия на внутренней поверхности трубы практически по всей длине контейнера.

На рис. 18.1 б показана схема распределения сил трения на инструменте и металле в процессе прессования труб. Силы трения на различных участках иглы-оправки направлены в противоположные стороны. В зоне очага деформации на участке l_1 силы трения на игле-оправке направлены в сторону истечения металла

$$\tau' = \varepsilon_i S' \cdot \mu \cdot \sigma_r , \tag{18.1}$$

а по всей длине заготовки – в противоположную сторону

$$\tau'' = \varepsilon_i S'' \cdot \mu \cdot \sigma_R , \tag{18.2}$$

где S’ и S" – поверхности соответствующих участков иглы-оправки;

σ_r и σ_R – радиальные напряжения соответственно в зоне истечения и в зоне заготовки,

μ – коэффициент трения между иглой-оправкой и металлом.

Соотношение действующих сил трения на иглу-оправку определяет направление перемещения иглы-оправки в процессе прессования. Прессование труб в условиях активного действия сил трения от иглы-оправки на заготовку происходит при $\tau' > \tau''$.

Значение τ' для конкретного случая прессования в условиях постоянной температуры и скорости прессования является величиной постоянной, которая определяется для данного прессуемого металла диаметром иглы-оправки, шириной пояска канала матрицы, коэффициентом трения и радиальным напряжением σ_r.

Значение τ'' в тех же условиях является величиной переменной, которая определяется текущей высотой слитка, диаметром иглы-оправки, коэффициентом трения и радиальным напряжением σ_R .

В процессе прессования значение τ'' уменьшается, что сопровождается увеличением скорости перемещения иглы-оправки при возрастании кинематического коэффициента

$$K_w = W_и/W_{nm}, \qquad (18.3)$$

где $W_и$ и W_{nm} – соответственно скорости иглы-оправки и прессштемпеля.

Варьируя шириной пояска канала матрицы, можно установить высоту слитков, при которой сразу же после распрессовки заготовки выполняется условие $\tau' > \tau''$. В таком случае прессование начинается при одновременном движении иглы-оправки в сторону истечения металла.

Для исследования характера течения металла при прессовании труб с иглой-оправкой, закрепленной к прессштемпелю, и с незакрепленной иглой-оправкой любым известным способом наносится координатная сетка в плоскости симметрии. Лучше сетку наносить на инструментальном микроскопе.

Комплексной оценкой равномерности деформации прессуемых заготовок являются компоненты и интенсивность деформации, а также касательные напряжения. Данными для их расчета являются положения точек искаженной координатной сетки заготовок, уравнение пластичности и уравнение связи, показывающее зависимость напряжения от деформации $\sigma = f(\varepsilon)$ – для холодной деформации, установленную при осадке образцов, изготовленных из того же сплава. Можно эту зависимость построить по справочным данным (рис. 18.2).

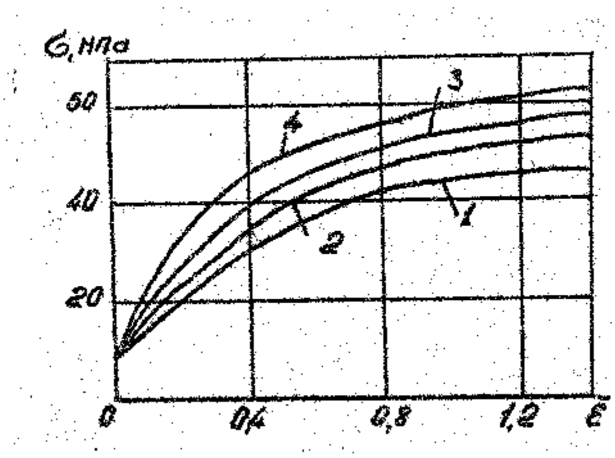


Рис. 18.2. Кривые деформационного упрочнения свинца 2,1% при температуре 20^0 С. Скорость деформации, c^{-1}: 1 - 2; 2 - 3; 3 - 6; 4 – 12.

Расчет компонент деформаций проводим по известным выражениям:

- для радиальной деформации $d\sigma_r = \frac{dl_r}{l_r}$, (18.4)

- для осевой деформации $d\sigma_z = \frac{dl_z}{l_z}$, (18.5)

- для тангенциальной деформации $d\varepsilon_\theta = -\left(d\varepsilon_r + d\varepsilon_\theta^{-1}\right)$, (18.6)

- для сдвиговой деформации $d\gamma_{rz} = dtg\alpha$, (18.7)

где l_r, l_z – размеры искаженных ячеек в r и z направлениях.

С учетом значений компонент деформации интенсивность деформации определяем из выражения:

$$d\varepsilon = \sqrt{\frac{(d\varepsilon_r - d\varepsilon_\theta)^2 + (d\varepsilon_\theta - d\varepsilon_z)^2 + (d\varepsilon_z - d\varepsilon_r)^2 +}{2} + \frac{3}{4} d\gamma_{rz}} \,. \tag{18.8}$$

Для расчета касательных напряжений используем уравнение пластичности:

$$\tau_{rz} = \frac{\sigma}{3} \cdot \frac{d\gamma_{rz}}{d\varepsilon} \,. \tag{18.9}$$

В этом уравнении значение эффективного напряжения σ для каждого отдельного элемента установили из зависимости $\sigma = c\varepsilon^n$ по ранее рассчитанной величине интенсивности деформации для каждого элемента.

Данные деформированной координатной сетки снимались на инструментальном микроскопе или с помощью кодировщика графической информации.

18.3. ОБОРУДОВАНИЕ, ИНСТРУМЕНТ, ОБРАЗЦЫ

Данная работа проводится на гидравлическом прессе модели ДБ2426А усилием 0,4 МН на разъемных координированных образцах диаметром 40 мм и высотой 10, 60 и 80 мм из сплава свинца и сурьмы.

Схема инструментальной наладки приведена на рис. 18.4.

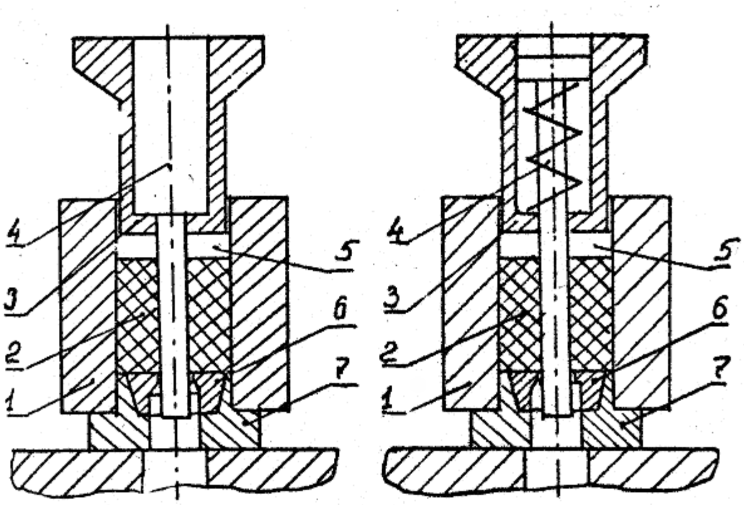


Рис. 18.4. Эскиз инструментальной наладки.

Инструментальная наладка состоит из контейнера 1, в который помещается образец 2, полого прессштемпеля 3 с иглой-оправкой 4, прессшайбы 5, разъемной плоской матрицы 6 и матрицедержателя 7.

18.4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. На бригаду из 2-3 студентов выдается индивидуальное задание и два образца с координатной сеткой.

Индивидуальное задание выбирается преподавателем из сочетания трех параметров процесса: коэффициентов вытяжки $\lambda_{ср}$, высоты образца и ширины калибрующего пояска матрицы (табл. 18.1).

2. Измерить штангенциркулем длину и диаметр образцов и размеры канала матрицы.

3. Изучить инструкцию по работе на гидравлическом прессе, сборку и разборку инструментальной наладки.

Таблица 18.1

Варьируемые параметры процесса прессования

№ варианта	Коэффициент вытяжки, $\lambda_{ср}$			Высота образца, мм			Ширина калибрующего пояска матрицы, мм		
	0	15	20	40	60	80	1	2	4
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	+					+	+		
2		+				+	+		
3			+			+	+		
4	+				+			+	
5		+			+			+	
6			+						+
и т.д.									

4. Обезжирить образцы и инструмент для получения максимальных сил трения.

5. Собрать инструментальную наладку, ввести образец в полость контейнера и пропрессовать его с применением закрепленной иглы-оправки по заданному режиму до высоты прессостатка, равной 0,5 его начальной высоты.

6. Разобрать инструмент, освободить матрицу от прутка и прессостатка, разделить прессостаток, подготовить инструмент для второго образца и отпрессовать его, но с незакрепленной иглой-оправкой.

7. При проведении работ на прессе студенты обязаны соблюдать основы безопасной работы в соответствии с инструкцией для студентов «Основы техники безопасности».

8. Снять координаты для двух линий вблизи иглы-оправки делительной сетки на микроскопе УИМ-23 или на кодировщике графической информации и записать данные в табл. 18.2.

Таблица 18.2

Результаты снятия координат делительной сетки

Номер образца	Номера продольных линий делительной сетки							
	Игла закреплена				Игла не закреплена			
	X_1	$У_1$	X_2	$У_2$	X_1	$У_1$	X_2	$У_2$
1								
2								
3								
…								
n								

9. Ввести программу и исходные данные из табл. 18.2 в память «АРМ-8».

10. Просчитать данные экспериментов с выводом на печать значений.

18.5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕПРИМЕНТА

По данным расчета построить графики зависимостей

$$\bar{\varepsilon} = f\left(\frac{H_T}{H_0}\right), \quad \tau_{rz} = f\left(\frac{H_T}{H_0}\right),$$

где H_T – текущая высота образца, мм

H_O – начальная высота образца, мм

18.6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Конспект теоретической части работы.

2. Эскиз прессостатка с искаженной делительной сеткой.

3. Таблицы, содержащие исходные измерения и расчетные результаты интенсивности деформации $\bar{\varepsilon}$ и касательных напряжений τ_{rz}.

4. Графические выражения $\bar{\varepsilon} = f\left(\frac{H_T}{H_0}\right)$, $\tau_{rz} = f\left(\frac{H_T}{H_0}\right)$.

5. Выводы, содержащие:

а) констатирующую часть (что получено);

б) теоретическое объяснение расхождения характера течения металла вблизи иглы-оправки при прессовании труб с закрепленной и незакрепленной иглой-оправкой.

18.7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие способы прессования труб вам известны?
2. В каких кинематических условиях работает незакрепленная игла-оправка?
3. Как изменяется скорость незакрепленной иглы-оправки?
4. Напишите условия равновесия иглы-оправки.
5. Как определить зависимость эффективного напряжения от степени деформации?
6. Как определить касательное напряжение вдоль контактной поверхности иглы-оправки и деформируемого металла?
7. Как объяснить закономерности распределения интенсивности деформации с закрепленной и незакрепленной иглой-оправкой?

18.8. ЛИТЕРАТУРА

1. Перлин И. Л., Райтберг Л. Х. – Теория прессования металлов. М. : Металлургия, 1975. – С. 160-165.

2. Охрименко Я. М., Щерба В. Н. Влияние скорости холодного прессования труб на характер течения металла. //Сб. «Теория и технология ОМД», № 129. – М. : Металлургия. – С. 32-37.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 19

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРУЖИНЕНИЯ ПРИ ГИБКЕ

(2 часа)

19.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Углубление и закрепление знаний о зависимости угла пружинения от свойств материала, радиуса изгиба, угла гибки, толщины материала;
- Изучение конструкции гибочного штампа;
- Приобретение практического навыка работы с угломером и радиусомером.

19.2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Гибка – это распространенная операция листовой штамповки, сопровождающаяся упругой и пластической деформациями материала. Зоны упругой деформации находятся вблизи нейтральной линии деформации. Величина упругой зоны зависит от величины деформации при гибке полосы, т.е. от величины угла и радиуса гибки. После снятия нагрузки вследствие действия упругих напряжений происходит изменение размеров изделия по сравнению с размерами, заданными инструментом. Это явление называется упругим пружинением. Количественно пружинение оценивается углом пружинения β (рис. 19.1):

$$\beta = \frac{\alpha_1 - \alpha_0}{2}. \qquad (19.1)$$

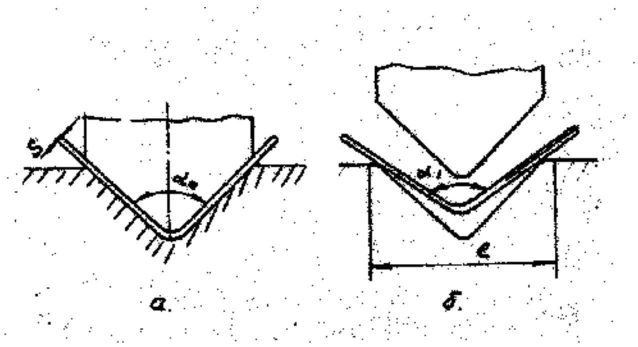


Рис. 19.1. Изменение угла гибки за счет пружинения: а) - заготовка в штампе; б) - заготовка после снятия нагрузки.

Величина угла пружинения может быть определена аналитическим расчетом величины упругой деформации или экспериментально с помощью испытаний и замеров.

Для V-образной гибки угол пружинения может быть определен приблизительно по формуле В. Романовского

$$tg\beta = 0{,}375\frac{l}{\text{K}\cdot S}\cdot\frac{\sigma_S}{E}, \qquad (19.2)$$

где β – угол пружинения;

К – коэффициент, определяющий положение нейтрального слоя в зависимости от r/S.

r/S	0,1	0,5	0,7	1,0	1,5	2,5	3,0	5,0	7	10
K	0,7	0,62	0,6	0,58	0,56	0,54	0,53	0,52	0,51	0,50

l – расстояние между опорами матрицы ,мм;

S – толщина материала, мм;

σ_s –предел текучести материала, МПа;

Е – модуль упругости (для стали Е = $2{,}1\cdot10^5$ МПа).

При гибке с большими радиусами закругления (r > 10S) определяют не угловое пружинение, а упругое изменение радиуса после гибки. Величину остаточной деформации (ε_0) крайних волокон можно определить по приближенной формуле:

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{2\frac{r}{S}+1}. \qquad (19.3)$$

Величина полной деформации (ε_n) будет равна сумме ε_0 и упругой деформации ($\varepsilon_{упр}$).

Исходя из этого, можно определить искомый (скорректированный) радиус пунсона по формуле:

$$r = 0{,}5S\left(\frac{1}{S_n}-1\right), \qquad (19.4)$$

где S_n – толщина материала в зоне действия пуансона, мм

В работе исследуется с помощью планирования эксперимента влияние на величину угла пружинения свойств материала, его толщины, радиуса и угла гибки.

Исследование пружинения при гибке проводится на различных материалах – малоуглеродистой стали, меди и алюминиевом сплаве. В табл. 19.1 приведены величины нормального модуля упругости (E) для некоторых металлов и предела текучести для сплавов на их основе.

Таблица 19.1

Модуль нормальной упругости и предел текучести металлов и их сплавов

Металл	Модуль нормальной	Сплавы (марки)	Предел текучести	$\sigma_{0,2}/E$

	упругости, E, МПа		$\sigma_т$ ($\sigma_{0,2}$) МПа (листы)	
1	2	3	4	5
Магний	$4{,}57 \cdot 10^4$	МА1	120-140	$(25{:}2\text{-}30{,}5) \cdot 10^{-4}$
		МА2	160-180	
		МА2-1	160-230	
		МА8	140-160	
		МА12	130-180	
1	2	3	4	5
		МА15	250-260	$57 \cdot 10^{-4}$
Алюминий	$7{,}20 \cdot 10^4$	АМГ6 (отож.)	160	$22{,}2 \cdot 10^{-4}$
		АМГ6 (нагарт.)	280	
		Д1	190-200	
		Д16 (зак., стар.)	340-350	
		Д16 (зак., нагарт., стар.)	430-460	
		В95 (зак., стар.)	420-460	
Титан	$11{,}2 \cdot 10^4$	ВТ5-1	650-830	$58 \cdot 10^{-4}$
		ОТ4	550-650	
		ВТ15	850-1180	

		ТС6	1520-1590	$140 \cdot 10^{-4}$
Медь	$12,1 \cdot 10^{4}$	М1 (мягк.)	90-150	$7,45 \cdot 10^{-4}$
		М1 (тверд.)	300-450	
		Л63	520-600	$49,5 \cdot 10^{-4}$
Железо	$21,4 \cdot 10^{4}$	Ст. 3кп	240	$11,4 \cdot 10^{-4}$
		08	200	
		10	210	
		30	300	
		40	340	
		30Х	700	
		40Х	800	
		30Х1СА	850	$40 \cdot 10^{-4}$

19.3. ОБОРУДОВАНИЕ, ИНСТРУМЕНТ, МАТЕРИАЛЫ

Для работы используется гидравлическая испытательная машина усилием 5 тс. Штамп для одноугловой гибки (рис. 19.2) со сменными матрицами и пуансонами с углами гибки 60^0, 90^0, 120^0, матрицы и пуансоны имеют следующие радиусы скругления (для $\alpha = 90^0$, r = 3,5; 10; 15 мм; для $\alpha = 60^0$ и 120^0 r = 5; 10; 15 мм).

Измерительный инструмент – штангенциркуль, угломер, радиусомер, линейка.

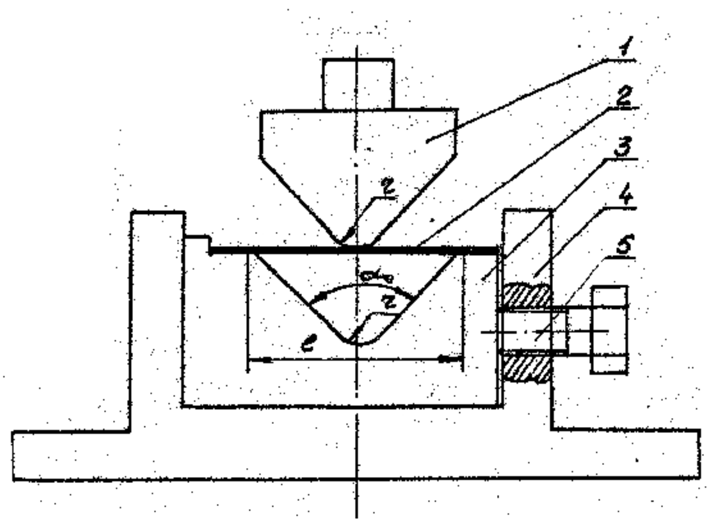


Рис. 19.2. Схема штампа для гибки: 1 – пуансон; 2 – заготовка; 3 – матрица; 4 – корпус; 5 – стопорный винт.

Образцы из листа малоуглеродистой стали, меди, алюминиевого сплава размерами 2х25х90 мм.

19.4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. При подготовке к работе составить линейный план эксперимента, изучив приложение 8 в соответствии с целью данной работы.

2. В соответствии с выбранным планом эксперимента определяется требуемое количество образцов и соответствующие матрицы и пуансоны.

3. Провести гибку заготовок в штампе. По плану и для проверки адекватности модели провести контрольный опыт из 2-х наблюдений вне данного плана.

4. Измерить угол изгиба заготовки после гибки.

5. Определить углы пружинения.

19.5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Произвести расчеты коэффициентов регрессии и составить уравнение регрессии (см. приложение).

2. Произвести расчет угла пружинения (по формуле 19.2).

3. Построить графики зависимости угла пружинения β для каждого материала от угла гибки (α) и от отношения радиуса скругления угла к толщине материала (r/S). На графиках должны быть кривые, полученные на основе эксперимента и расчетным путем (по формуле 19.2).

19.6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Конспект теоретической части, эскиз штампа.
2. Таблицы с матрицей плана эксперимента и вычислений.
3. Графики зависимости $\beta = f\left(\frac{\sigma_{\text{Т}}}{\varepsilon}\right)$, $\beta = f\left(\frac{r}{S}\right)$ при α = 60^0, 90^0, 120^0, $\beta = f(\alpha)$ при различных r/S.
4. Выводы о влиянии отдельных факторов на пружинение при гибке.

19.7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое пружинение при гибке?
2. Следствием чего является пружинение?
3. Какими показателями оценивается пружинение?
4. Как определяется расчетным путем угол пружинения при V-образной гибке?
5. Как определить угол пружинения экспериментально?
6. Как определяется пружинение при гибке с большим радиусом (при r/S>10)?

7. Какой материал будет показывать большее пружинение при гибке: наклепанный или отожженный; с большим или меньшим модулем упругости?

8. Почему при V-образной гибке с чеканкой угол пружинения может быть уменьшен?

9. Как влияет нагрев металла на величину угла пружинения при гибке?

19.8. ЛИТЕРАТУРА

1. Зубцов М. Е. – Листовая штамповка. – Л. : Машиностроение, 1980. – С. 132-236.

2. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке. – Л. : Машиностроение, 1980, С.81-86.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 20

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИИ ВЫТЯЖКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СТАКАНА

(2 часа)

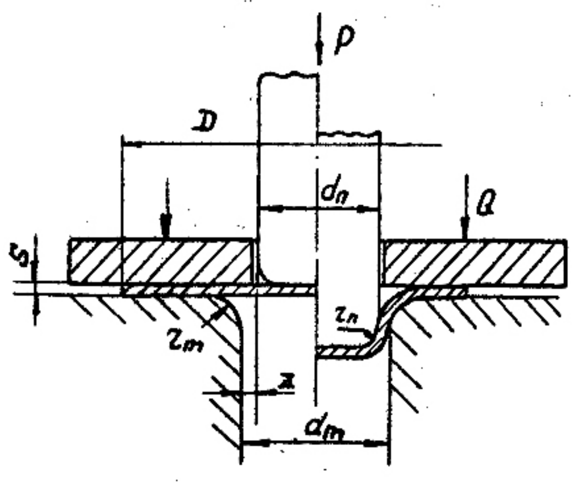
20.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Углубление знаний теории процесса глубокой вытяжки, закономерностей влияния коэффициента вытяжки, усилия прижима, радиуса скругления кромки матрицы на усилие вытяжки и напряжение в опасном сечении;
- Изучение работы испытательной машины усилием 60 кН и конструкции вытяжного штампа с пружинным складодержателем;
- Приобретение навыков работы по наладке вытяжных штампов.

20.2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Вытяжкой из плоской исходной заготовки получают целую пространственную деталь за один или несколько переходов. Первый переход называют сверткой.

В процессе вытяжки – свертки заготовка (1) толщиной S_0 и диаметром D (рис. 20.1) проталкивается пуансоном (2) диаметром d_n через матрицу (3), имеющую



отверстие диаметром d_n.

Рис. 20.1. Схема процесса вытяжки без утонения с прижимом.

Если односторонний зазор между пуансоном и матрицей $z = \frac{d_m - d_n}{2} \geq S_0$, то вытяжка осуществляется без утонения исходного материала. На практике происходит изменение толщины материала в процессе вытяжки без утонения, вследствие действующих напряжений (рис. 20.2).

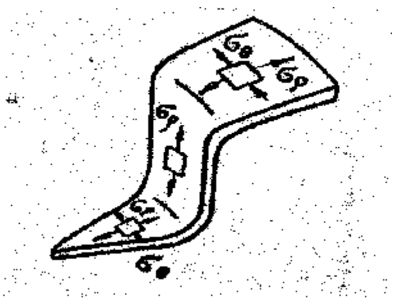


Рис. 20.2. Схема напряженного состояния при вытяжке.

Продавливание средней части заготовки через матрицу вызывает появление во фланце растягивающих напряжений σ_ρ, действующих в радиальном направлении и тангенциальных сжимающих напряжений σ_θ. Если вытяжка осуществляется без прижима, то нормальные к поверхности фланца напряжения σ_z равны нулю. Если для уменьшения вероятности складкообразования во фланце применяется прижим, то σ_z можно приближенно считать равным нулю, т.к. удельные усилия прижима составляют 1-3 МПа (0,1-0,3 кгс/мм^2), т.е. более чем на два порядка меньше напряжений текучести, а толщина заготовки мала по сравнению с ее диаметром. Следовательно, напряженное состояние с допустимой степенью точности можно принять плоским разноименным, а направления σ_ρ и σ_θ считать главными вследствие осевой симметрии (касательные напряжения $\tau_{\rho\theta} = 0$).

В вертикальных стенках образующегося стакана напряженное состояние близко к линейному растяжению.

В данной части заготовки (под торцом пуансона) действуют радиальные растягивающие напряжения (схема двухосного растяжения).

Для осуществления вытяжки необходимо, чтобы максимальное растягивающее напряжение $\sigma_{\rho max}$ в месте перехода стенки в дно не превышало напряжения текучести σ_S .

Отсюда следует, что основной задачей при рассмотрении процесса вытяжки должно быть определение $\sigma_{\rho max}$.

Уравнение равновесия для плоской задачи в полярной системе координат имеет вид

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} = 0 . \qquad (20.1)$$

Уравнение пластичности при условии, что σ_ρ и σ_θ – главные нормальные напряжения

$$\sigma_\rho - \sigma_\theta = \sigma_S . \qquad (20.2)$$

Решая совместно уравнения (20.1) и (20.2) получаем

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} = -\sigma_S \qquad (20.3)$$

Интегрируя уравнение (20.3) и используя для отыскания произвольной постоянной интегрирования граничное условие при ρ = R (по контуру заготовки)

$$\sigma_\rho = \sigma_S \ln\frac{R}{\rho}, \qquad (20.4)$$

где R – текущее значение радиуса наружной кромки фланца, мм;

ρ – радиус кривизны нейтрального сечения, мм.

Значение тангенциального сжимающего напряжения находим из условия пластичности (20.2)

$$\sigma_\theta = -\sigma_S\left(1-\ln\frac{R}{\rho}\right). \qquad (20.5)$$

Так как в опасном сечении (при переходе стенки в дно, где ρ = r напряжение σ_ρ не должно превышать σ_S, то можно определить теоретическую величину предельной степени вытяжки ($K_в$)

$$K_В = \frac{R}{r} = \frac{D_{заг}}{d} = \frac{1}{m}, \qquad (20.6)$$

где m – коэффициент вытяжки;

r – радиус дна полого изделия, мм;

d – диаметр дна полого изделия, мм;

Dзаг – диаметр заготовки, мм.

Подставляя в формулу (20.4) вместо σ_ρ значение σ_S, получим

$$\sigma_\rho = \sigma_S = \sigma_S \ln\frac{R}{r}, \quad 1 = \ln\frac{R}{r}.$$

Тогда $K_{В,\max} = \dfrac{R}{r} = e = 2{,}72, \quad m_{\min} = 0{,}37$.

В реальных условиях при вытяжке действует ряд факторов, которые не учитывались в расчетах (трение на поверхности матрицы, заготовки, прижим, изгиб и трение на скругленной кромке матрицы, упрочнение металла и другие). Поэтому практически получают $K_{в\ max}$ = 1,7-2,2 или m = 0,60-0,46.

Радиальные напряжения σ_ρ увеличиваются за счет напряжений трения $\sigma_{тр}$, вызванных действием усилия прижима Q. Суммарные силы трения, затрудняющие перемещение фланца к отверстию матрицы, будут равны 2μQ. Заменяя приближенное действие сил трения на заготовку действием нормальных напряжений, приложенных в радиальном направлении по контуру заготовки и равномерно распределенных по ее толщине

$$\sigma_{Tp} = 2\pi R S_0 = 2\mu Q,$$
$$\sigma_{Tp} = \frac{\mu Q}{\pi R S_0}. \qquad (20.7)$$

где S_0 – толщина заготовки, мм.

Приращение радиального напряжения $\Delta\sigma_\rho$, вызванное изгибом заготовки, можно найти из условия равенства работ, согласно которому работа изгибающего момента М на угле поворота сечения при изгибе должна быть равна работе силы, равной произведению $\Delta\sigma_\rho$ на площадь сечения заготовки на соответствующей пути перемещения заготовки.

$$\Delta\sigma_\rho = \sigma_S \frac{\sigma_0}{2rm + S_0}, \qquad (20.8)$$

где rm – радиус скругления кромки матрицы, мм.

Величина напряжения σ_ρ, действующая в опасном сечении и определенная без учета влияния трения на кромке матрицы, выразится формулой

$$\sigma_\rho = \sigma_S \ln\frac{R}{r} + \frac{\mu Q}{\pi R S_0} + \sigma_S \frac{\sigma_0}{2rm + S_0}. \qquad (20.9)$$

Влияние трения на кромке матрицы на увеличение радиального напряжения приближенно можно учесть множителем $e^{\mu\alpha}$ (аналогично Эйлером решена задача о трении ремня по шкиву).

$$\sigma_\rho = \sigma_S\left(\ln\frac{R}{r} + \frac{\mu Q}{\pi R S_0} + \frac{\sigma_0}{2rm + S_0}\right)\cdot e^{\mu\alpha}. \tag{20.10}$$

Максимальное трение по кромке матрицы достигается после полного охвата заготовкой кромки матрицы, т.е. при $\alpha = \frac{\pi}{2}$

$\sigma_\rho = \sigma_{\rho,\max}$.

Тогда формула (20.10) примет вид

$$\sigma_{\rho,\max} = \sigma_S\left(\ln\frac{R}{r} + \frac{\mu Q}{\pi R S_0} + \frac{\sigma_0}{2rm + S_0}\right)\cdot(1 + 1{,}6\mu). \tag{20.11}$$

Влияние упрочнения можно учесть по линейной или степенной зависимости:

по линейной $$\sigma_S = \sigma_{S0} + \prod\psi; \tag{20.12}$$

по степенной $$\sigma_S \frac{\sigma_{\text{В}}}{1-\psi_{cp}}\left(\frac{\psi}{\psi_{cp}}\right)^{\frac{\psi_{cp}}{1-\psi_{cp}}}. \tag{20.13}$$

Приняв, что относительное сужение эквивалентно тангенциальной деформации, и принимая, что среднее значение напряжения текучести равно напряжению текучести у края фланца при определении σ_{scp}, можно ψ_{cp} определить по формуле

$$\psi_{cp} = \frac{R_0 - R}{R_0}, \tag{20.14}$$

где R_0 – начальный радиус заготовки, мм;

R – текущее значение радиуса наружной кромки фланца, мм;

Вытяжку можно осуществить без прижима, если

$$\frac{S_0}{D}100 \geq 1{,}7 \ \text{ или } \ D - d \leq (20 \div 22)S_0 \qquad (20.15)$$

Величину усилия прижима Q можно определить по формуле

$$Q = q \cdot F_{\Phi} = q\frac{\pi}{4}\left[D^2 - (d_m - 2r_m)^2\right], \qquad (20.16)$$

где q – удельное усилие прижима.

Для малоуглеродистых сталей	q = 2-3 МПа
для аустенитных сталей	q = 3-4 МПа
для меди	q = 1-1,5 МПа
для латуни	q = 1,5-2,0 МПа
для алюминиевых сплавов	q = 0,8-1,8 МПа

Максимальное усилие вытяжки может быть определено по формуле

$$\mathrm{P}_{\max} = 2\pi r S \sigma_{\rho\max}\,. \qquad (20.17)$$

Толщина стенки у края вытянутого стакана увеличивается вследствие действия тангенциальных сжимающих напряжений во фланце

$$S_{\max} \approx S_0\sqrt{\frac{D}{d}}. \qquad (20.18)$$

где $S_{тол}$ – толщина стенки стакана у верхней торцевой поверхности.

В зоне перехода от стенки ко дну, т.е. в опасном сечении, заготовка утоняется, и ее толщина может быть определена по формуле

$$S_{\min} \approx \frac{S_0}{\left(\frac{R}{r}\right)\left(\frac{S_0}{2r_m}\right)}. \qquad (20.19)$$

Ввиду изменения толщины стенки зазор между пуансоном и матрицей должен быть больше

$$z = \frac{d_m - d_n}{2} \geq S_0\sqrt{\frac{D}{d}}. \qquad (20.20)$$

20.3. ОБОРУДОВАНИЕ, ПРИБОРЫ И ИНСТРУМЕНТ, ОБРАЗЦЫ

Оборудование – универсальная испытательная машина (усилием 60 кН) с записью графики «усилие – ход».

Инструмент – специальный штамп с пружинным оттарированным прижимом (рис. 20.3) и комплектом пуансона и матриц с различными значениями радиусов округления кромок (рис. 20.1).

r_m = 5,0; 7,5; 10,0 мм.

D_H = 25,0.

d_n = 19,3.

Измерительный инструмент – штангенциркуль, микрометр.

Образцы – круглые заготовки из малоуглеродистых сталей, мягкой отожженной меди и алюминиевого сплава $D_{заг}$ = 50 мм.

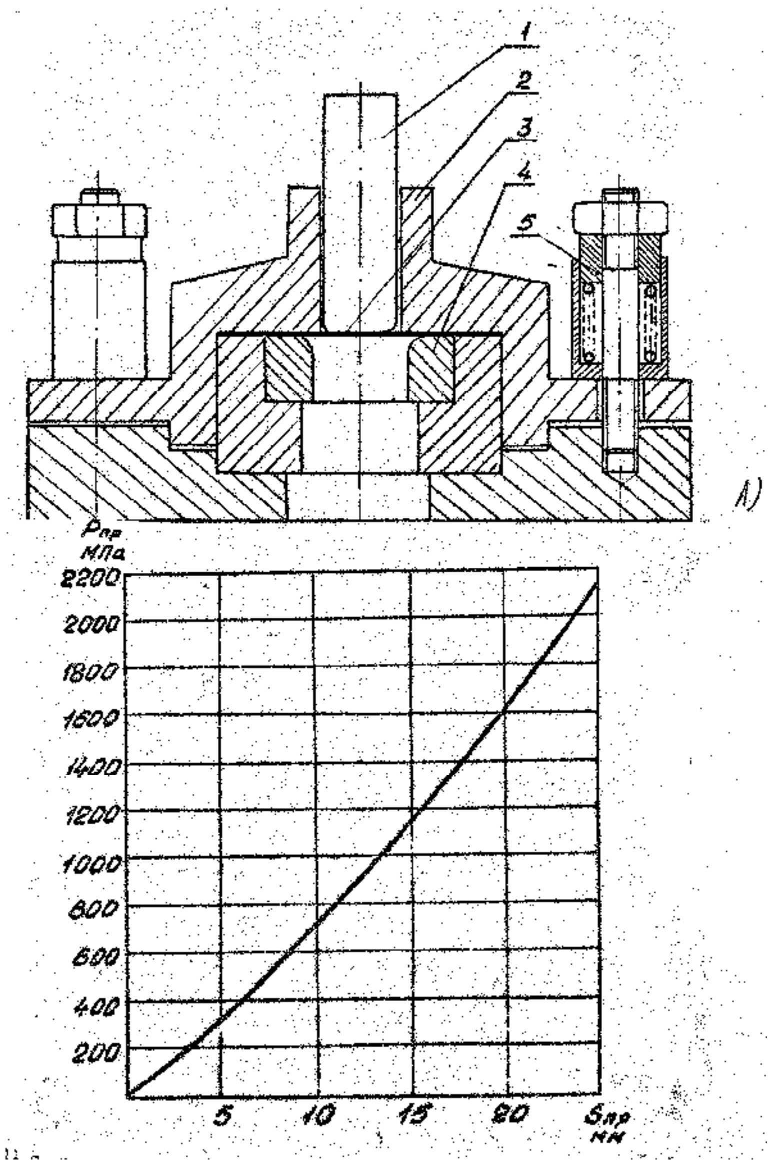


Рис. 20.3. Эскиз штампа для вытяжки с регулируемым усилием прижима:

А) 1 – пуансон; 2 – прижим; 3 – заготовка; 4 – сменная матрица; 5 – пружинное устройство.

Б) тарировочный график усилия прижима от величины сжатия пружины.

20.4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

Половина группы, выполняющая работу, делится на 3-4 бригады (по 3-4 человека). Каждая бригада выполняет работу на трех выбранных материалах на матрице с определенным радиусом округления кромки из ряда 5,0; 7,5; 10 мм и определенных усилиях прижима ($Q_{расч}$, – 250, $Q_{расч}$ + 250 (Н). Студенты всех бригад сводят результаты исследования в одну таблицу.

1. Измерить толщину и наружный диаметр исходных заготовок.

2. Проверить необходимость применения прижима по выше приведенным зависимостям (20.15).

3. Рассчитать усилие прижима Q по формуле (20.11) для заготовки из стали, латуни и алюминиевого сплава.

4. Уложить в штамп сменную матрицу с максимальным радиусом округления кромки (10 мм).

5. Уложить одну из заготовок в штамп, собрать штамп с прижимом и пуансоном, выставить за счет поджатия пружинного прижима по тарировочному графику требуемое усилие прижима.

6. Установить штамп в сборе на стол пресса (испытательной машины) и произвести вытяжку с фиксацией максимальных усилий. Аналогично провести вытяжку остальных заготовок (табл. 20.1)

Таблица 20.1

№	Материал заготовки	Толщина заготовки, S_0	Диаметр заготовки,	Матрица		Пуансон		Усилие прижима Q, Н
				d_m мм	r_m мм	d_n мм	r_n мм	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Сталь 08кп	9,0	50	25	5	19,5	5	$Q_{расч}$
2	«	«	«	«	«	«	«	$Q_{расч}$-250
3	«	«	«	«	«	«	«	$Q_{расч}$+250
4	Сталь 08кп	2,0	50	25	7,5	19,3	7,5	$Q_{расч}$
5	«	«	«	«	«	«	«	$Q_{расч}$-250
6	«	«	«	«	«	«	«	$Q_{расч}$+250
7	Сталь 08кп	2,0	50	25	10,0	19,3	10,0	$Q_{расч}$
8	«	«	«	«	«	«	«	$Q_{расч}$-250
9	«	«	«	«	«	«	«	$Q_{расч}$+250
10÷18	Латунь	2,0	50	25	5-10	19,3	5-10	$Q_{расч}$±250
19÷27	Алюмин. сплав	2,0	50	25	5-10	19,3	5-10	$Q_{расч}$±250

20.5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Рассчитать $\sigma_{\rho max}$ по формуле (20.11) для всех проведенных экспериментов. Расчет произвести с помощью ЭВМ.

2. Рассчитать величину максимальных растягивающих напряжений, действующих в опасном сечении (по результат эксперимента)

$$\sigma_{\rho max(эксп)}=P_{max(эксп)}/\pi dS.$$

3. Построить графики $\sigma_{\rho max} = \sigma_{\rho max\ (эксп)}$ в зависимости от материала (М), радиуса округления кромки матрицы (r_m) и усилия прижима (Q)

20.6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы, конспект теоретической части.
2. Эскиз штампа.
3. Таблицы с результатами эксперимента и вычислений.
4. Графики зависимостей для различных материалов. Результаты расчета.

20.7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Факторы, оказывающие влияние на величину коэффициента вытяжки.
2. Чем объясняется утолщение краевой части вытянутого стакана?
3. Как определить величину тангенциального напряжения во фланце?
4. Чему равны радиальные напряжения в периферии фланца?
5. Где во фланце тангенциальные напряжения достигают максимума?
6. Почему отрыв дна вытягиваемого стакана происходит в начальный момент вытяжки, а не в конце или середине процесса деформирования?

20.8. ЛИТЕРАТУРА

Попов Е. П. Теория листовой штамповки. – М. : Машиностроение, 1980. – С. 137-142.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 21

СОПОСТАВЛЕНИЕ УСИЛИЙ ПРИ ОТКРЫТОЙ И ЗАКРЫТОЙ ШТАМПОВКЕ

(2 часа)

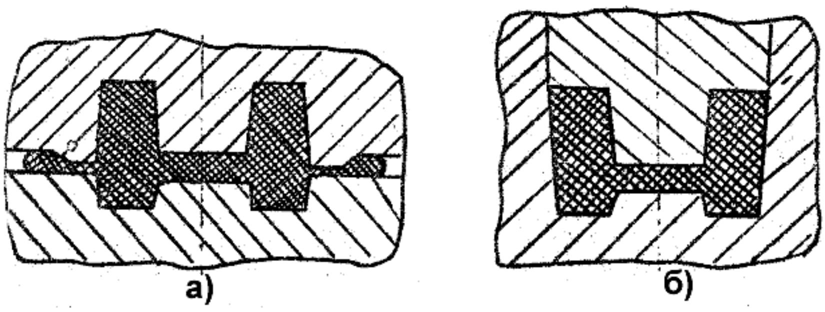
21.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Изучение закономерностей и особенностей штамповки поковок в открытом и закрытом штампах;

- Приобретение практического навыка по применению математического планирования эксперимента при оптимизации процессов горячей штамповки; по сборке и разборке штампов для открытой и закрытой штамповки.

21.2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Различают две разновидности объемной штамповки (рис. 21.1): штамповку в открытых штампах, когда полость ручья не замкнута и деформируемый металл имеет выход в специально предусмотренную заусенечную канавку, расположенную по периметру полости в плоскости разъема штампов, и штамповку в закрытых штампах, когда металл деформируется в замкнутой полости штампа и заусенец не



предусматривается.

Рис. 21.1. Разновидности объемной штамповки: а) открытая штамповка;

б) закрытая штамповка.

При открытой штамповке исходная заготовка должна быть больше поковки на величину объема заусенца, который складывается из минимально необходимого объема для обеспечения торможения металла, вытесняемого в заусенечную канавку, и некоторого переменного количества металла за счет трудноустранимых колебаний размеров заготовки при прокатке и разделке заготовок.

При закрытой штамповке объем заготовки должен быть равен объему полости ручья, поэтому допуски на прокатку и разделку заготовок должны быть незначительными. Получать абсолютно точные по объему заготовки для закрытой штамповки практически невозможно и не имеет смысла, так как по мере износа ручья штампа объем его полости несколько увеличивается. Излишки металла в случае большего объема заготовки вытесняются в зазоры по месту сопряжения частей штампов.

В связи с тем, что при открытой штамповке деформация металла сопровождается менее жесткой схемой трехосного сжатия, чем при штамповке в закрытом штампе, когда возможность для вытеснения металла за пределы полости весьма ограничена, величина удельного усилия при штамповке в открытом штампе может быть несколько меньше, чем при закрытой штамповке. Общее усилие штамповки складывается из усилия деформации металла в полости разъема штампов. Заусенец открытого штампа значителен по величине и приводит к увеличению фактической площади сжатия, особенно у небольших поковок, тогда как заусенец поковок из закрытого штампа невелик и не приводит к увеличению площади обжатия, поскольку располагается в направлении действующей силы. В результате сопоставление общих усилий при открытой и закрытой штамповке одинаковых поковок показывает разные результаты в зависимости от того, какова величина добавочного усилия для обжатия заусенца в открытом штампе.

Чем больше относительная доля площади заусенца в общей площади поковки, тем больше общее усилие, необходимое для штамповки в открытом штампе. Для уменьшения нормального напряжения на заусенце можно устанавливать его более толстым, что благоприятно скажется и на стойкости штампов, однако в этом случае возрастают отходы металла, т.к. при увеличении толщины заусенца ширина его также должна быть увеличена для обеспечения торможения при вытеснении избыточного металла в заусенечную канавку. Учитывая, что на долю металла в себестоимости поковок приходится 60-80%, объем заусенцев устанавливают по возможности минимальным (10-15% от веса поковок).

Закрытая штамповка позволяет экономить этот металл. Кроме того, при закрытой штамповке отпадает необходимость проводить обрезку облоя.

21.3. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ, ПРИБОРОВ, ИНСТРУМЕНТА И МАТЕРИАЛОВ

Работа выполняется на гидравлическом прессе с осциллографической записью усилия по ходу перемещения траверсы пресса в процессе деформации.

В качестве инструмента используется разборный штамп, позволяющий осуществить штамповку поковок с заусенцем и без него (рис. 21.2).

В качестве деформируемого материала выбран свинец, температура рекристаллизации которого совпадает с комнатной, вследствие чего наклеп при небольших скоростях деформации можно не учитывать. Для испытаний используют цилиндрические образцы, которые нарезают из прутка ∅ 30 мм.

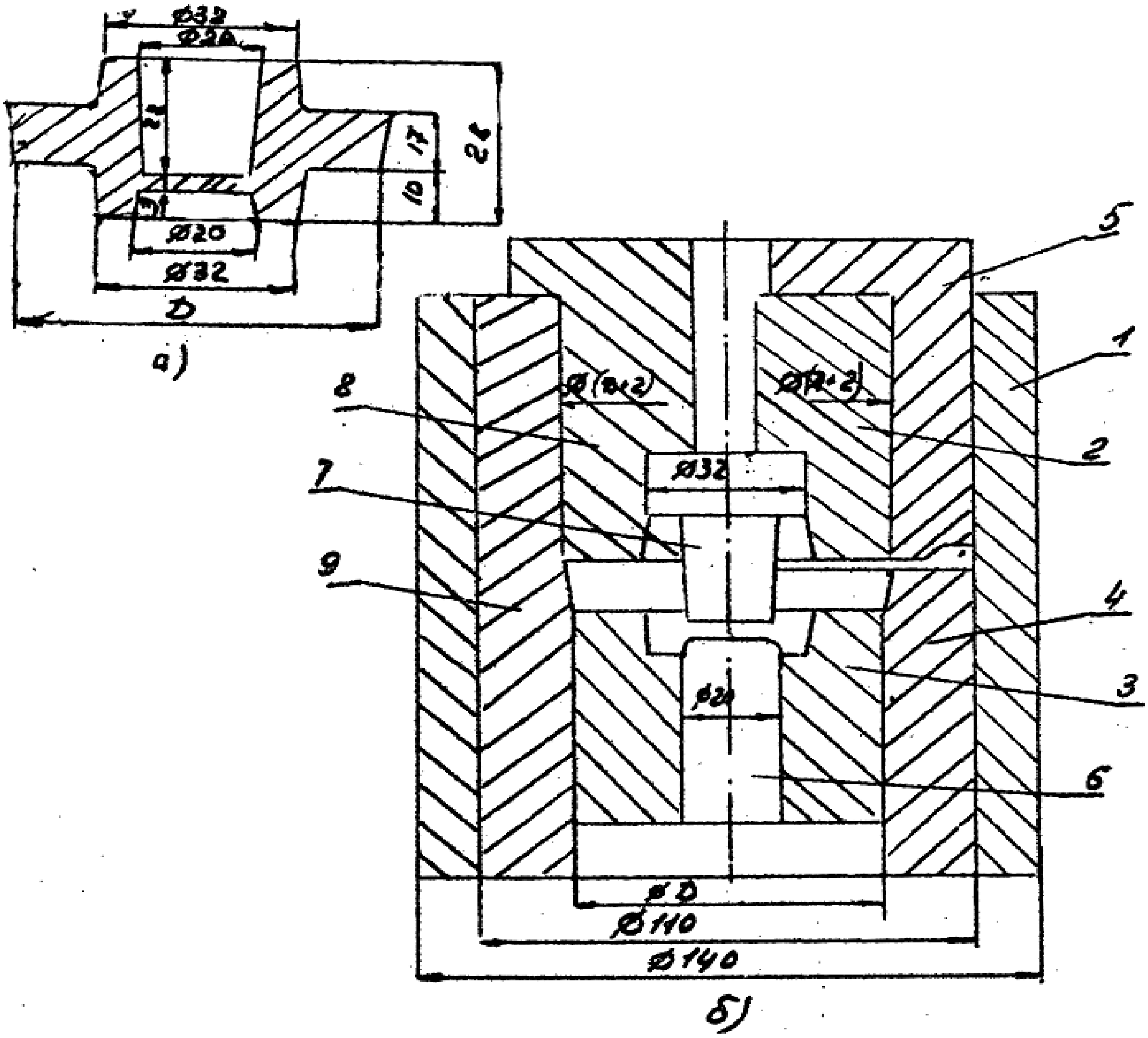


Рис. 21.2. Поковка шестерни (а) и штамп для штамповки поковки диаметром 60 мм без заусенца (левая часть) и с заусенцем (правая часть): 1 – стакан направляющий; 2 – вставка верхняя; 3 – вставка нижняя; 4 – обойма нижняя; 5 – обойма верхняя; 6, 7 – вкладыши; 8 – вставка верхняя закрытого штампа; 9 – втулка промежуточная.

21.4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

1. По чертежу поковок (рис. 21.2) определяют их объем. Объем заготовок для открытой штамповки рассчитывают по формуле

Vзаг = 1,15 Vпок.

Результаты заносят в табл. 21.1.

2. Проводят планирование эксперимента по открытой штамповке. Зависимой переменной является величина усилия штамповки P, независимыми факторами выбираем величину $F_{пок}$ (X_1) и толщину заусенца $h_з$ (X_2), полагая в первом приближении, что усилие зависит в основном только от этих факторов. В табл. 21.2 приводят значения независимых факторов, которые варьируются на двух уровнях.

Таблица 21.1

Расчет заготовок под штамповку

Диаметр поковки, D, мм	Площадь поковки, $F_{пок}$, мм^2	Объем поковки, $V_{пок}$, мм^3	Объем заготовки, $V_{заг}$	
			открытая штамповка	закрытая штамповка
40				
60				

Таблица 21.2

Уровни факторов

Факторы	Поковка		Заусенец	
	D, мм	$X_1 = F_{пок}$, мм	$X_2 = h_з$, мм	Ширина мостика, $b_з$, мм
Верхний уровень (X_i = +1)	60		2	10
Нижний уровень (X_i = -1)	40		1	7

Для получения более полной информации используют факторный план 2^2. Верхний уровень факторов имеет кодированное значение X_i = +1, нижний уровень –

X_i = -1. План эксперимента в кодовом масштабе приведен в табл. 21.3, куда заносят также значения факторов в натуральном масштабе. Перед испытаниями проводят рандомизацию опытов, порядок реализации опытов записывают в табл. 21.3.

Таблица 21.3

План эксперимента

Номер опыта	Порядок реализации	Кодовый масштаб		Натуральный масштаб	
		X_1	X_2	X_1, мм^2	X_2, мм
1		+	+		
2		-	+		
3		+	-		
		-	-		

3. Проводят штамповку в открытом штампе в соответствии с планом эксперимента. В процессе штамповки на осциллографе записывают кривую зависимости усилия штамповки от величины хода пресса.

Каждый опыт повторяют 3 раза. Результаты эксперимента (значения усилия в конце штамповки) записывают в табл. 21.4.

4. Проводят закрытую штамповку поковок диаметрами 40 и 60 мм. Для каждого размера поковок проводят по 3 опыта. Результаты после обработки осциллограмм заносят в табл. 21.5.

Таблица 21.4

Результаты опытов и расчет дисперсии при открытой штамповке

Номер опыта U	Номер дубля, g	Усилие штам-повки, $P_{g,\ кг}$	P_u	S^2_{pu}	$P_{расч}$	$\lvert \Delta P \rvert$	ΔP^2
1	1						
	2						
	3						
2	1						
	2						
	3						
3	1						
	2						
	3						
4	1						
	2						
	3						

Таблица 21.5

Результаты опытов по закрытой штамповке

Номер опыта	Номер дубля	Площадь поковки F	Усилие P	$r_{p, F}$	$P_{расч}$
1	1				
	2				
	3				
2	1				
	2				
	3				

21.5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Открытая штамповка

1. Для расчета дисперсии опыта вычисляют для каждого опыта среднее значение

усилия $\bar{P}_u = \sum_{g=1}^{n_u} P_{(g)} / n_u$,

где n_u – число наблюдений, в данном случае $n_u = 3$.

Построчную дисперсию определяют по формуле

$$S_{pu}^2 = \sum_{g=1}^{n_u} \left(P_g - \bar{P}_u\right)^2 / f_u .$$

где f_u – число степеней свободы, $f_u = n_u – 1$. Результаты заносятся в табл. 21.4.

Проверяют однородность ряда построчных дисперсий по критерию Кохрена

$$G^{pe} = \frac{S_{pu,\max}^2}{\sum_{u=1}^{N} S_u^2} ,$$

где $S_{pu,\max}^2$ – наибольшая в ряду дисперсия,

N – число опытов.

Ряд дисперсий считают однородным, если $G^{расч} < G^{табл}$.

Для числа опытов N = 4, числа степеней свободы $f_u = 2$ и уровня значимости

$\alpha = 0,05$; $G^{табл} = 0,768$.

Если ряд дисперсий однородный, то дисперсию опыта определяют по формуле

$$S_p^2 = \sum_{u=1}^{N} S_{Pb}^2 / N,$$

число степеней свободы f_1 = N (n_u -1) = 8.

2. По результатам опытов можно построить модель

$$P = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2. \tag{21.1}$$

Коэффициенты модели рассчитывают по формулам

$$b_0 = \sum_{u=1}^{N} \frac{P_u}{N};\ \ b_1 = \sum_{u=1}^{N} x_{1u} \frac{P_u}{N};\ b_2 = \sum_{u=1}^{N} x_{2u} \frac{P_u}{N};\ \ b_{12} = \sum_{u=1}^{N} x_{1u} x_{2u} \frac{P_u}{N}.$$

где x_{1u}, x_{2u} – значения факторов в кодированном масштабе для u-го опыта (см. табл. 21.3).

3. Для проверки статистической значимости коэффициентов определяют дисперсию оценок коэффициентов $S_{bi}^2 = \dfrac{S_p^2}{n_u \cdot N}$.

Среднеквадратическая ошибка $S_{bi} = \sqrt{S_{bi}^2}$.

Доверительный интервал коэффициентов рассчитывают по формуле $\Delta b_i = S_{bi} \cdot t_{\alpha, f}$,

где $t_{\alpha, f}$ – критерий Стьюдента.

Для уровня значимости 0,05 и числа степеней свободы f_1 = 8, $t_{\alpha, f}$ =2,31.

Коэффициенты, абсолютная величина которых меньше доверительного интервала, не являются статистически значимыми и их можно исключить из модели (рис. 21.1) (кроме b_0).

4. Проверяют адекватность модели (21.1) по критерию Фишера. Для этого по полученному уравнению, в которое входят только значимые коэффициенты, рассчитывают значения усилия $P_u^{расч}$, результаты заносят в табл. 21.4.

Рассчитывают значения $\Delta \text{P} = \left| \text{P}_u - \text{P}_u^{рас} \right|_u$, ΔP^2. Дисперсию неадекватности определяют по формуле

$$S_u^2 = n_u \sum \frac{\Delta \text{P}^2}{f_2},$$

где f_2 – число степеней свободы модели, f_2 = N – K$^/$,

где K$^/$ – число оставленных коэффициентов уравнения (21.1).

Расчетное значение критерия Фишера $F_{f_2 f_1}^{рас} = \frac{S_u^2}{S_p^2}$.

Табличные значения критерия Фишера

$F_{1.8}$ = 5,32; $F_{2,8}$ = 4,46; $F_{3,8}$ = 4,07 для уровня значимости α = 0,05.

Гипотеза об адекватности модели не отвергается, если $F^{расч} < F^{табл}$.

Закрытая штамповка

Для установления связи между усилием штамповки и площадью поковки проводят корреляционный анализ. Коэффициент корреляции рассчитывают по формуле

$$\nu_{p,F} = \frac{R_4^{\ 2} - R_3^2}{2R_1R_2},$$

где

$$R_1 = P_{\max} - P_{\min},\ R_2 = F_{\max} - F_{\min},\ R_3 = (P-F)_{\max} - (P-F)_{\min},\ R_4 = (P+F)_{\max} - (P+F)_{\min}.$$

Проверяют статистическую значимость коэффициента корреляции по условию

$\nu_{расч} > \nu_{кр}$, где $\nu_{кр}$ – критическое значение корреляции; для числа степеней свободы f_2 = N – 2 = 4 $\nu_{кр}$ составляет(табл. 21.6):

Таблица 21.6

Уровень значимости	0,1	0,05	0,01	0,001
Критический коэффициент корреляции	0,729	0,811	0,917	0,974

Если коэффициент корреляции значим, можно построить уравнение регрессии $\text{P} = b_0 + b_1 F$,

где $b_0 = \sum_{u=1}^{N} \frac{\text{P}_u}{N} - b_1 \sum_{u=1}^{N} \frac{F_u}{N}, \quad b_1 = \frac{R_1^2 + R_2^2 - R_3^2}{2R_2^2}$,

в противном случае зависимость усилия от площади поковки не является линейной.

21.6. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ ПО РАБОТЕ

Отчет должен содержать:

1) цель работы;

2) теоретическое введение;

3) методику и порядок выполнения работы;

4) чертежи поковок и штампов;

5) таблицы с результатами испытаний и расчетными значениями (табл. 21.1-21.5), расчеты по определению коэффициентов и статистическому анализу, результаты корреляционного анализа модели;

6) графики зависимости усилия штамповки от площади поковки;

7) выводы по работе.

Отчет должен быть оформлен аккуратно, без сокращения слов, на одной стороне листа.

21.7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Разновидности объемной штамповки.
2. Как влияет величина заусенца на усилие при открытой штамповке?
3. каковы преимущества и недостатки закрытой штамповки?
4. Как рассчитывать объемы заготовок для открытой и закрытой штамповок?
5. Что такое коэффициент корреляции?

21.8. ЛИТЕРАТУРА

1. Охрименко Я. М. Технология кузнечно-штамповочного производства. – М. : Машиностроение, 1976. – С. 263-267, 279-281.
2. Сторожев М. В., Попов Е. А. Теория обработки металлов давлением. – М. : Машиностроение, 1971. – С.319-333.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 22

ИЗУЧЕНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ПО СТАДИЯМ В ПРОЦЕССЕ ОТКРЫТОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ

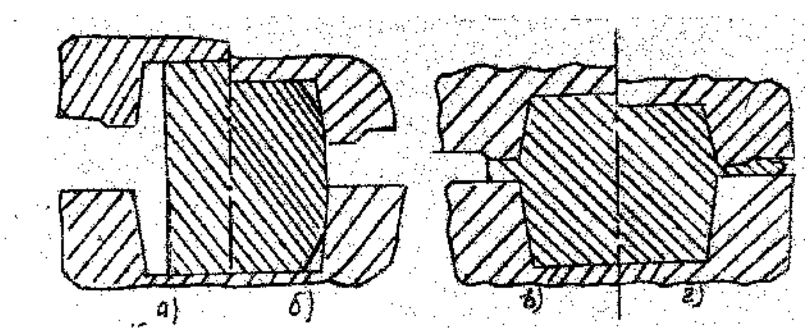
(2 часа)

22.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- Закрепление знаний по теории процесса открытой объемной штамповки, расчету оптимальных размеров заготовки и выбору оборудования;
- Приобретение навыков работы с тензоаппаратурой.

22.2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Под открытой объемной штамповкой понимается такая технологическая операция, где формообразование металла происходит между подвижной и неподвижной частями штампа с уменьшающимся в процессе деформации зазором. При этом деформируемый металл течет не только в углубления штампа, но и в зазор между частями штампа (в направлении, перпендикулярном движению пуансона), образуя заусенец.



В процессе штамповки различают три стадии (рис. 22.1).

Рис. 22.1. Стадии течения металла при заполнении ручья открытого штампа:

а) исходная заготовка; б) 1-й период штамповки; в) 2-й период штамповки; г) 3-й период штамповки.

В первом периоде заготовка деформируется свободно до соприкосновения с боковыми стенками полости штампа. Во втором периоде происходит дальнейшее заполнение полости штампа с одновременным истечением металла в заусенец. По мере опускания верхней части штампа толщина заусенца уменьшается; он охлаждается от соприкосновения со штампом; сопротивление истечению металла в заусенец из полости штампа повышается и становится больше сопротивления затеканию металла в углубления штампа. Это приводит к заполнению гравюры штампа к концу второго периода. В третьем периоде происходит доштамповка – вытеснение излишков металла в заусенец с доведением высоты поковки до заданных размеров.

Теоретически момент окончания заполнения гравюры штампа должен совпадать с концом всего процесса штамповки, так как в процессе доштамповки облой начинает играть отрицательную роль; он тормозит вытеснение излишков металла из полости, что приводит к значительному повышению усилия в последней стадии. Поэтому важной задачей при проектировании технологического процесса открытой объемной штамповки является правильное определение минимального объема облоя с целью экономии металла и уменьшения усилия на конечной стадии процесса, гарантирующего заполнение полости штампа (в пределах допустимой степени его износа) и тем самым исключающего вероятность недоштамповки.

22.3. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ, ПРИБОРОВ, ИНСТРУМЕНТА И МАТЕРИАЛОВ

Работа выполняется на универсальной испытательной машине с диаграммной записью усилия или гидравлическом прессе с осциллографической записью усилия по ходу перемещения подвижных частей в процессе деформации.

В качестве инструмента используется разборный штамп (рис. 22.2). В верхней части штампа встроена месдоза с наклеенными на нее тензодатчиками. Тензодатчики соединены с усилителем «Топаз-3», откуда сигнал подается на осциллограф НО-43.1. В процессе деформации на осциллографе записывается график «усилие штамповки Р – ход пресса Н». Типовой график зависимости Р = *f* (Н) представлен на рис. 22.3.

Для исследований в работе используются цилиндрические образцы из технически чистого свинца ($\sigma_т$ = 16-20 МПа), нарезанные из прутка диаметром 30 мм.

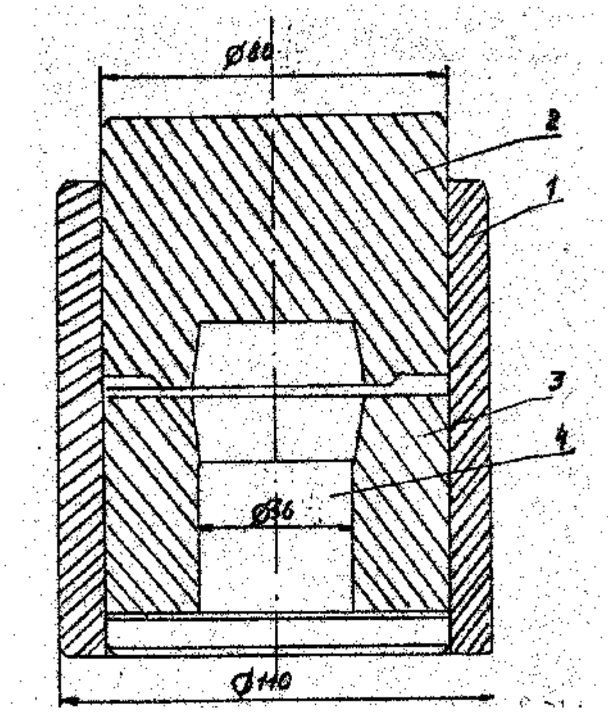


Рис. 22.2. Штамп для открытой штамповки: 1 – направляющий стакан;

2 – верхняя вставка; 3 – обойма; 4 – нижняя вставка.

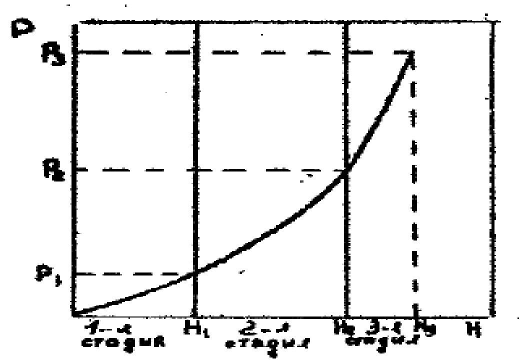


Рис. 22.3. Зависимость усилия штамповки от хода пресса.

22.4. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. По чертежу поковки (рис. 22.4) вычисляют ее объем $V_{пок}$.

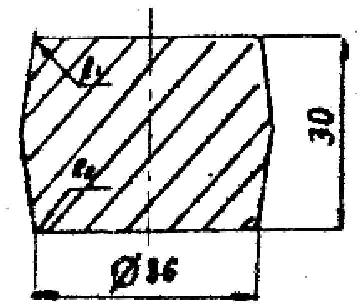


Рис. 22.4. Чертеж поковки

2. Для изучения характера заполнения штампа в процессе штамповки выбирают цилиндрический образец объемом $V_{заг}$ = 1,15 $V_{пок}$. Проводится штамповка образца и строится зависимость усилия штамповки от хода пресса по результатам обработки осциллограмм. По полученной зависимости определяют стадии процесса штамповки (см. рис. 22.3) и величины хода пресса по стадиям штамповки H_1, H_2, H_3.

3. Проводят штамповку образцов $V_{заг}$ = 1,15 $V_{пок}$ по стадиям и замеряют размеры полуфабрикатов после каждой стадии штамповки.

4. Для определения оптимального размера заготовки проводят штамповку образцов, объем которых указан в графе 2 табл. 22.1.

5. После определения оптимального объема заготовки $V_{опт}$ проводят штамповку образца $V_{опт}$ и строят зависимость P = *f* (H).

Таблица 22.1

Объем поковки, $V_{пок}$	Объем заготовки, $V_{заг}$	Объем заусенца, $V_з$	Объем металла, заполнившего ручей, $V_{з.р}$

1	2	3	4
	1. $V_{заг} = 1{,}2\ V_{пок}$		
	2. $V_{заг} = 1{,}15\ V_{пок}$		
1	2	3	4
	3. $V_{заг} = 1{,}1\ V_{пок}$		
	4. $V_{заг} = 1{,}05\ V_{пок}$		
	5. $V_{заг} = V_{пок}$		
	6. $V_{заг} = V_{опт}$		

22.5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. По известной методике обрабатывают кривые осциллограмм и строят для первого образца зависимость P = *f* (H). В табл. 22.2 заносят полученные значения H_1, H_2, H_3 и величины максимальных усилий на каждой стадии штамповки.

Таблица 22.2

Усилие штамповки на различных стадиях

Объем заготовки	Максимальные усилия на стадиях штамповки, кг	Ход пресса по стадиям штамповки, мм
$V_{заг} = 1{,}15\ V_{пок}$	1.	
	2.	
	3.	
$V_{заг} = V_{опт}$	1.	

	2.	
	3.	

2. По результатам эксперимента с заготовками различных объемов определяют значения объема заполнения ручья штампа $V_{з.р.}$ и объем заусенца $V_з$, полученные результаты заносят в табл.22.1.

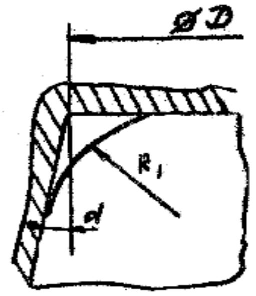


Рис. 22.5. Схема измерения объема металла, заполнившего ручей штампа.

Объем заполнения штампа $V_{з.р}$ определяют следующим образом. Измеряют радиусы полученной поковки R_1 и R_2 (рис. 22.5).

Если R_1 и R_2 совпадают с радиусом, указанным на чертеже поковки, то принимают $V_{заг} = V_{пок}$. Если R_1 и R_2 больше указанного на чертеже, то $V_{з.р.}$ приближенно определяют по формуле

$$V_{з.р} = V_{пок} - \pi D\left\{R_1^2\left[tg\left(\frac{90-\alpha_1}{2}\right)-\frac{\pi d_1}{360}\right]+R_2^2\left[tg\left(\frac{90-\alpha_2}{2}\right)-\frac{\pi d_2}{360}\right]\right\},$$

где α_1, α_2 – соответствующие углы уклона штампа, град.

Объем заусенца определяют по формуле $V_з = V_{заг} - V_{з.р}$

3. По данным табл. 22.1 строят зависимости $V_{з.р.} = f(V_{заг})$ и $V_{з.} = f(V_{заг})$. Качественный характер зависимости $V_{з.р.}$ и $V_з$ от объема заготовки представлен на рис. 22.6. Из графика $V_{з.р.} = f(V_{заг})$ определяют оптимальный объем заготовки $V_{опт}$.

4. По результатам эксперимента с заготовкой $V_{опт}$ строят зависимость P = *f* (H), полученные данные заносят в табл. 22.2.

22.6. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ ПО РАБОТЕ

Отчет должен содержать:

- цель работы;
- теоретические основы изучаемого вопроса;
- методику и порядок выполнения работы;
- чертежи поковки, полуфабрикатов, полученных на 1-й и 2-й стадиях штамповки и чертеж заготовки;
- таблицу с результатами испытаний образцов (табл. 22.1 и 22.2);
- графики P = *f* (H);
- выводы по работе.

Записи должны вестись аккуратно, без сокращений слов, ясно, полно и четко, на одной стороне листа.

22.7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Понятие открытой объемной штамповки как технологической операции.
2. Преимущества и недостатки открытой объемной штамповки.
3. Какова роль заусенца при штамповке?
4. Сколько стадий течения металла при открытой штамповке?
5. Каковы силовые параметры и характер нагружения при открытой штамповке?

22.8. ЛИТЕРАТУРА

1. Охрименко Я. М. Технология кузнечно-штамповочного производства. – М. : Машиностроение, 1976. – С. 263-268.

2. Сторожев М. В., Попов Е. А. Теория обработки металлов давлением. – М. : Машиностроение, 1971. – С. 317-319.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 23

ИЗУЧЕНИЕ ТЕХПРОЦЕССА ВЫСАДКИ

(2 часа)

23.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение операций и методики расчета переходов высадки, факторов и последствий нарушения технологии при высадке, изучение модельной оснастки; получение практических навыков расчета техпроцесса высадки, контроля точности геометрических размеров изделия.

23.2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Высадкой называется операция, посредством которой увеличивается поперечное сечение удлиненной заготовки за счет уменьшения длины концевой или средней ее части. Высадка производится обычно на ГКМ, холодновысадочных автоматах. Высадка может производиться за один или несколько переходов.

Расчет техпроцесса высадки начинают с определения объема высаживаемой части прутка V, который равен объему формовочного (заключительного) перехода плюс объем отходов на заусенец и угар. Из условия равенства объемов до и после деформации находят исходную длину высаживаемой части прутка $l_{\text{В}} = \frac{4V}{\pi d^2}$ (рис. 23.1).

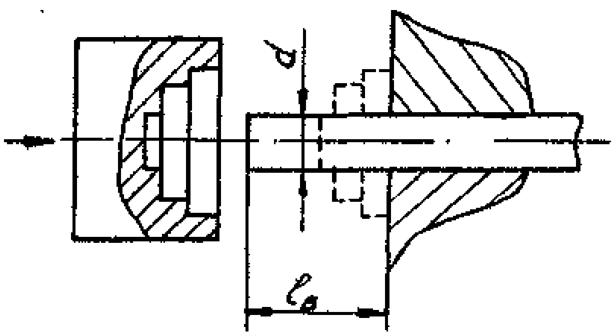


Рис. 23.1. Схема однопереходной высадки.

Диаметр прутка *d* берут обычно равным диаметру части поковки, которая не деформируется при обработке.

Расчет техпроцесса ведут в относительных величинах (относительно диаметра высаживаемой части прутка). Обозначим: ψ – относительная длина высаживаемой части перед первой высадкой.

Технологический процесс высадки протекает нормально (т.е. без изгиба и перекоса заготовки) лишь в том случае, если величина ψ не превышает некоторого критического значения, которое зависит от ряда факторов. К числу таких факторов относят, прежде всего [1, с. 412-413]:

- угол скоса на торце прутка, зависящий от способа резки;

- неперпендикулярность плоскости пуансона оси зажатого прутка;

- форма рабочей поверхности пуансона.

В общем, величина допустимых значений ψ лежит в интервале $1 \prec \psi \leq 3$.

При высадке плоским пуансоном рекомендуется $\psi_{max} = 2 - 2{,}5$, если пруток имеет угол скоса до 6°. При высадке пуансоном с наметкой под прошивку $\psi_{max} = 1{,}5$.

При несоблюдении этих требований в условиях однопереходной высадки получается резко эксцентричная поковка с зажимом в результате изгиба и отклонения прутка от оси симметрии.

Если вычисленная длина высаживаемой части прутка превышает ψ_{max}, то применяют многопереходную высадку, при которой на первых нескольких переходах производят набор металла, а на последнем – формовку.

Интенсивный набор металла обеспечивается высадкой в конических пуансонах (рис. 23.2).

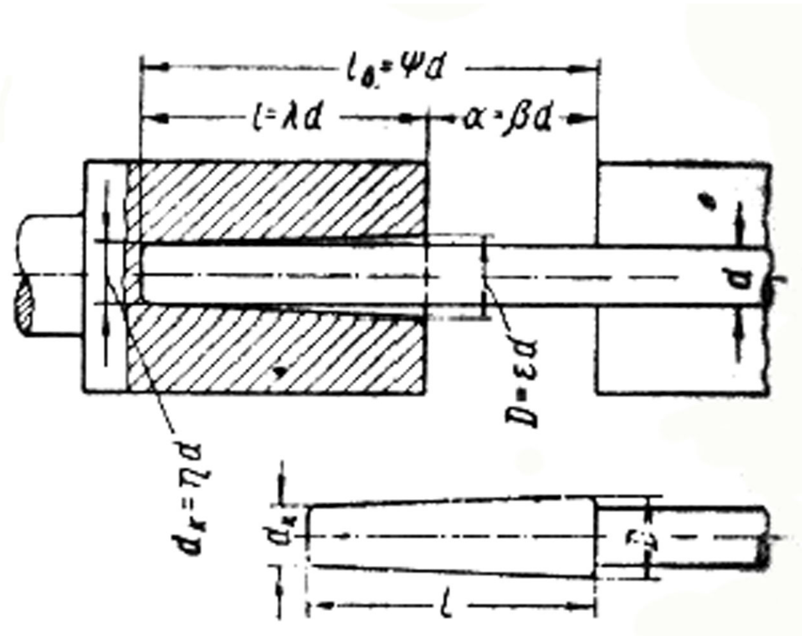


Рис. 23.2. Схема конической высадки.

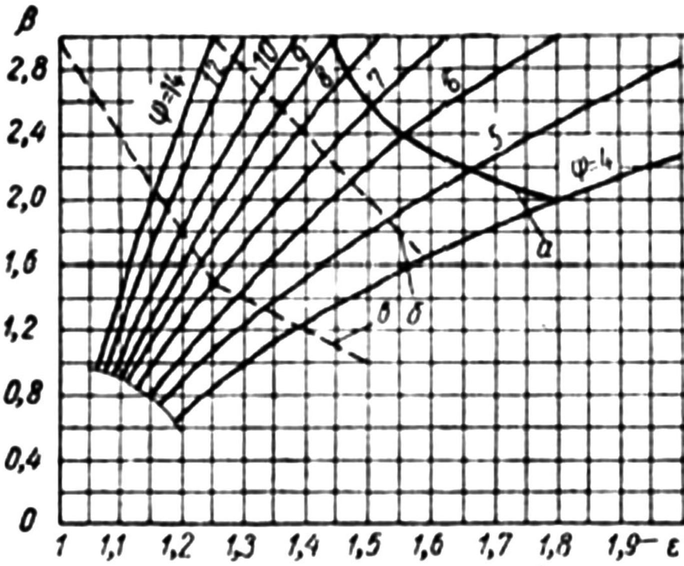
Расчет конических ручьев производят по номограмме ограничения конической высадки (рис. 23.3).

По известной величине $\psi = \frac{l_В}{d}$ находят соответствующую линию на номограмме (см. рис. 23.3). Определив точку пересечения этой линии с одной из ограничивающих кривых (см. линии а, б, в) и опуская перпендикуляры из этой точки на оси координат, находят критические значения безразмерных параметров ε и β.

По величине ε определяют максимально допустимый больший диаметр усеченного конуса: D = εd.

Длина конуса: $l = l_B - a = l_B - \beta d$.

Диаметр меньшего основания конуса берут равным: $d_K = 1{,}05\ d$, численные значения D , l и d_K являются искомыми размерами конуса.



Максимальная высадка

φ	λ	β	ε
4	2,0	2,0	1,8
4,5	2,4	2,1	1,75
5,0	2,8	2,2	1,66
5,5	3,2	2,3	1,61
6,0	3,6	2,4	1,56
6,5	4,0	2,5	1,53
7,0	4,4	2,6	1,50
7,5	4,8	2,7	1,48
8,0	5,2	2,8	1,46
8,5	5,6	2,9	1,42
9,0	6,0	3,0	1,38
10	7	3,0	1,34
12	9	3,0	1,30
14	11	3,0	1,26

Рис. 23.3. Ограничения конической высадки: *а* – по Томленову А.Д.; б – по Диуэллу; в – по Фросту.

Второй метод расчета размеров конического ручья заключается в следующем.

I. По экспериментальной зависимости определяется относительная высадка:

$$\left.\begin{aligned} &\beta \le 1{,}2 + 0{,}2, \text{ если } \psi \le 9 \\ &\beta \le 3, \text{ если } \psi \succ 9 \end{aligned}\right\}$$

2. Длина конуса $l = \lambda d = (\psi - d)d$.

3. Меньший диаметр конуса $d_{\text{К}} = \eta d = [1{,}0 \div 1{,}2]d$.

4. Больший диаметр конуса

$$D = \varepsilon_{\text{К}d} = 1{,}73\sqrt{\frac{\psi}{\lambda} - \left[\frac{\eta}{2}\right]^2} - \frac{\eta}{2}.$$

23.3. ОБОРУДОВАНИЕ, ИНСТРУМЕНТ, МАТЕРИАЛЫ

1. Гидропресс ДБ2420А.
2. Оснастка и свинцовые образцы диаметром 15 мм разной длины для высадки.
3. Штангенциркуль ШЦ 0-250.
4. Тиски и пила по металлу.

23.4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ И УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Перед началом работы ознакомиться с техникой безопасности при работе на прессе ДЕ8426А.

Работа состоит из следующих этапов.

Этап I. Изучение процесса открытой высадки. Определение предельных значений $\psi_{\max} = l/d$ для различных условий (рис. 23.4) по вариантам (I-IV*)*, которые назначает бригадам преподаватель.

В процессе работы следует варьировать длину заготовки с целью определения максимально допустимых значений ψ, при которых процесс высадки идет устойчиво. Непрерывно наблюдая за деформацией высаживаемой части образцов, эскизировать их в момент начала потери устойчивости, в промежуточный момент и в завершающий (образцы осаживать до высоты ~ 10 мм) и описывать характер дефекта поковки.

Результаты записывать в виде таблицы (табл. 23.1).

Таблица 23.1

Эскизы высаживаемых образцов

Образец исходный диаметром 15 мм	Стадии высадки			Примечание
	1	2	3	

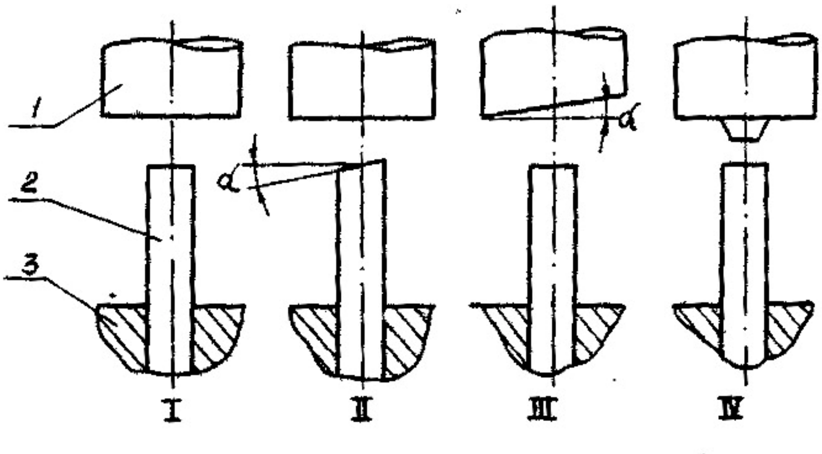


Рис. 23.4. Варианты однопереходной высадки

1 – пуансон; 2 – заготовка; 3 – матрица.

Конфигурацию рабочей поверхности пуансона также эскизировать.

Этап 2. Получив у учебного мастера вариант чертежа поковки, рассчитать переходы высадки вторым методом (см. п. 23.2); в расчетах принять η = 1,0. Величинами объемов заусенца и угара пренебречь. Проверив у преподавателя правильность расчета ручьев, получить необходимый комплект пуансонов и выполнить операции. В расчете воспользоваться формулой объема усеченного конуса:

$$V = \frac{\pi}{12} l\left(D^2 + d^2 + Dd\right).$$

Измерить и заэскизировать полученную поковку.

Этап 3. Экспериментальным путем определить оптимальное значение параметра

$\varepsilon = D/d$ методом варьирования величины D для случая $\psi = 5$; l_B = 5,I5 - 72 мм. При получении варианта задания регистрируется угол скоса на торце образца.

Высадку проводить с промежуточными остановками процесса в средней стадии. Образец эскизировать, продолжать деформировать образец и эскизировать его в конечной стадии, заполняя табл. 23.2 (по форме табл. 23.1).

Таблица 23 2.

Образец исходный диаметром 15 мм	Стадии высадки			Примечание
	1	2	3	

23.5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

<u>Этап I.</u> По выполненным эскизам сделать выводы о допустимых значениях ψ. Вычислить теоретическое значение ψ_{max} (табл. 23.3).

Таблица 23.3

Формулы для расчета ψ_{max}

Вариант (см. рис. 23.4)	Формула для расчета
I	$2{,}0 + 0{,}01;\ \psi \leq 3$
II	$1{,}5 + 0{,}01;\ \psi \leq 2{,}5$
III	$1{,}5 + 0{,}01;\ \psi \leq 2$
IV	$1{,}5 + 0{,}01;\ \psi \leq 2$

Сравнить экспериментальные значения ψ_{max} с теоретическими, сделать качественные выводы.

<u>Этап *2*</u>. Сравнить методы I и 2 для расчета конических ручьев. Сделать вывод о трудоемкости и точности этих методов.

<u>Этап 3</u>. По полученным данным (табл. 23.2) определить, какое значение ε следует взять за допустимое. Найти на номограмме (рис. 23.3) точки, соответствующие опробованным конусам и лежащие на линии ψ = 5.

Сравнить экспериментальное значение ψ_{max} с теоретическими по А.Д. Томленову, Диуаллу и Фросту (рис. 23.3).

23.6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

В отчет должны войти: конспект теоретической части; номер варианта выполнения этапов 1-3; табл. 23.1, 23.2; эскизы инструмента по этапам 1-3; расчет переходов высадки (этап 2); выводы, указанные в п. 23.5 по этапам 1-3.

23.7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое высадка?
2. Как определятся размеры заготовки?
3. Чем ограничена высадка за один переход?
4. Как высаживается заготовка с длиной высаживаемой части, равной *1,5d* , *4d*?
5. Каковы способы расчета конических наборных ручьев?
6. По какому параметру нормируются все размеры конических ручьев?

23.8. ЛИТЕРАТУРА

I. Охрименко Я. М. Технология кузнечно-штамповочного производства. – М. : Машиностроение, 1976. – С. 412-413.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 24

ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛЫХ ИЗДЕЛИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЗАКРЫТОЙ ПРОШИВКИ

(2 часа)

24.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение силовых характеристик процесса закрытой прошивки; типов конструкций технологической оснастки; технологического процесса производства полых изделий в комбинации прошивка-прессование; получение практических навыков оценки качества полых изделий по точности геометрии и деформационным параметрам.

24.2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В номенклатуре изделий, получаемых методами ОМД, значительное место занимают полые изделия типа "стакан" и "труба" (рис. 24.1 а и б)

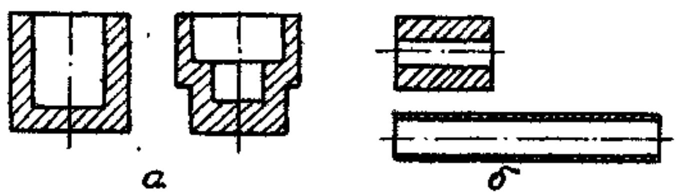


Рис. 24.1. Полые изделия, получаемые методами ОМД: а – типа "стакан"; б – типа "труба".

При закрытой прошивке (рис. 24.2 а, б) заготовка (З) помещается в контейнер (матрицу) и под действием пуансона (П) вблизи его поверхности формируется локальный очаг деформации (ОД), который перемещается в глубь заготовки по мере углубления пуансона (рис. 24.2 а). При этом остальная часть заготовки, включая выдавленную трубчатую часть, находится в упругом состоянии.

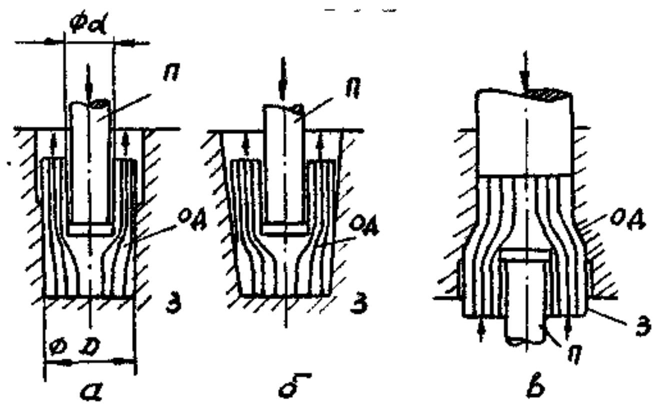


Рис. 24.2. Способы закрытой прошивки, а, б – обратные схемы; в – прямая схема

Степень деформации выдавленного металла оценивают относительным изменением площади поперечного сечения:

$$P = \sigma_S \left[3 + \left(1 + \frac{D^2}{d^2} \right) \ln \frac{D^2}{D^2 - d} \right], \qquad (24.1)$$

(рис. 24.2 а) или логарифмической деформацией:

$$\varepsilon = \ln \frac{F_0}{F} = \ln \frac{D^2}{D^2 - d^2} \qquad (24.2)$$

Особенностью процесса прошивки являются тяжелые условия работы пуансонов. При горячей деформации сталей прошивной инструмент имеет вязкую стойкость, т.к. затруднены условия его смазки и имеет место интенсивное температурное и силовое воздействие заготовки. При холодном деформировании сталей пуансоны подвергаются высоким (до 2000 МПа) сжимающим напряжениям и усталостному износу. Для снижения силовых нагрузок на инструмент применяют матрицы с конической внутренней поверхностью для устранения сил трения между поверхностью выдавленной трубчатой части и стенкой матрицы (рис. 24.2 б), а также матрицы специальной формы, позволяющие существенно снизить уровень сжимающих напряжений при холодном выдавливании (рис. 24.2 в). Наиважнейшую роль здесь играет конфигурация рабочей поверхности прошивного инструмента (рис.24.3). Конический профиль (рис. 24.3) позволяет обеспечить минимальное усилие в начале рабочего хода, однако, смазка, нанесенная на пуансон или заготовку, вся выдавливается в начальный момент из-под него в трубчатую часть и процесс прошивки практически идет без смазки и заканчивается порой при очень большом усилии (см. рис.24.3г, а). Плоский торец (см.рис.24.3б) пуансона не является оптимальным, т.к. затрудняет естественное течение металла при прошивке, что сказывается на повышении усилия прошивки на всех стадиях процесса. Поэтому оптимальный в конкретных условиях профиль торца должен обеспечивать одновременно захват своим "пятачком" смазки в начальный момент и приближаться по конфигурации контура к линиям естественного течения металла при прошивке (рис. 24.3 в, г). Форма пуансона может быть также задана формой дна стакана.

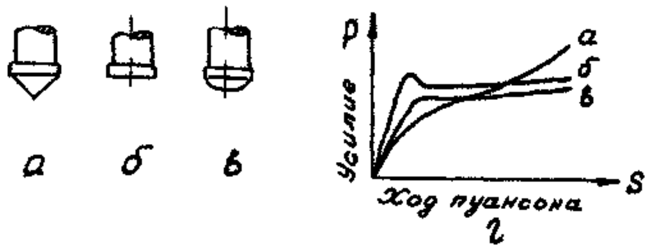


Рис. 24.3. Конфигурация рабочей части пуансонов (а, б, в).

Расчет удельного усилия для пуансонов с плоским рабочим торцом производят по выражению ([1], с. 315):

$$P = \sigma_S \left[3 + \left(1 + \frac{D^2}{d^2} \right) \ln \frac{D^2}{D^2 - d}, \right] \qquad (24.3)$$

или по другим формулам:

$$P = \sigma_S \left[3 + 2 \frac{1 - 0{,}85 D / d}{1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2} \right]. \qquad (24.4)$$

Формула (24.4) получена методом баланса работ внешних и внутренних сил, (24.3) совместным решением уравнений равновесия и пластичности [1].

При производстве высоких стаканов и труб прошитую заготовку затем прессуют на игле - оправке (рис. 24.4). Прессованию труб предшествует отделение донной части (рис. 24.5).

Важным показателем качества прессованных полых изделий является разностенность, связанная с отклонением пуансона от оси прошивки во время рабочего хода. Разностенность определяется разностью максимальной и минимальной толщин стенок в выбранном поперечном сечении трубы (стакана) и выражается в относительных единицах или в процентах от номинальной толщины стенки, причем

$$S_{ном} = (S_{max} + S_{min})/2 .$$

$$\Delta = \frac{S_{max} - S_{min}}{S_{НОМ}} \cdot 100\% \approx \frac{200\left(1 - \frac{S_{min}}{S_{max}}\right)}{1 + \frac{S_{min}}{S_{max}}} \qquad (24.5)$$

Величину разностенности при прошивке уменьшают путем распрессовки заготовки и калибровки ее торца перед прошивкой, повышения жесткости прошивного инструмента и его крепления, равномерности прогрева в поперечном сечении заготовки.

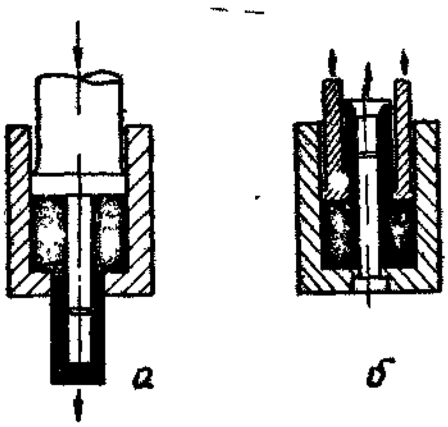


Рис. 24.4. Прессование полых изделий по схемам: прямой (а) и обратной (б).

24.3. ОБОРУДОВАНИЕ, ИНСТРУМЕНТ, ОБРАЗЦЫ

1. Пресс ДБ2426А усилием 400 кН.
2. Испытательная машина МР усилием 60 кН.
3. Микроскоп типа J0M.
4. Штангенциркуль ВД 0-250.
5. Образцы свинцовые 30x40 мм, $б_S$ = 25 МПа.
6. Образец диаметром 50 - 60 мм разъемный с координатной сеткой.
7. Оснастка для изучения индикаторных диаграмм процесса (рис. 24.4 а).

8. Оснастка для изучения деформационных особенностей процессов (рис. 24.4 б).

9. Цифровая ЭВМ.

10. Пила по металлу, нож.

11. Клеймо для нанесения ячеек в виде окружностей.

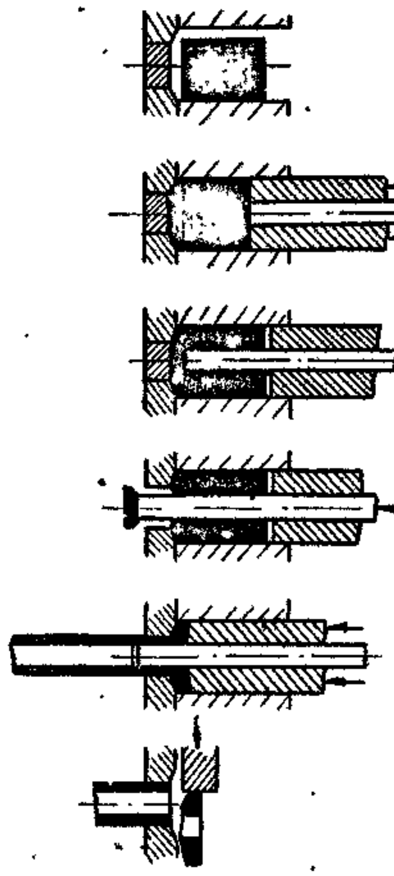


Рис. 24.5. Технологические операции при прессовании труб: 1 – загрузка заготовки в контейнер; 2 – распрессовка заготовки; 3 – прошивка иглой; 4 – удаление донной части; 5 – прямое прессование трубы; 6 – удаление прессостатка

24.4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ И УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Процесс выполнения данной работы состоит из нескольких этапов, которые назначает преподаватель бригадам с учетом специализации группы и количества студентов в бригаде.

1. Исследование зависимости индикаторных диаграмм процесса от степени деформации при прошивке и конфигурации рабочей поверхности пуансона (рис. 24.6, а), заэскизировать образцы и рабочую часть пуансонов, рассчитать степени деформации, соответствующие различным диаметрам пуансонов.

Эксперимент проводить на испытательной машине усилием 60 кН с постоянной для всех образцов скоростью деформирования с фиксацией текущих значений усилий и перемещений.

Для оценки точности измерения прошивку одним из пуансонов провести дважды.

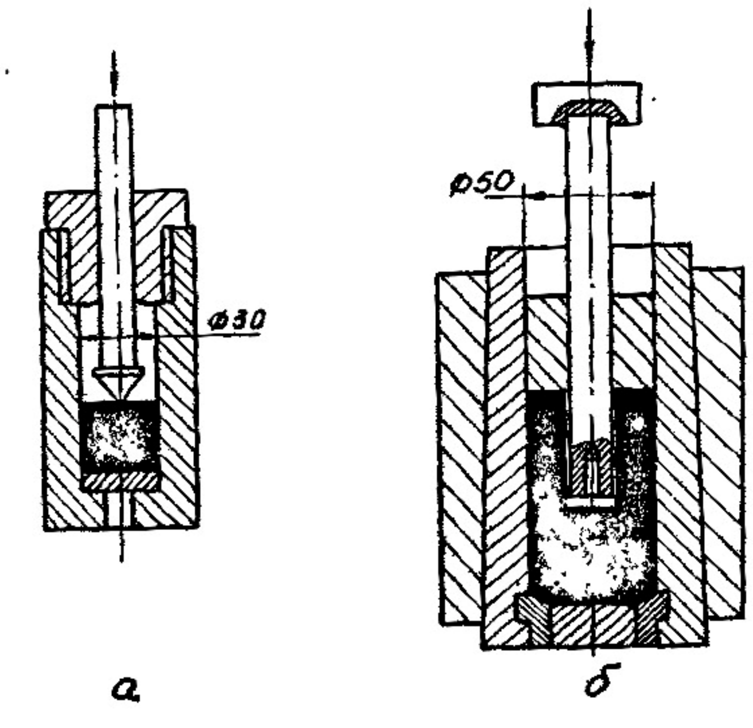


Рис. 24.6. Оснастка для изучения силовых параметров процесса прошивки (а) и для изучения деформационных параметров процессов прошивки и прессования (б).

2. Изучение распределения по длине полых изделий величины разностенности Δ.

Измерение толщины стенки стакана *S* выполняется штангенциркулем. Разностенность определяется в трех поперечных сечениях стаканов (в верхней, средней и донной частях), разрезка проводится с помощью ручной пилы-ножовки, заусенцы срезаются ножом. Данные по величинам S_{max} и S_{min} заносятся в таблицу произвольной формы, предусматривая колонку для вычисления Δ. Анализу подвергаются два стакана, прошитых в различных условиях (выбираются студентами).

3. Определение конечных деформаций в поперечном сечении стенки прошитого стакана.

Этот эксперимент проводится с использованием оснастки, изображенной на рис. 24.6, б, на гидропрессе ДБИ - 426А при этом используется один составной образец диаметром 50х60мм с нанесенной координатной сеткой (рис. 24.7 а), параметр квадратной сетки а = 6 мм.

Работа начинается с изучения деталей оснастки (рис. 24.5). Контейнер выполнен разъемным с наружной конической поверхностью, по которой он сопрягается с бандажом. Продольную и поперечные риски (на разных половинках образца) наносят мелом разного цвета. Образец укладывается в контейнер с небольшим (5°) несовпадением плоскостей разъема.

Для изучения течения металла заготовка прошивается пуансоном с конической головкой на глубину 30 мм. После разгрузки пресса и разборки контейнера координатная сетка копируется (делается фотография).

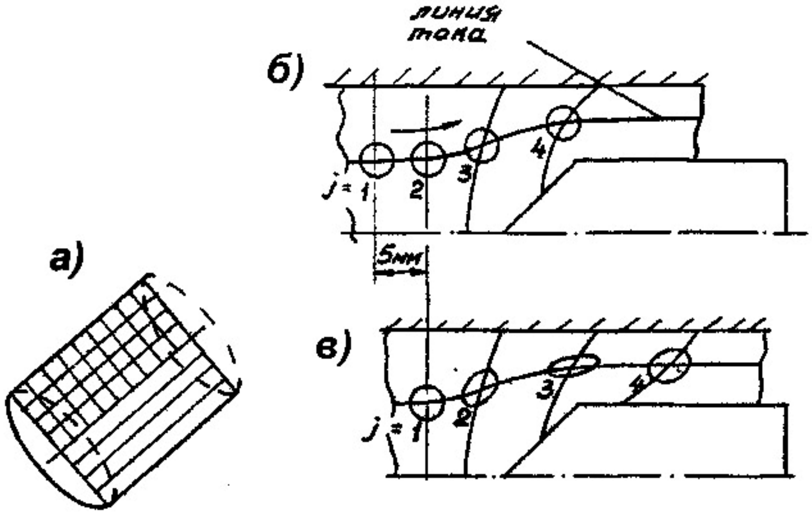


Рис. 24.7. Составной образец: а – до деформации (стадия 0); б – после прошивки на 30 мм (стадия I); в – после прошивки на 35 мм (стадия II).

4. Изучение технологических схем процесса производства трубных изделий.

Этот этап работы выполняют на прессе ДБ2426А на описанной выше оснастке (24.6 б) в соответствии с описанием на рис. 24.5 технологических операций при прессовании трубных изделий.

Для этой работы может использоваться образец, полученный на этапе 3. Прошивку осуществлять пуансоном с плоским торцом до толщины дна, равной 4 - 6 мм.

Во время деформирования проводят запись текущих усилий и перемещений с шагом 5 мм (см. таблицу 24.1).

После удаления дна оснастку разбирают и на второй половине образца наносят поперечные риски с шагом 5 мм. Трубную заготовку прессуют на оправке диаметром 20 мм до прессостатка $H_д$ = 35 мм. Оснастку разбирают и в очаге деформации в узлах сетки наносят окружности путем клеймения (аналогично п.3). Образец прессуют ровно на ход 5 мм, после разборки штампа измеряют величины осей эллипсов *а* и *в* для последующего расчета конечных деформаций в сечении трубы при прямом прессовании.

После измерения осей эллипсов, заполнения таблицы 24.2 и эскизированння образца оснастку собирают, образец допрессовывают до прессостатка, равного 5 мм. Изделие извлекают из контейнера и эскизируют.

По указанию преподавателя окончательное изделие разрезают в трех поперечных сечениях, в которых измеряют величины максимальной и минимальной толщин стенки для определения разностенности (аналогично п. 2).

Точность рассчитанных значений параметров определить по указанию преподавателя путем повторного измерения исходных данных и повторного расчета параметров, с последующим усреднением данных и расчетом среднеквадратичной ошибки (см. приложение практикума по теории процессов ОМД).

24.5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

По результатам, полученным на этапе I, определяют значения удельных усилий для каждой величины усилий Р с учетом фактического диаметра пуансона *d*: $p = \dfrac{P}{\left(\dfrac{\pi d^2}{4}\right)}$. Усилие измеряют по шкале машины в кгс (I кгс=9,8 Н), величину удельного усилия вычислять в мегапаскалях МПа (I Па = I Н/м^2).

По полученным данным построить графики зависимости удельного усилия от хода пресс-штемпеля для различных пуансонов.

Построить графики зависимости удельного усилия от степени деформации по данным прошивки плоскими пуансонами (табл. 24.1) при S = 20 мм и по расчетным соотношениям (24.3) и (24.4) для тех же размеров инструмента. Принять для свинца 6_S = 25 МПа.

Сделать выводы о точности формул (24.3) и (24.4) и о характере указанных графиков. Определить, при какой степени деформации удельное усилие при прошивке свинца минимально.

По результатам этапа 2 просчитать разностенность прошитых стаканов. Графически представить изменения величины разностенности вдоль оси изделий. По полученным данным сделать качественные выводы.

По результатам измерения осей эллипсов (пп. 3, 4) (деформированных круглых ячеек) определять приращения интенсивностей деформаций каждой ячейки на пятимиллиметровом шаге процесса деформирования (табл. 9.2).

Для вычисления приращений $\Delta\varepsilon$ воспользоваться следующими выражениями:

$$\Delta\varepsilon = \frac{2}{\sqrt{3}}\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2},$$

где $\varepsilon_1 = \ln\dfrac{b}{d_0}$; $\varepsilon_2 = \ln\dfrac{a}{d_0}$ – главные деформации;

d_0 – исходный диаметр окружности координатной ячейки.

Вместо вычислений можно воспользоваться номограммой или ЭЦВМ.

Полученные данные $\Delta\varepsilon$ просуммировать построчно, получая таким образом величины накопленных деформаций вдоль каждой линии тока $\varepsilon_к$ (табл. 24.2). По значениям $\varepsilon_к$ построить график зависимости $\varepsilon_к = f(x)$ – распределение интенсивностей деформаций по толщине стенки стакана. На этот же график нанести значение ε, рассчитанное по выражению (24.2).

24.6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

В отчете по работе должен быть конспект теоретической части (готовится при подготовке к работе), таблицы и графики зависимостей, упомянутые выше и выполненные в соответствии с требованиями ЕСКД. Отчет должен содержать выводы по результатам анализа полученных зависимостей, по уравнению экспериментальных и расчетных данных.

24.7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие детали получают прошивкой?

2. Для чего применяют распрессовку перед прошивкой?

3. Какая часть объема заготовки находится в пластическом состоянии при прошивке?

4. Чем лимитирована степень деформации при холодной деформации стальных стаканов?

5. Перечислите основные операции при производстве длинных стаканов и труб.

24.8. ЛИТЕРАТУРА

Охрименко Я. М. Технология кузнечно-штамповочного производства. – М. : Машиностроение, 1976. – С. 412-413.*Приложение 1*

Лабораторная работа 25

МНОГОЭТАЖНАЯ ОБЪЕМНАЯ ШТАМПОВКА ЗАГОТОВОК В СОСТОЯНИИ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

(2 часа)

25.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение особенностей объемной штамповки сверхпластичных материалов и возможностей снижения усилия штамповки за счет регулировки скорости деформации без изменения скорости деформирования.

25.2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Определяющая особенность сверхпластичных металлов и сплавов − это способность при их деформировании проявлять повышенную чувствительность напряжения течения σ_s к изменению скорости деформации $\dot{\varepsilon}$ в оптимальном интервале скоростей деформации [1], т.е. способность проявлять свойства вязкой жидкости. Аналитически это выражается зависимостью:

$$\sigma_s = k \cdot \dot{\varepsilon}^m, \qquad (25.1)$$

где K = *const*, m − показатель скоростей чувствительности, характеризующий наклон кривой $\sigma = \sigma(\dot{\varepsilon})$ в двойных логарифмических координатах к оси абсцисс.

В оптимальном интервале скоростей деформации, как правило, m=0,3+0,6, а за пределами этого интервала m<0,3 (рис. 25.1, кривая 1).

Поведение обычных, несверхпластичных материалов при горячей деформации также может описываться зависимостью (25.1), однако в этом случае m<0,2 и, как правило, m=const для всех $\dot{\varepsilon}$ (см. рис. 23.1, кривая 2).

Указанная особенность сверхпластичных материалов используется при объемной штамповке деталей. Выбрав оптимальную скорость деформации заготовки $(\dot{\varepsilon}_N)$, т.е. в интервале $\dot{\varepsilon}$, где показатель m максимален, можно, в соответствии с рис. 25.1, снизить усилие штамповки в несколько (N) раз (см, σ_N на рис. 25.1) по сравнению с усилием штамповки несверхпластичного материала. Однако уменьшение скорости деформации за счет уменьшения скорости движения ползуна пресса ведет к нежелательному снижению производительности и требует изменения конструкции привода пресса или использования специализированных прессов. Чтобы этого избежать, скорость деформации можно уменьшить без изменения скорости движения ползуна пресса путем одновременной штамповки нескольких заготовок в штампах, уложенных в несколько этажей, один на другой.

Допустим для простоты, что деформация объемной штамповки осуществляется только осадкой заготовки. Скорость деформации при осадке одной заготовки $\dot{\varepsilon}_1$ связана со скоростью деформирования V (т.е. скоростью движения ползуна пресса) следующим соотношением:

$$\dot{\varepsilon}_1 = V / h, \qquad (25.2)$$

где h − текущая высоте заготовки.

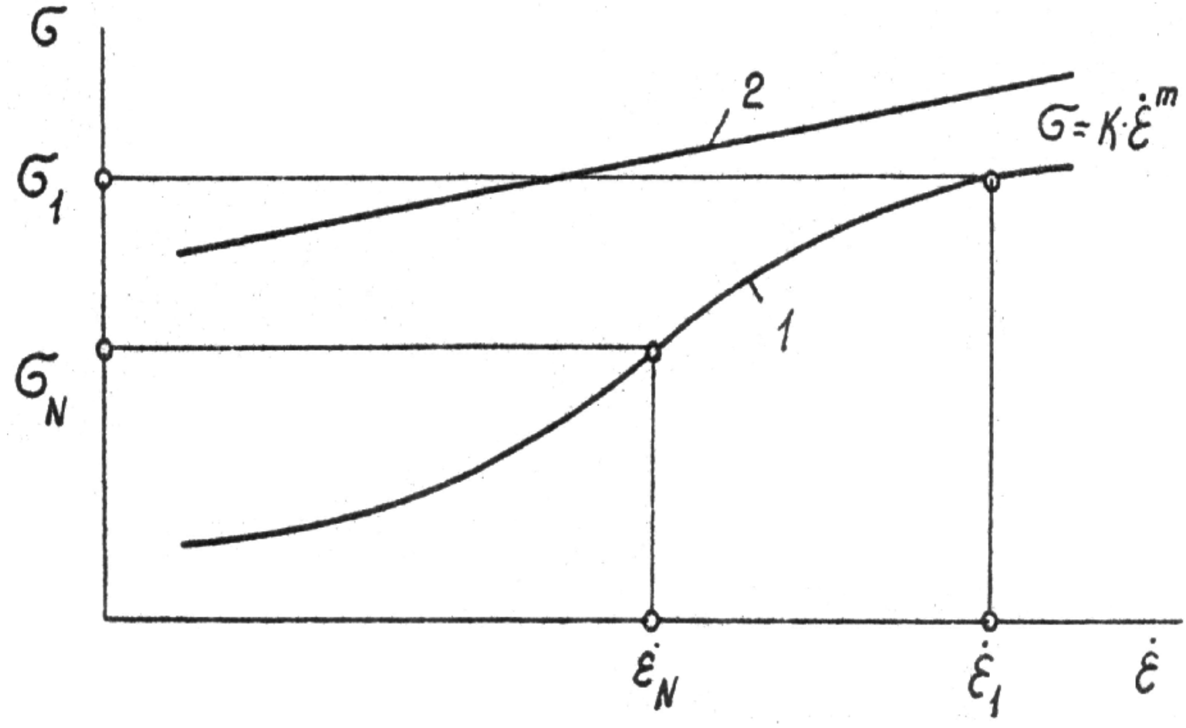


Рис. 25.1. Скоростная зависимость напряжения течения при деформировании сверхпластичного (I) и несверхпластичного (II) материалов.

Если с той же скоростью деформирования V осаживаются одновременно N штук уложенных одна на другую заготовок, то для каждой заготовки скорость деформации составляет:

$$\dot{\varepsilon}_N = V / H = V / \sum_{i=1}^{N} h_i < \dot{\varepsilon}_1 , \qquad (25.3)$$

где $H = \sum_{i=1}^{N} h_i$ − общая суммарная высота заготовок.

Если при этом все осаживаемые заготовки имеют одинаковую высоту $h_i = h$, то

$$H = Nh \qquad (25.4)$$

$$\dot{\varepsilon}_N = V / Nh = \dot{\varepsilon}_1 / N , \qquad (25.5)$$

т.е. при неизменной скорости деформирования, обусловленной конструкцией привода пресса, осадка одновременно нескольких уложенных друг на друга заготовок приводит к пропорциональному снижению скорости деформации каждой заготовки в число раз, равное числу заготовок. Очевидно, что этот вывод справедлив и для случая, когда заготовки размещены в штампах, уложенных в несколько этажей один на другой.

Приближенное значение усилия для такой схемы штамповки, которую назовем многоэтажной, можно рассчитать следующим образом.

Как известно, полное усилие объемной штамповки зависит от напряжения течения штампуемого материала σ_s и геометрических параметров поковки χ_i $(i=1,2,...,)$, т.е. от высоты, площади проекции поковки и т.д. В общем случае эту зависимость можно выразить следующим образом:

$$P = б_s \cdot f(x_1, x_2, ..., x_k). \qquad (25.6)$$

Обозначим $G = f(x_1, x_2, ..., x_k)$. Тогда, в соответствии с зависимостью (25.1), усилие объемной штамповки одной заготовки из материала, чувствительного к изменению скорости деформации:

$$P_I = \sigma_S \cdot G = k \cdot \dot{\varepsilon}_1^m \cdot G, \qquad (25.7)$$

а усилие многоэтажной штамповки *N* заготовок, в соответствии с формулой (25.5):

$$P_N = k \cdot \dot{\varepsilon}_N^m = k(\dot{\varepsilon} / N)^m \cdot G = k\dot{\varepsilon}_1^m \cdot G / N. \qquad (25.8)$$

Таким образом, с учетом (25.7) имеем следующую формулу для приближенного расчета усилия штамповки:

$$P_N = P_1 / N^m. \qquad (25.9)$$

Очевидно, что эффект снижения усилия при увеличении числа одновременно штампуемых заготовок (как и в случае понижения скорости деформирования *V* при штамповке одной заготовки) проявляется тем в большей степени, чем выше скоростная чувствительность, т.е. чем больше показатель *m* штампуемого материала. Например, при *m=0,5* снизить деформирующее усилие в 2 раза можно, штампуя одновременно 4 заготовки, а при *m=0,33* для снижения усилия в 2 раза необходимо штамповать одновременно 8 заготовок.

25.3. ОБОРУДОВАНИЕ, ИНСТРУМЕНТ, ОБРАЗЦЫ

Работа проводится на испытательной машине ZД10/90 усилием 100кН с использованием цилиндрических образцов ∅30x10 мм или квадратных образцов 30x30x5 мм. Одна партия образцов изготавливается из сверхпластичного материала с подготовленной ультрамелкозернистой структурой (размер зерна 1-3 мкм), например, прессованного сплава *Sn-38% Pb* или сплава *Zn-22% Al*, другая партия − из несверхпластичного материала, например, *Pb* или крупнозернистого *Zn-22% Al*.

Схема инструментальной наладки приведена на рис. 25.2. Инструмент состоит из направляющего контейнера 1, верхнего штампа 2, нижнего неподвижного штампа 3, промежуточных штампов 4 в количестве (N-1), где *N* − число одновременно штампуемых заготовок.

При использовании образцов из материала, деформирующегося при повышенной температуре, например *Zn-22% Al*, контейнер оснащается охватывающим его нагревателем 5 для обеспечения изотермических условий штамповки нагретых заготовок.

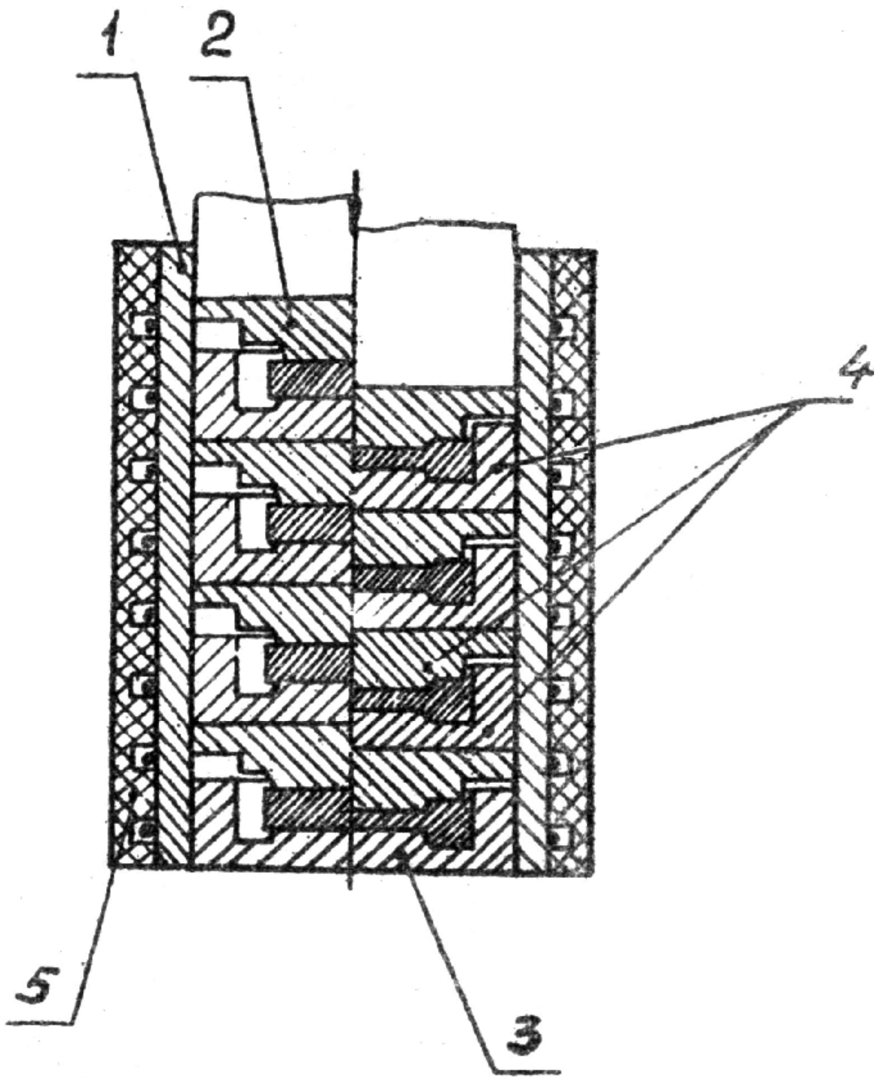


Рис. 25.2. Инструмент для многоэтажной объемной штамповке четырех заготовок
1 − направляющий контейнер; 2 − верхний штамп; 3 − нижний штамп; 4 − промежуточные штампы; 5 − нагреватель

25.4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ И УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

На две бригады по 2-3 студента выдаются индивидуальные задания, для выполнения которых первой бригаде выделяется 13 образцов из сверхпластичного материала (например, из прессованного или катаного сплава *Sn-38% Pb* с подготовленной ультрамелкозернистой структурой), а для второй бригады − 13 образцов из несверхпластичного материала, например, из свинца.

В индивидуальном задании указываются конкретные сплавы, начальная скорость деформирования и величина рабочего хода пресса для штамповки одной заготовки.

Для проведения работ необходимо:

1. Изучить инструкцию по работе на испытательной машине ZД 10/90.
2. При разомкнутых штампах нанести смазку на образец из несверхпластичного

материала и на рабочие поверхности штампов одного из этажей инструментальной наладки и уложить между ними образец.

3. Отштамповать образец, фиксируя скорость деформирования и усилие штамповки в начале, середине и конце рабочего хода.

4. Разомкнуть штампы, извлечь отштампованный образец и снова смазать рабочие поверхности тех же штампов.

5. Смазать и заложить между штампами образец из сверхпластичного материала.

6. Отштамповать образец, фиксируя те же параметры (см. п.3)

7. Нанести смазку на два образца из несверхпластичного материала и рабочие поверхности штампов в двух этажах инструментальной наладки.

8. Отштамповать одновременно два образца, фиксируя те же параметры; разомкнуть штампы и извлечь образцы.

9. Повторить указанные в пп. 7 и 8 операции для двух образцов из сверхпластичного материала, а затем − для четырех и шести образцов из несверхпластичного и сверхпластичного материалов.

10. Записать экспериментальные результаты в таблицу 25.1.

Таблица 25.1

Экспериментальные результаты по определению усилия многоэтажной объемной штамповки

Число одновременно штампуемых заготовок N	Усилие штамповки P_N, кН					
	Несверхпластичного материала			Сверхпластичного материала		
	начало рабочего хода	середина рабочего хода	конец рабочего хода	начало рабочего хода	середина рабочего хода	конец рабочего хода
1						
2						
4						
6						

25.5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРЕМЕНТА

1. По результатам эксперимента построить по три графика зависимостей $P_N = f(N)$ для несверхпластичного и сверхпластичного материалов: 1) в начале рабочего хода; 2) в середине рабочего хода; 3) в конце рабочего хода.

2. По формуле (25.2) рассчитать $\dot{\varepsilon}_1$ и по формуле (25.5) рассчитать для каждого N=2, 3, 4, 5, 6 скорость деформации $\dot{\varepsilon}_N$ в начале, середине и конце рабочего хода и записать результаты расчета в таблицу 25.2.

3. Определить средний показатель скоростной чувствительности по формуле:

$$m = \frac{\lg P_N - \lg P_1}{\lg \dot{\varepsilon}_N - \lg \dot{\varepsilon}_1}$$

для обоих материалов.

4. Рассчитать усилие штамповки P_N по формуле (25.9) и записать результаты расчета в таблицу 25.2.

5. Построить графики зависимостей:

$$P_N^{расч} = f(N)$$

для обоих материалов: 1) в начале рабочего хода; 2) в середине рабочего хода; 3) в конце рабочего хода.

6. Сравнить экспериментальные и расчетные кривые (пп. 1 и 5).

Таблица 25.2

Результаты расчета скорости деформации $\dot{\varepsilon}_N$ и усилия P_N, кН при многоэтажной объемной штамповке

Число одновременно штампуемых заготовок, N	Несверхпластичный материал						Сверхпластичный материал					
	начало рабочего хода		середина рабочего хода		конец рабочего хода		начало рабочего хода		середина рабочего хода		конец рабочего хода	
	$\dot{\varepsilon}_N$	P_N	$\dot{\varepsilon}_N$	P_N	$\dot{\varepsilon}_N$	P_N	$\dot{\varepsilon}_N$	P_N	$\dot{\varepsilon}_N$	P_N	$\dot{\varepsilon}_N$	P_N
1												
2												
3												
4												
5												
6												

25.6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Конспект теоретической части работы.
2. Исходные данные для эксперимента и эскиз отштампованного образца,
3. Таблицы, содержащие экспериментальные и расчетные результаты определения $\dot{\varepsilon}_N$ и P_N.
4. Расчет среднего показателя m по экспериментальным результатам.
5. Графики зависимостей $P_N = f(\dot{\varepsilon})$:

а) для экспериментальных результатов,

б) для расчетных результатов.

6. Выводы, содержащие:

а) констатирующую часть (что получено),

б) теоретическое объяснение различия в форме кривых $P_N = f(\dot{\mathcal{E}})$ для сверхпластичного и несверхпластичного материалов и соответствующий вывод о преимуществах использования многоэтажной схемы при объемной штамповке сверхпластичных материалов.

25.7. ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнов О.М. Обработка металлов давлением в состоянии сверхпластичности. − М.: Машиностроение, 1979. − С. 6-10, 17-19, 25-30, 143-145.

2. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. − М.: Машиностроение, 1971. − С.66-67.

25.8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что характеризует показатель *m* в уравнении связи напряжения течения и скорости деформации материала?
2. Для каких материалов показатель *m* больше: для сверхпластичных или несверхпластичных?
3. Почему многоэтажную схему наиболее целесообразно применять при штамповке сверхпластичных материалов?
4. Чем объясняется различие в поведении кривых $P_N = f(N)$ для начальной, средней и конечной точек рабочего хода?
5. Какие технические трудности могут возникнуть при использовании многоэтажного инструмента?

Лабораторная работа 26

ИЗУЧЕНИЕ РОЛИ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ШТАМПОВКЕ НА КРИВОШИПНЫХ МАШИНАХ

(2 часа)

26.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Приобретение навыков в определении влияния свойств материалов и жесткости системы машина − инструмент на точность получаемых поковок.

26.2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Если измерить расстояние Δ между столом пресса и ползуном кривошипной машины при крайнем нижнем положении последнего, то величина Δ при различных нагрузках будет иметь различные значения [1]. При большей нагрузке Δ будет принимать большее значение вследствие увеличения упругой деформации всех деталей машины: ползун вжимается, шатун сжимается и изгибается, коленчатый вал изгибается, станина растягивается и изгибается и т.д. Если обозначить указанное расстояние при холостом ходе машины, т.е. без нагрузки, через Δ_0, то при нагрузке это расстояние увеличится на суммарною упругую деформацию δ деталей машины и составит величину

$$\Delta = \Delta_0 + \delta . \qquad (26.1)$$

Поэтому если наладить штампы на определенную высоту деформируемой поковки путем фиксации взаимного расположения при крайнем нижнем положении ползуна без нагрузки, то при штамповке, т.е. под нагрузкой, высота поковки будет больше величины, соответствующей взаимному соложению инструмента при отсутствии нагрузки. Чем больше усилие, развиваемое в процессе штамповки, тем больше эта разница. Чем выше сопротивление поковки деформированию, тем больше развиваемое на ползуне кривошипной машины усилие, а сопротивление поковки деформированию, в свою очередь, зависит от ряда причин, в том числе от свойств обрабатываемого материала, температуры и скорости деформации [2].

Графически суммарная упругая деформация δ машины изобразится абсциссами кривой *3* (рис. 26.1), показывающей, что прямая пропорциональность изменения δ с увеличением нагрузки P наступает лишь после достижения определенного усилия P_1. До достижения этого усилие изменение δ подчиняется криволинейной зависимости, определяемой наличием в сопрягающихся деталях зазоров, упруго выбирающихся по мере увеличения нагрузки, когда при некотором усилии P_1 все зазоры будут выбраны, изменение δ с повышением нагрузки P будет происходить прямо пропорционально этой нагрузке.

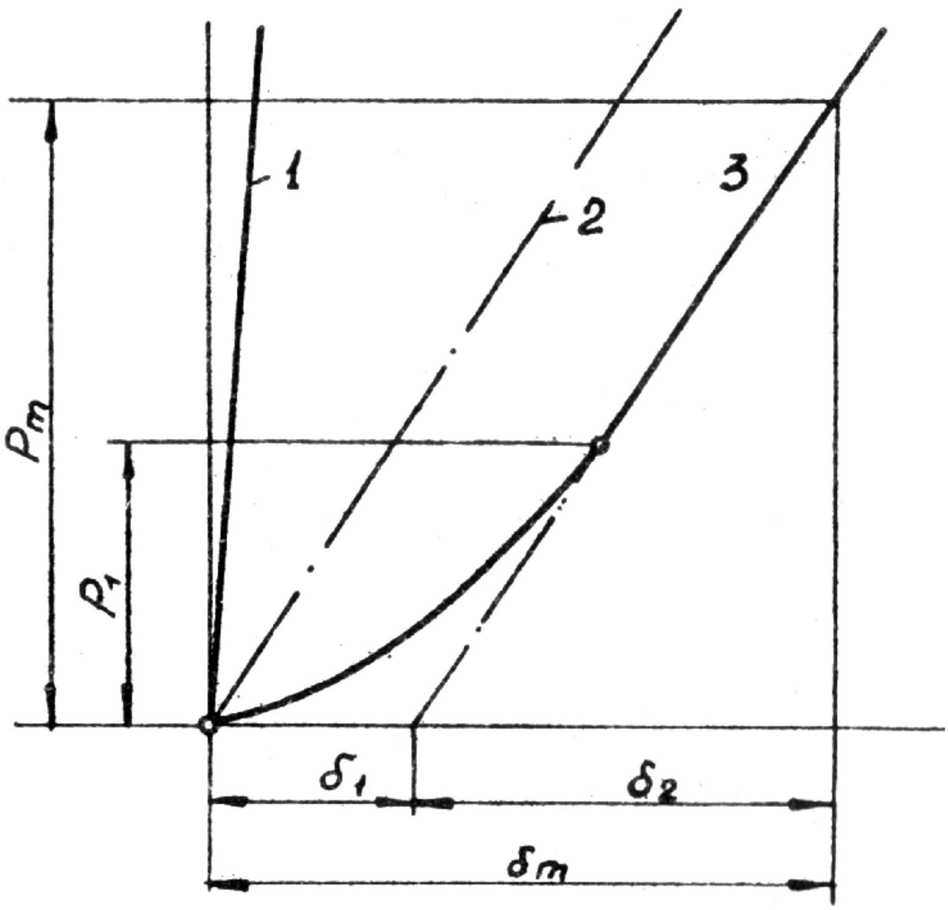


Рис. 26.1. График упругой деформация кривошипной машины в зависимости от развиваемого усилия: 1 − упругая деформация станины; 2 − суммарная упругая деформация машины при полном отсутствии упруго выбираемых зазоров в системе; 3 − суммарная упругая деформация реальной машины.

Если продолжить прямую *3* до пересечения с осью абсцисс, то прямая отсечет участок δ_1, характеризующий деформацию машины, связанную с выборкой зазоров. Величина δ_1 для любой машины является величиной переменной, зависящей от степени износа машины. Если бы зазоры полностью отсутствовали, то суммарная упругая деформация машин происходила бы по закону прямой линии *2*, проведенной через начало координат и параллельной прямолинейному участку кривой *3*.

В реальной машине всегда имеются упруго выбираемые зазоры, а поэтому при любой нагрузке, например P_m , величина упругой деформации машины будет слагаться из двух составляющих: δ_1, связанной с наличием упруго выбираемых зазоров, и δ_2, полученной при отсутствии зазоров.

Упругая деформация станины характеризуется прямой *1* и составляет менее 15% от общей суммарной деформации кривошипной машины.

Если сравнить две кривошипные машины, имеющие одинаковую величину δ_1, но обладающие разной жесткостью системы (машина 1 более жесткая), у которых все зазоры выбираются при одинаковом усилии P_1 и при штамповке одинаковых поковок из различных материалов, например, из свинца и алюминиевого сплава, развивающих соответственно усилия P_{min} и P_{max}, получится, что у машины с большей жесткостью системы общая упругая деформация будет иметь соответственно значения δ_{Pmin1} и δ_{Pmax1}, в то время как у машины менее жесткой общая упругая деформация составит соответственно δ_{PminII} и δ_{PmaxII} (рис. 26.2). Видно, что непосредственно после деформации разница по высоте поковок, изготовленных на более жесткой машине, составит δ'_1, а поковок, изготовленных на менее жесткой машине, − δ'_{II}, т.е. больше, чем δ'_1. Отсюда следует, что для точной штамповки необходимо выбирать более жесткую машину.

Как видно из графика (рис. 26.2), при одинаковой нагрузке заштрихованная площадь, характеризующая работу деформации, в случае более жесткой машины меньше. Однако необходимо при этом иметь в виду, что более жесткую машину легче перегрузить.

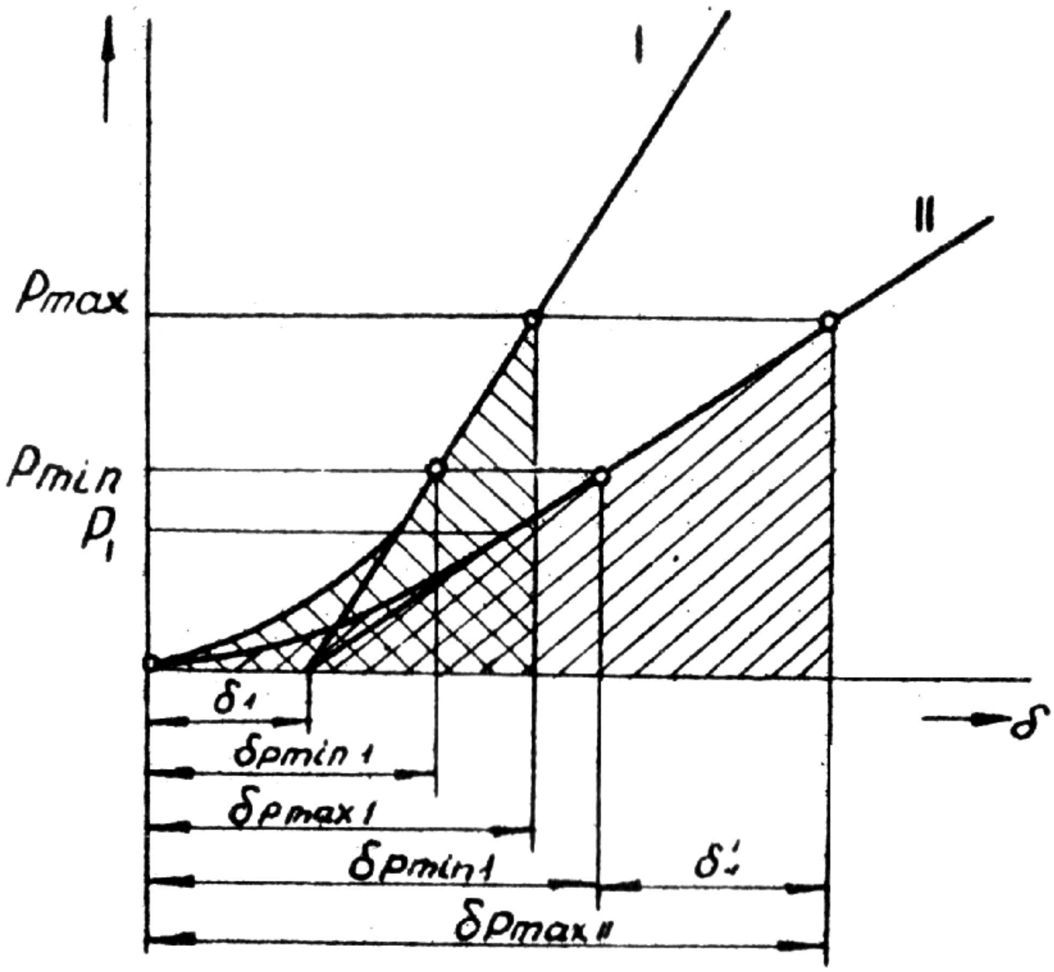


Рис. 26.2. График упругой деформации жесткой машины (I) и машины менее жесткой (П).

26.3. ОБОРУДОВАНИЕ, ИНСТРУМЕНТ, МАТЕРИАЛЫ

1. Эксцентриковый пресс 100 кН.
2. Осциллограф светолучевой Н-043.
3. Многоканальный тензоусилитель «Топаз-3».
4. Блок питания «Агат».
5. Месдоза.
6. Ходограф.
7. Планиметр.
8. Штангенциркуль.

9. Приспособление с осадочными плитами (рис. 26.3).
10. Образцы цилиндрические на сжатие ∅ 25x37,5:
- пластилиновые,
- из свинца технической чистоты,
- из алюминия АД-1.

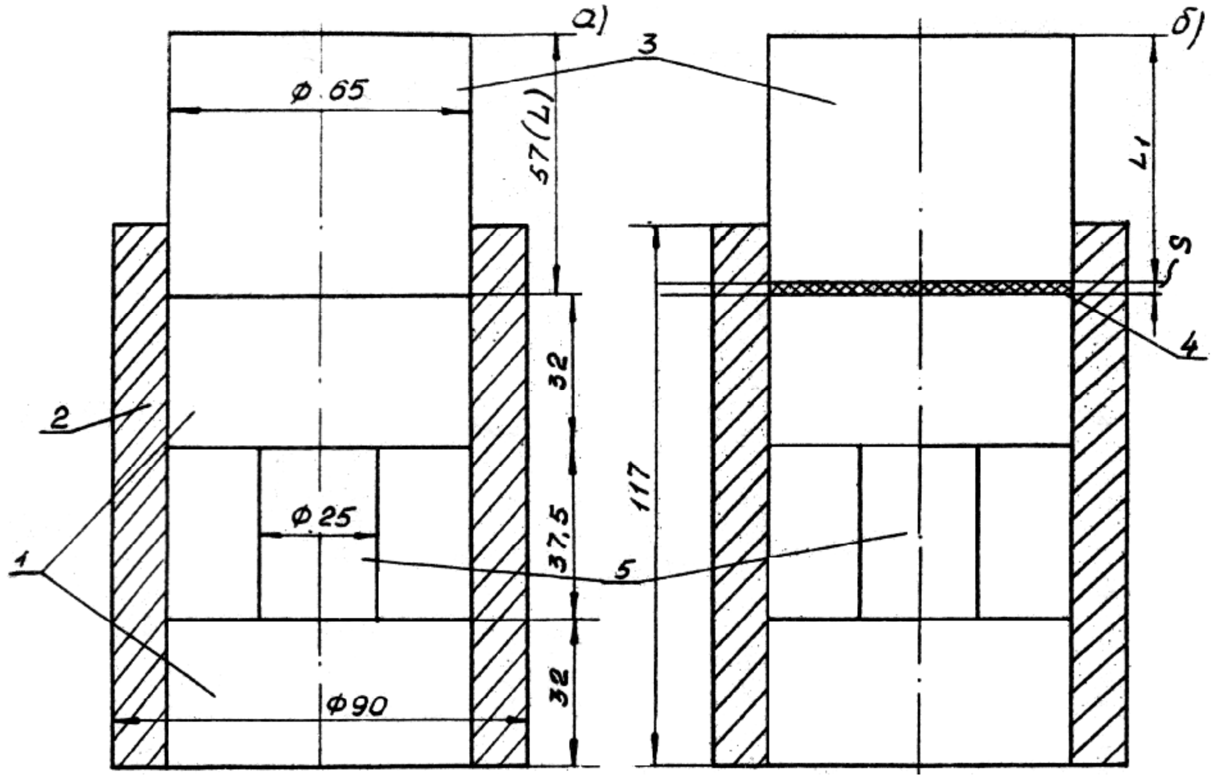


Рис. 26.3. Схема установки для деформирования образцов:
1 – осадочные плиты; 2 – контейнер; 3 – пуансон; 4 – резиновая прокладка; 5 – образец.

26.4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ И УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

1. Перед началом работы изучить инструкцию по безопасным приемам работы на кривошипной машине и с регистрирующей аппаратурой.
2. Получить задание с конкретными условиями проведения эксперимента у преподавателя, проводящего занятия.
3. Подготовить оборудование и регистрирующую аппаратуру для записи диаграммы «ход-усилие деформирования».
4. Определить исходные размеры образцов H_0 перед деформацией и полученные данные занести в протокол испытаний (табл. 26.1).
5. Провести деформацию образцов на осадочных плитах в условиях более жесткой (см. рис. 26.3,а) и менее жесткой (см. рис. 26.3,б) системы «оборудование-инструмент» с одновременной записью диаграммы «ход-усилие деформирования».
6. После окончания испытаний выключить аппаратуру, сдать инструмент, материалы и приборы учебному мастеру.

26.5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Заполнить оставшиеся колонки таблицы 26.1.
2. Определять конечные размеры образцов $H_к$ после деформации.
3. Определить степени деформации образцов по формуле

$$\frac{H_0 - H_k}{H_0} \cdot 100\% \qquad (26.2)$$

Таблица 26.1

Данные для определения влияния свойств материалов и жесткости системы машина-инструмент на точность получаемых поковок

Материал образца	Жесткость системы «машина-инструмент»	H_0 мм	$H_к$ мм	$\frac{H_0 - H_k}{H_0} \cdot 100\%$	Площадь диаграммы F_g, мм^2	Работа деформации A_g, Дж
Пластилин Свинец Сплав АД1	По рис. 26.3а					
Пластилин Свинец Сплав АД1	По рис. 26.3б					

4. По полученным осциллограммам определить с помощью планиметра площадь диаграмм «ход-усилие» F_g, а по формуле (26.3) работу деформации

$$A_g = F_g \cdot M \ , \qquad (26.3)$$

где M − масштаб измерения.

5. Определить дисперсию воспроизводимости.
6. Определить разницу в абсолютных высотных размерах $\Delta H_к$ и относительных степеней деформаций, соответствующих $\Delta\varepsilon_{OH}$ образцов, продеформированных по более и менее жестким схемам системы «машина-инструмент», и результаты занести в таблицу 26.2.
7. Определить разницу абсолютных величин работы деформации соответствующих образцов, продеформированных по более и менее жестким схемам системы «машина-инструмент», и результаты занести в таблицу 26.2.
8. Сделать выводы в виде качественного и количественного описания полученных зависимостей.

Таблица 26.2

Данные, полученные после обработки результатов эксперимента

Материал образца	$\Delta H_к$, мм	$\Delta \varepsilon_{OH}$	ΔA_g, Дж
Пластилин Свинец Сплав АД1			

26.6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

В отчет должны входить: номер работы и ее название, цель, конспект теоретической части, заполненный протокол испытаний, диаграммы «ход-усилие деформирования», выводы по работе.

26.7. ЛИТЕРАТУРА

1. Залесский В.И. Оборудование кузнечно-прессовых цехов. − М.: Высшая школа, 1978. − С. 357-359.
2. Охрименко Я.М., Тюрин В.А. Теория процессов ковки. − М.: Высшая школа, 1977. − С.112-120.

26.8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как влияют свойства обрабатываемого материала на точность получаемых поковок?
2. Какое влияние оказывает жесткость системы «машина-инструмент» на точность поковок?
3. Что необходимо сделать для увеличения точности поковок, получаемых на кривошипной машине?
4. На каких машинах − более или менее жестких − требуется более точная дозировка металла заготовок?
5. Каким образом достигается штамповка поковок с наименьшими энергетическими затратами?

Лабораторная работа 27

ОБРЕЗНЫЕ ОПЕРАЦИИ

(2 часа)

27.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Приобретение практических навыков по изучению технологических особенностей операции обрезки заусенцев у штампованных поковок, условий образования дефектов обрезки и мер по их предотвращению.

27.2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

На практике используют горячую и холодную обрезку. Горячая обрезка осуществляется непосредственно после штамповки на прессе, входящем в состав штамповочного агрегата. Это приводит к экономии энергии, расходуемой на обрезку.

Схема обрезки заусенца приведена на рис. 27.1. Применяемый штамп состоит из пуансона *1* и матрицы *2*, причем обрезной штамп обычно имеет только одну режущую кромку *С*. Место среза на поковке прилегает непосредственно к режущей кромке матрицы. Часть штампа, не имеющая режущих кромок, в данном случае пуансон, выполняет роль толкающей детали и имеет форму, соответствующую конфигурация поковки по поверхности соприкосновения.

Обрезные матрицы бывают цельными или составными. Цельные матрицы (рис. 27.2) имеют режущую кромку под прямым углом, но провальное отверстие имеет уклон, исключающий застревание поковки в матрице после обрезки заусенца. Режущая кромка матриц расположена выше остальной части, что обеспечивает плотное прилегание к матрице заусенца, даже если он был искривлен при передаче поковок от места штамповки к месту обрезки. При таком расположении режущей кромки ее шлифование значительно упрощается.

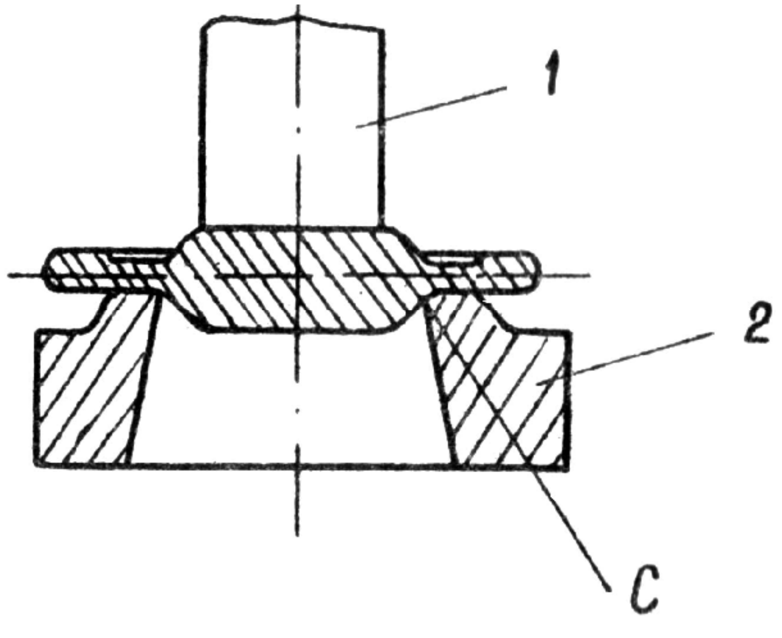


Рис. 27.1. Схема обрезки заусенца: 1 – пуансон, 2 – матрица, С – режущая кромка.

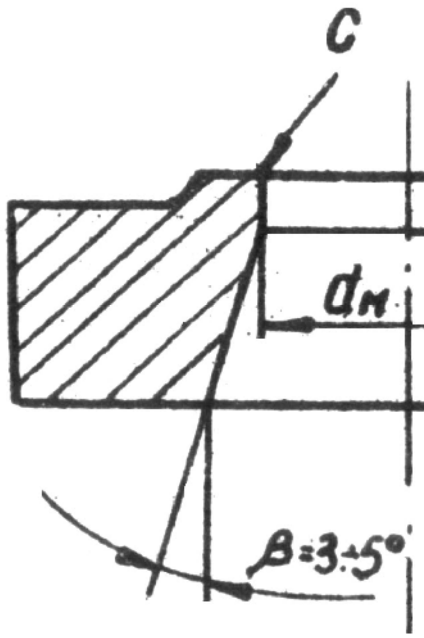


Рис. 27.2. Цельная матрица с режущей кромкой *C* под прямым углом: $d_м$ − диаметр очка матрицы.

Износ матриц заключается в затуплении их режущих кромок. Для увеличения срока службы режущие кромки матриц восстанавливают. В промышленности обрезной инструмент восстанавливают обработкой резанием, наплавкой слоя металла с последующим восстановлением формы режущей кромки обработкой резанием или абразивной обработкой.

Для уменьшения усилия обработки и обеспечения более плавной нагрузки пресса применяют матрицу со скошенными режущими кромками (рис. 27.3). Во избежание появления горизонтальных сил число скосов может соответствовать любому четному числу. Уклон режущих кромок выполняют под углом α=3÷6°.

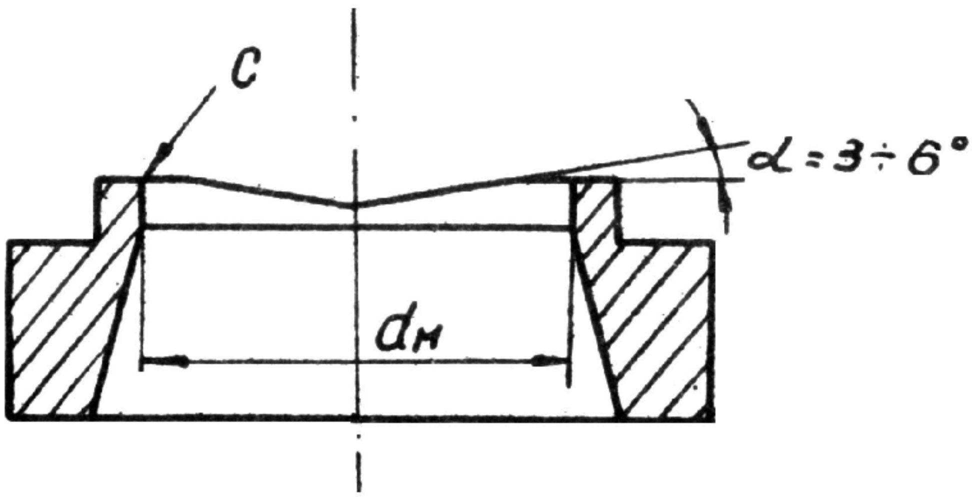


Рис. 27.3. Цельная матрица со окошенной режущей кромкой С.

При обычной обрезке заусенца график «усилие-рабочий ход» показан на рис. 27.4 (кривая 1). При наличии скосов у режущей кромки график (кривая 2) характеризуется понижением максимального усилия обрезки, т.е. $P_2 < P_1$, при этом рабочий ход увеличивается. Работа на обрезку в обоих случаях примерно одинакова.

При обрезке заусенца соседние участки металла не должны подвергаться даже незначительным остаточным деформациям, т.к. поковка может искривиться и в этом случае нуждаться в добавочной операции - правке, или подвергнуться смятию, приводящему к браку. При чрезмерном увеличении размера по месту разъема штампа поковка не входит в провальное окно матрицы и при проталкивании часть штамповочных уклонов срезается вместе с заусенцем. При увеличенном зазоре между матрицей и поковкой по контуру поковки остается часть заусенца, втянутого в зазор.

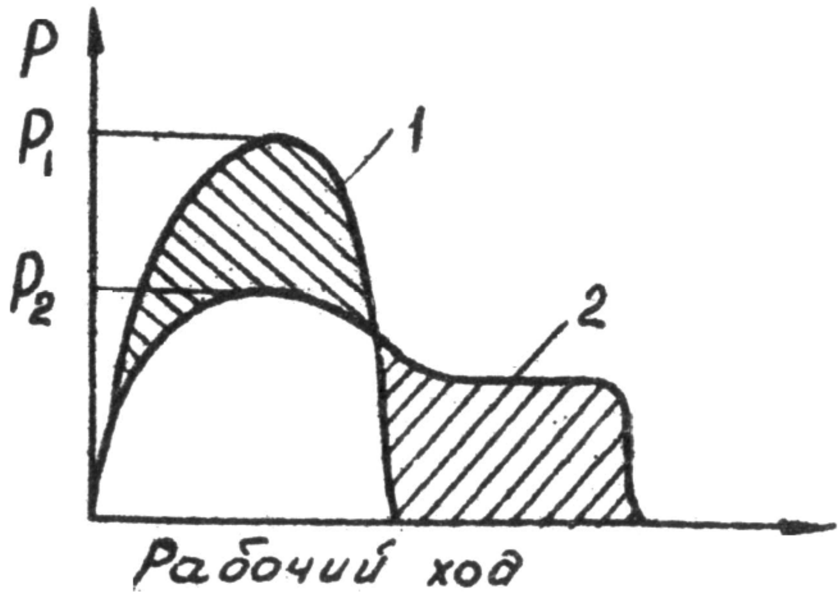


Рис. 27.4. График «усилие - рабочий ход» при обрезке заусенцев в матрице:
1 − с прямой режущей кромкой; 2 − со скошенной режущей кромкой.

При обрезке поковка может подвергнуться смятию, если ее площадь соприкосновения с пуансоном окажется недостаточной и напряжения на контактной поверхности превысят сопротивление деформации прежде, чем напряжения у заусенца достигнут величины сопротивления срезу.

Необходимая площадь контакта пуансона с поковкой F_n должна удовлетворять следующему соотношению:

$$F_n = \frac{\sigma_{cp} \Pi}{\sigma_{см}} \cdot h \ , \qquad (27.1)$$

где σ_{cp} − сопротивление срезу материала поковки при температуре обрезки, МПа;

$\sigma_{см}$ − сопротивление смятию поковки при температуре обрезки, МПа;

Π − периметр обрезного отверстия матрицы, мм;

H − толщина заусенца, мм.

Необходимое усилие пресса для обрезных операций зависит от сопротивления среза материала поковки, температуры, при которой происходит обрезка, периметра среза и толщины заусенца.

Усилие среза:

$$P_{ср}=F_{ср}\sigma_{ср},\qquad(27.2)$$

где $F_{ср}$ − площадь среза заусенца, м^2;

$\sigma_{ср}$ − предел прочности на срез, Н/м^2.

При этом учитывают следующее:

1. Площадь среза $F_{ср}$, подсчитываемая как произведение периметра $П$ среза на толщину заусенца h, увеличивается при затуплении режущих кромок инструмента.

2. Действительная толщина заусенца может оказаться значительно больше расчетной при недоштамповке поковок.

Указанное заставляет ввести поправочный коэффициент в формулу для определения усилия при чистом срезе. При самых неблагоприятных условиях усилие обрезки возрастает на 70%, поэтому:

$$P_{ср}=1,7\sigma_{ср}Пh.\qquad(27.3)$$

Обычно при расчете вместо $б_{ср}$ используют значения $б_в$, которые указаны в справочниках.

При $\sigma_{ср}\approx 0,8б_в$ получим:

$$P_{ср}\approx 1,4б_в\cdot Пh.\qquad(27.4)$$

Величину $\sigma_в$ следует принимать с учетом температуры, при которой обрезают поковки.

27.3. ОБОРУДОВАНИЕ, ИНСТРУМЕНТ, МАТЕРИАЛЫ

1. Испытательная машина Р-5.
2. Набор обрезных матриц с пуансонами.
3. Штангенциркуль.
4. Образцы цилиндрические с заусенцем по периметру из алюминия-1 или технического свинца (рис. 27.5).

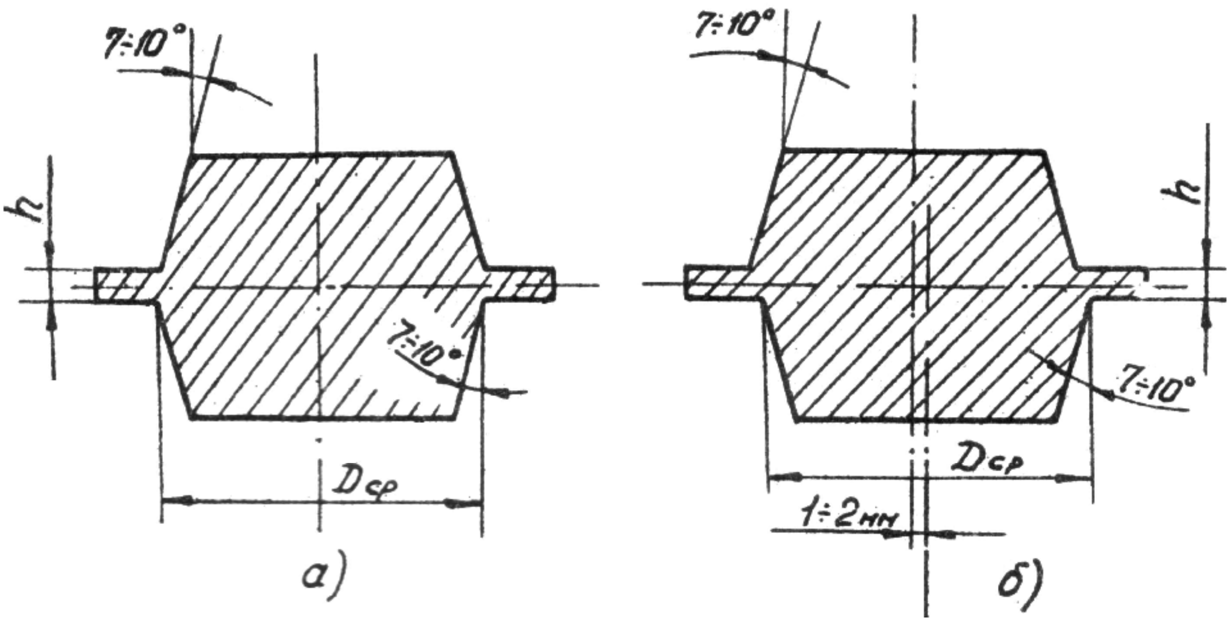


Рис. 27.5. Эскизы штампованных поковок с заусенцем: а) качественная поковка; б) поковка с дефектом штамповки (смещение половинок штампа).

27.4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ И УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

1. Перед началом работы изучить инструкцию по безопасным приемам работы на испытательной машине Р-5 (стр. 5).

2. Получить задание с конкретными условиями проведения эксперимента у преподавателя, проводящего занятия.

3. Подготовить оборудование и регистрирующую аппаратуру для записи диаграммы «рабочий ход - усилие среза».

4. Определить исходные размеры образцов − диаметр среза $D_{ср}$ и толщину заусенца *h*. Полученные данные занести в протокол испытаний (табл. 27.1).

Таблица 27.1

Результаты анализа процесса обрезки штампованных поковок

Тип матрицы	$d_м$	$D_{ср}$	$P_{обрезки}$		Эскиз поковки после обрезки	Заключение о результатах обрезки
			$P_{расч.}$	$P_{факт.}$		

5. Определить размеры очка матрицы $d_м$ и данные занести в протокол испытаний (табл. 27.1).

6. Провести обрезку поковок с одновременной записью диаграммы «рабочий ход − усилие среза» по шести вариантам:

I. Обрезка поковки при $D_{ср}=d_м$.
II. Обрезка поковки при $D_{ср}<d_м$.
III. Обрезка поковки при $D_{ср}>d_м$.
IV. Обрезка поковки на матрице со скошенной кромкой при $D_{ср}=d_м$.
V. Обрезка поковки на матрице с затупленными кромками при $D_{ср}=d_м$.
VI. Обрезка поковки со смещением ее верхней и нижней половинок друг относительно друга (дефект штамповки) при $D_{ср}=d_м$.

7. После окончания испытаний выключить аппаратуру и сдать инструмент учебному мастеру.

27.5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. По формуле 27.2 определить расчетное усилие обрезки $P_{расч.}$ и занести в протокол испытаний (табл. 27.1).

2. Из диаграмм «рабочий ход − усилие среза» определить фактическое усилие обрезки $P_{факт.}$ и соответственно занести в табл. 27.1.

3. Построить графики «рабочий ход − усилие среза» для шести вариантов и провести анализ зависимости максимального усилия обрезки от геометрических размеров и состояния режущей кромки матрицы.

4. На одном рисунке построить графики «рабочий ход − усилие среза» при обрезке поковки на матрице с прямой кромкой ($D_{ср}=d_м$). Провести сравнительный анализ по усилию обрезки, рабочему ходу и работе деформации при обрезке. Сделать выводы.

5. Зарисовать в табл. 27.1 эскизы поковок после обрезки и провести анализ полученных дефектов. Сделать заключение о результатах обрезки.

27.6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

В отчет должны входить: номер работы и ее название, цель, конспект теоретической части, заполненный протокол испытаний, диаграммы «рабочий ход - усилие среза», выводы по работе.

27.7. ЛИТЕРАТУРА

Охрименко Я.М. Технология кузнечно-штамповочного производства. – М..: Машиностроение, 1976. − С. 442-457, 469-470.

27.8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что влияет на усилие обрезки поковки?
2. Каковы пути снижения усилия обрезки?
3. Перечислите типичные дефекты при обрезке и меры по их предотвращению.
4. Укажите основные типы конструкций матриц и пуансонов для обрезки.
5. На каком виде оборудования производится обрезка поковок?

Лабораторная работа 28

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАТРАТ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМАХ ХОЛОДНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ

(2 часа)

28.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомление со схемами выдавливания и установление закономерностей изменения усилия; оценка энергетических затрат при прямом, обратном и комбинированном выдавливании.

28.2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Холодное выдавливание представляет собой одну из основных разновидностей формообразования при изготовлении деталей машин методом обработки металлов давлением.

Сущность процесса состоит в том, что заготовку устанавливают в полости штампа, выполненного конструктивно в виде закрытого, но так как в ней имеется выходное отверстие, то часть металла выдавливается через него за пределы основной полости. Отходов здесь не предусматривается.

Однако при холодном выдавливания необходимо прикладывать высокие удельные деформирующие усилия, что приводит к недостаточной стойкости штампового инструмента и ограничивает область применения процесса.

Однако при реализации различных схем выдавливания энергетические затраты сильно отличаются, что необходимо учитывать при выборе способа получения изделий.

В промышленности нашли применение две наиболее распространенные схемы выдавливания: прямое (рис. 28.1 а) и обратное (рис. 28.1 б).

При прямом выдавливании (рис. 28.1а) независимо от того, движется ли *1* относительно матрицы *2* или, наоборот, матрица движется относительно пуансона, заготовка сдвигается в сторону выходного отверстия матрицы, что вызывает появление сил трения T, направленных в сторону, противоположную истечению металла. Эти силы трения вредны, так как тормозят периферийное перемещение металла и усугубляют неравномерность деформации.

При обратном выдавливания (рис. 28.1б) эти силы трения не возникают, поскольку заготовка размещается в глухой части полости матрицы.

В обеих схемах выдавливания имеются силы трения T_1, возникающие в зоне продвижения выдавливаемого металла относительно калибрующей части инструмента. Они всегда направлены в сторону, противоположную истечению металла.

В последние года разработано и применяется выдавливание с активными и полезными силами трения на поверхности заготовки [1]. Эти силы полезны, поскольку направлены в сторону истечения металла, уменьшая неравномерность деформации.

Для осуществления выдавливания с активными и полезными силами трения необходимы минимум два движения пресса (пресс двойного действия или пресс простого действия с маркетным устройством). В простейшем случае для создания активных сил трения T необходимо в процессе выдавливания сдвигать матрицу в сторону течения металла (рис. 28.1 в, г).

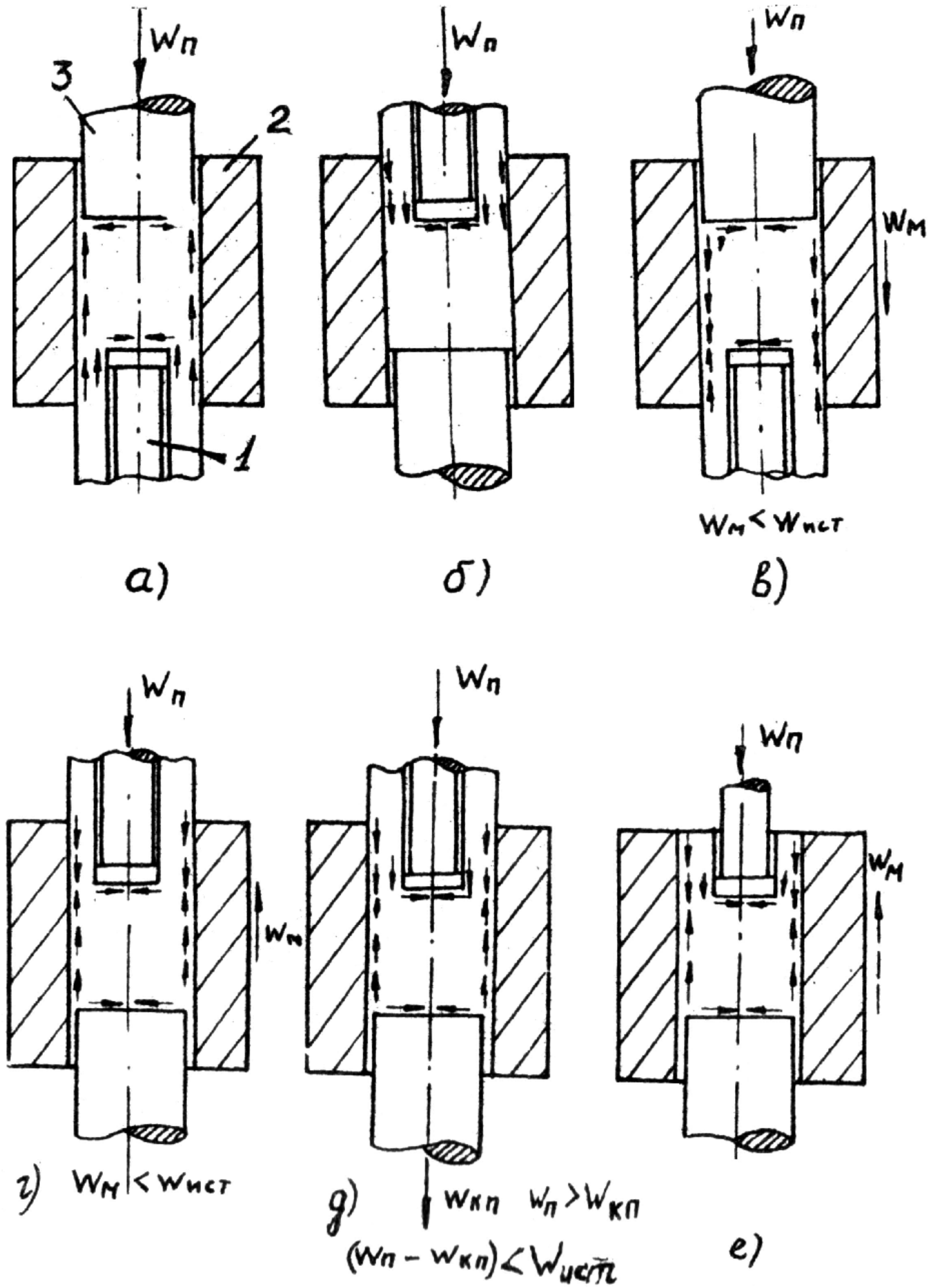


Рис. 28.1. Схемы выдавливания полых поковок: а − прямое, б − обратное, в − прямое с активными силами трения, г − обратное с активными силами трения, д − схема комбинированного выдавливания с маркетом, е − схема обратного выдавливания со свободно плавающей матрицей; *1* − пуансон; *2* − матрица; *3* − контрпуансон.

Наиболее простой в реализации является схема выдавливания, предложенная С.Ш. Яшаевым. По его схеме (рис. 28.1д) возникновение сил трения полезного действия обеспечивается одновременным движением пуансона и маркета в сторону, противоположную течению металла. Необходимым условием для реализации этой схемы является превышение движущимся пуансоном скорости маркета. Им и рядом других исследователей установлено снижение неоднородности течения металла и уменьшение потребного усилия процесса на 33-37%, по сравнению с обратным выдавливанием.

А.Г. Овчинниковым и Н.А. Макиной исследовано обратное выдавливание с применением незакрепленной матрицы (рис. 28.1е). Они установили возможность появления на нижней наружной поверхности заготовки сил трения активного действия, позволяющих снизить деформирующее усилие на 6-10% по сравнению с обратным выдавливанием, а также в зависимости от скорости движения матрицы, от коэффициента трения, механических свойств материала, усилия выдавливания как функции степени деформации, высоты заготовки и толщины дна поковки.

Каждой из приведенных на рис. 28.1 схем выдавливания свойственен свой характер течения металла.

В зависимости от характера течения металла проработка структуры металла по объему выдавливаемого изделия будет отличаться. Оценку степени проработки структуры в донной части изделия можно проводить по характеру искажения координатных сеток на образцах.

Так, в случае активного действия сил трения периферийный поток металла, воздействуя на упругую область, обжимает ее, что позволяет получать полые поковки с дном и стенками меньшей толщины.

Изучение закономерностей определения полного усилия выдавливания осуществляется путем регистрации показаний давления на главном цилиндре по манометрическому датчику (согласно методике, описанной в лабораторной работе 5).

28.3. ОБОРУДОВАНИЕ, ИНСТРУМЕНТ, ОБРАЗЦЫ

Данная работа проводится на гидравлическом прессе модели В3228В усилием 0,63 МН на разъемных образцах диаметром 30 мм и высотой 30-60 мм с нанесенной координатной сеткой по оси в виде окружностей диаметром 3 мм. В качестве материала выбирается алюминий, свинец или другой материал.

В работе будут изучаться схемы прямого (рис. 28.1а), обратного выдавливания (рис. 28.1б), с маркетом (рис. 28.1д) и со свободно плавающей матрицей (рис. 28.1е).

Схема инструментальной наладки приведена на рис. 28.2.

Установка состоит из инструмента, вспомогательных средств и электрической аппаратуры для записи силовых параметров и перемещений инструмента.

Инструмент состоит из пуансона *1*, матрицы *2*, заглушки *3* и контрпуансона *4*.

28.4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ И УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

1. На бригаду из 2-3 студентов выдаются индивидуальное задание и четыре образца с координатной сеткой.

Индивидуальное задание выбирается при варьировании двух параметров: высоты заготовки и диаметра пуансона (задается преподавателем, проводящим занятие).

2. Изучить инструкцию по работе на гидравлическом прессе, сборку и разборку инструментальной оснастки.

3. Подготовить образцы и оснастку к эксперименту: обезжирить их и нанести разделительный слой на диаметральную плоскость.

4. Собрать инструментальную наладку согласно схемам выдавливания и последовательно отштамповать изделия по всем четырем схемам, регистрируя самописцем изменение усилия в процессе деформации.

5. Разобрать инструмент, освободить пуансон и матрицу от изделия, подготовить инструмент к следующему выдавливанию.

28.5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На инструментальном микроскопе провести замеры деформированных окружностей координатной сетки по оси выдавливания и рассчитать интенсивности деформации согласно методике работы.

Используя правило трапеции, определить величину затраченной энергии для каждого способа выдавливания (согласно методике лабораторной работы 6).

Данные замеров деформированной сетки внести в таблицу 28.1.

По результатам расшифровки построить графики зависимостей $P=f(H_т/H_o)$, $\varepsilon_i=f(h_т/h_o)$ и *E=f(способа выдавливания)*, где h_o − толщина дна стакана, $h_т$ − текущая толщина дна.

Таблица 28.1

Исходные данные для расчета интенсивности деформации по оси выдавливания

Способ выдавливания	База сетки, мм	Отсчет по нониусу для «а», мм		Отсчет по нониусу для «b», мм		Главные компоненты деформации		Интенсивность деформации $\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}}\sqrt{\varepsilon_1^2+\varepsilon_2^2+\varepsilon_1\varepsilon_2}$
		исходные	конечные	исходные	конечные	$\varepsilon_1 = \ln\frac{a_i}{a_o}$	$\varepsilon_2 = \ln\frac{b_i}{b_o}$	
Прямое								
Обратное								
Обратное со смещением маркета								
Со свободно плавающей матрицей								

28.6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Конспект теоретической части работы.

2. Таблицы, содержащие результаты замеров делительной сетки.

3. Графические зависимости $P=f(H_т/H_o)$, $\varepsilon_i=f(h_т/h_o)$ и $E=f$ *(способа выдавливания)*

4. Выводы, содержащие:

а) констатирующую часть (что получено);

б) теоретическое объяснение закономерностей по изменению усилий при прямом, обратном, обратном с маркетом и свободно плавающей матрицей.

28.7. ЛИТЕРАТУРА

Охрименко Я.М, Технология кузнечно-штамповочного производства. − М.: Машиностроение, 1976. − С.283-300.

28.8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите область применения холодного выдавливания.
2. Перечислите схемы выдавливания и объясните закономерности изменения усилия для каждой схемы.
3. Как определяется интенсивность деформации и главные компоненты при использовании круглой делительной сетки?
4. Какой процесс выдавливания наименее энергоемкий и чем объяснить снижение энергозатрат?
5. Как определяется затрачиваемая энергия при выдавливании?
6. Какое оборудование можно использовать для реализации рассмотренных схем выдавливания?

Лабораторная работа 29

ВЫРУБКА И ПРОБИВКА РЕЗИНОЙ

(2 часа)

29.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование влияния величины диаметра вырубаемого изделия или пробиваемого отверстия, а также величины припуска на удельное усилие вырубки и пробивки резиной.

29.2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Вырубка и пробивка «жестким» инструментом, широко применяемые в крупносерийном и массовом производстве, экономически малоэффективны в мелкосерийном производстве, что связано с большими затратами на изготовление штампов и их переналадку.

С целью упрощения конструкции штампов, повышения их универсальности, снижения затрат на их изготовление применяют штамповку жидкой, эластичной или пластичной средами. В частности, значительное распространение получила штамповка резиной. Резина в качестве одного из элементов инструмента пуансона или матрицы используется при вырубке, пробивке, гибке, формовке, раздаче, обжиме, вытяжке.

Штамповка резиной эффективна при изготовлении деталей средних и крупных размеров из относительно тонких материалов (толщиной до 2 мм). В крупносерийном и массовом производстве штамповка резиной применяется для получения небольших деталей из очень тонких материалов (фольга толщиной 0,01-0,005 мм).

Вырубка - пробивка осуществляется на гидравлических прессах, мелкие детали получают на кривошипных и фрикционных прессах.
Штамп для вырубки-пробивки состоит из шаблона *3* (рис. 29.1, 29.2), который выполняет роль либо пуансона при вырубке (рис. 29.1), либо матрицы при пробивке (рис. 29.2); резиновой подушки *1*, передающей давление от ползуна пресса. Шаблон установлен на подштамповой плате *4*, заготовка *5* уложена на шаблоне *3*. Размер вырубаемой детали или пробиваемого отверстия определяется наружным (см. рис. 29.1) или внутренним (см. рис. 29.2) диаметром шаблона.

При открытом (свободном) способе штамповки (см. рис. 29.1а) резина 1 может деформироваться в вертикальном направлении и не ограничена в горизонтальном, т.е. может свободно уширяться. При закрытом (см. рис. 29.1б) − резина *1* ограничена от уширения в горизонтальном направления стенками контейнера *2*. При закрытом способе при одном и том же сжатии резина может быть получено большее давление, чем при свободном состоянии резины, поэтому закрытый способ штамповки является более совершенным.

Процесс вырубки протекает следующим образом (рис. 29.3): исходное положение (I), при перемещении ползуна вниз резиновая подушка сжимается и отгибается вниз до соприкосновения с подштамповой плитой часть материала, которая не прижата к шаблону (II). При дальнейшем сжатии резина натягивает защемленный между шаблоном и подштамповой плитой металл (III, IV) и отрывает его от заготовки (V). Ширина припуска зависит от высоты шаблона *h*, а высота шаблона − от толщины материала.

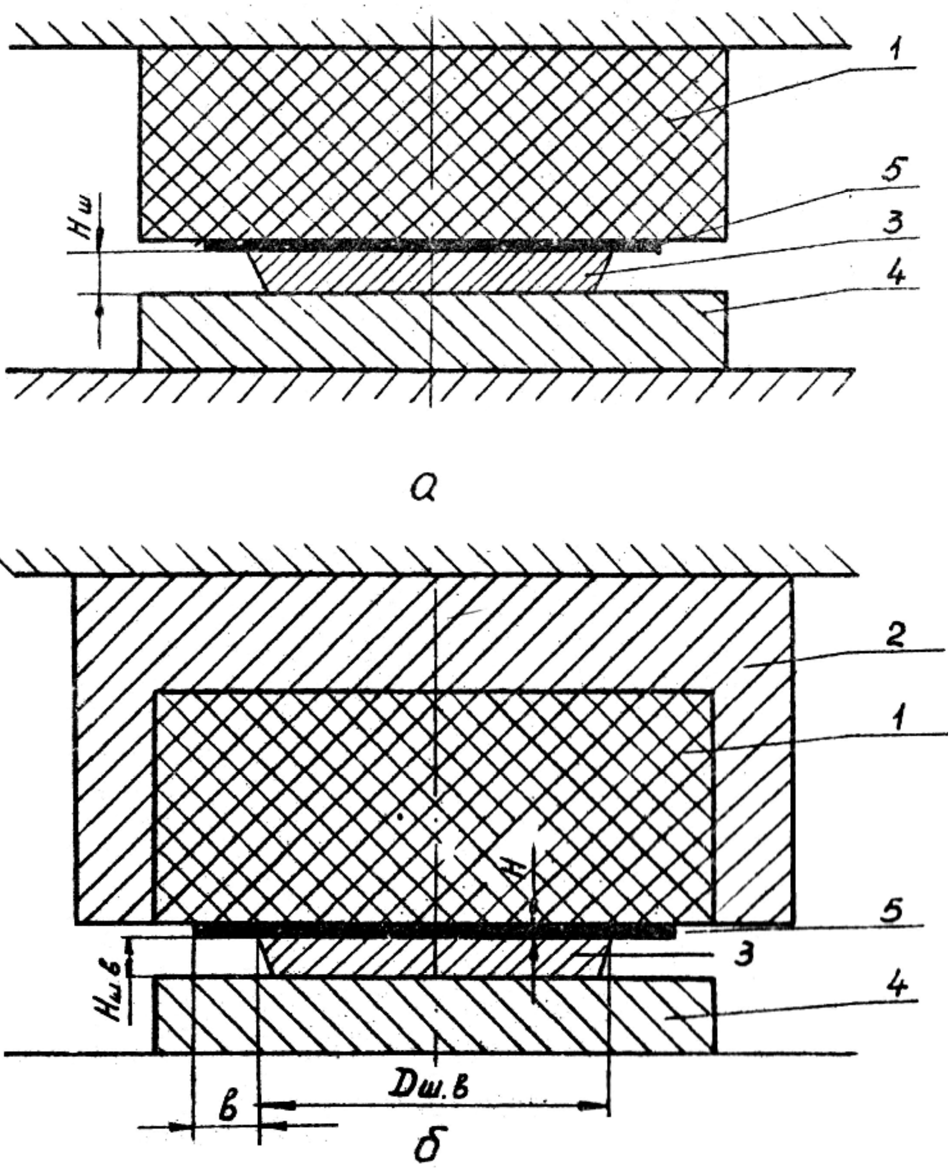


Рис. 29.1. Схема открытой (а) и закрытой (б) вырубки.

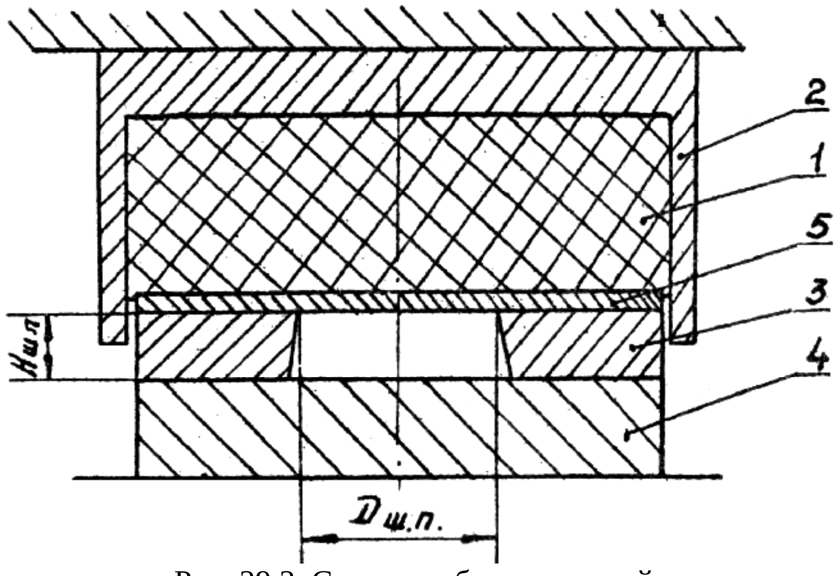


Рис. 29.2. Схема пробивки резиной.

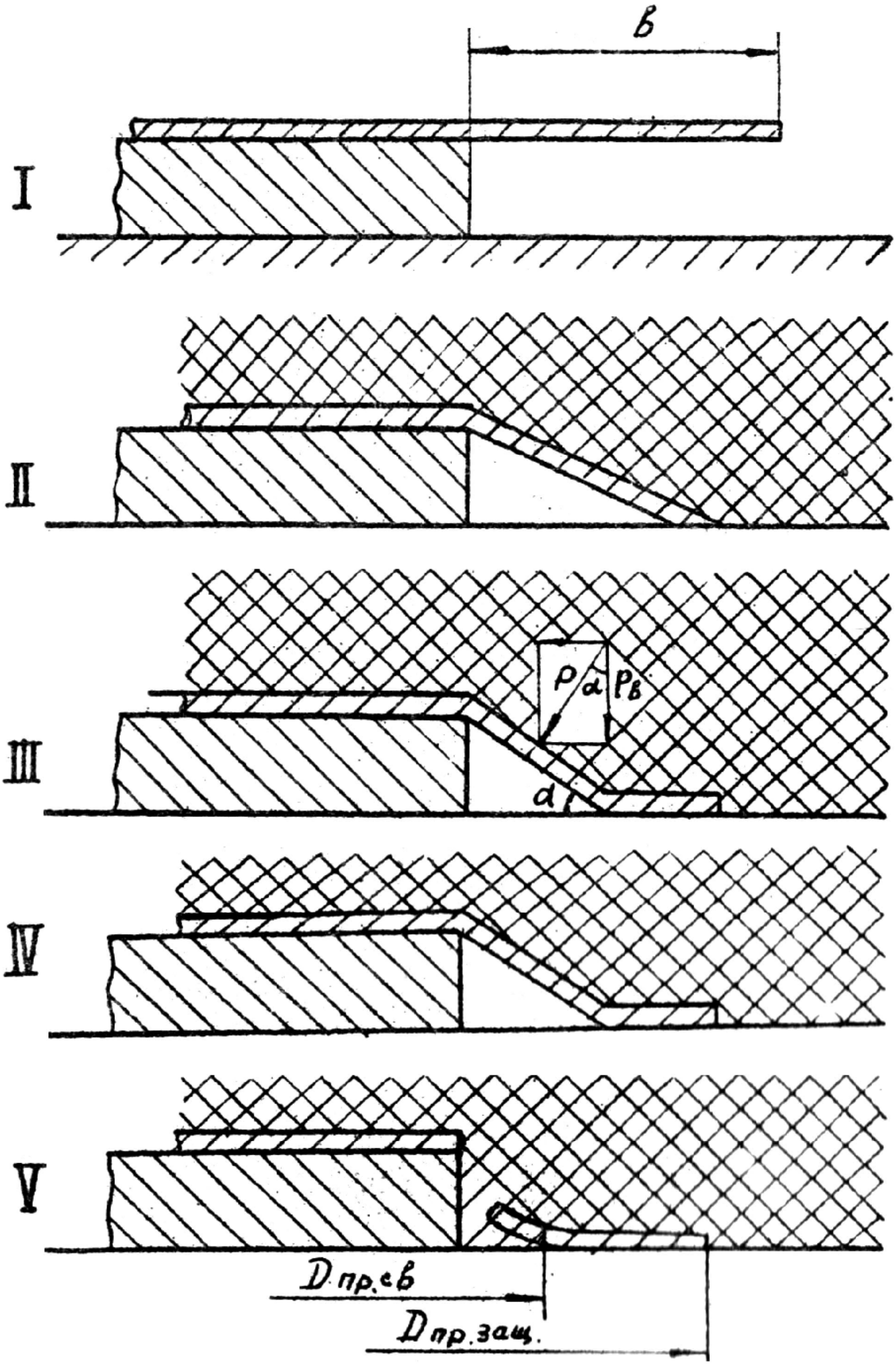


Рис. 29.3. Схема вырубки резиной.

Высота шаблона составляет 6-13 мм, толщина резиновой подушки должна превышать толщину шаблона в 4-5 раз. По всей режущей кромке шаблона предусматривают обычно цилиндрический поясок высотой 1 мм, который затем переходит в конус с углом 8-12°, чтобы облегчить снимание отходов после вырезки.

Наличие припуска определенной величины при вырубке приводит к повышенному расходу металла. Для уменьшения припусков при вырубке резиной применяют различные способы: на подштамповую плиту устанавливают несколько вырубных шаблонов, выполняют рифление подштамповой плиты, на расстоянии 10-12 мм от шаблона приваривают выступ, на котором защемляется край припуска.

Требуемое усилие при вырубке резиной определяется исходя из поверхности резины и ее давления. Длина контура вырубки в данном случае существенного значения не имеет, так как усилие сжатия резины значительно превышает усилие вырубки, затрата большей части энергии на сжатие резины является недостатком процесса, наименьшие размеры вырубаемых круглых отверстий зависят от прочности, толщины материала и давления резины.

Требуемое усилие вырубки определяется по формуле:

$$P=F\cdot q,$$

где F − площадь резины в м^2 (см^2);

q − давление резины, необходимое для вырубки кПа, (кгс/см^2). (1кгс/см^2 = 9,80655·10^{-2} МПа ≈ 0,1 МПа)

Наименьшее давление, необходимое для вырубки деталей из отожженного дюралюминия толщиной 0,6-1,2 мм, находится в пределах 70-130 кгс/см^2 (7-13 мПа).

Удельное усилие, развиваемое резиной, зависит от степени сжатия и величины припуска (рис. 29.4). Оно будет различным в зависимости от того, находится резина в свободном состоянии или заключена в контейнер.

Одно и то же удельное усилие с применением замкнутой резины достигается при меньшей величине деформации, чем с применением свободной резины. Наибольший срок службы резины имеет место при степени сжатия в контейнере до 20-25% и в свободном состоянии до 40%.

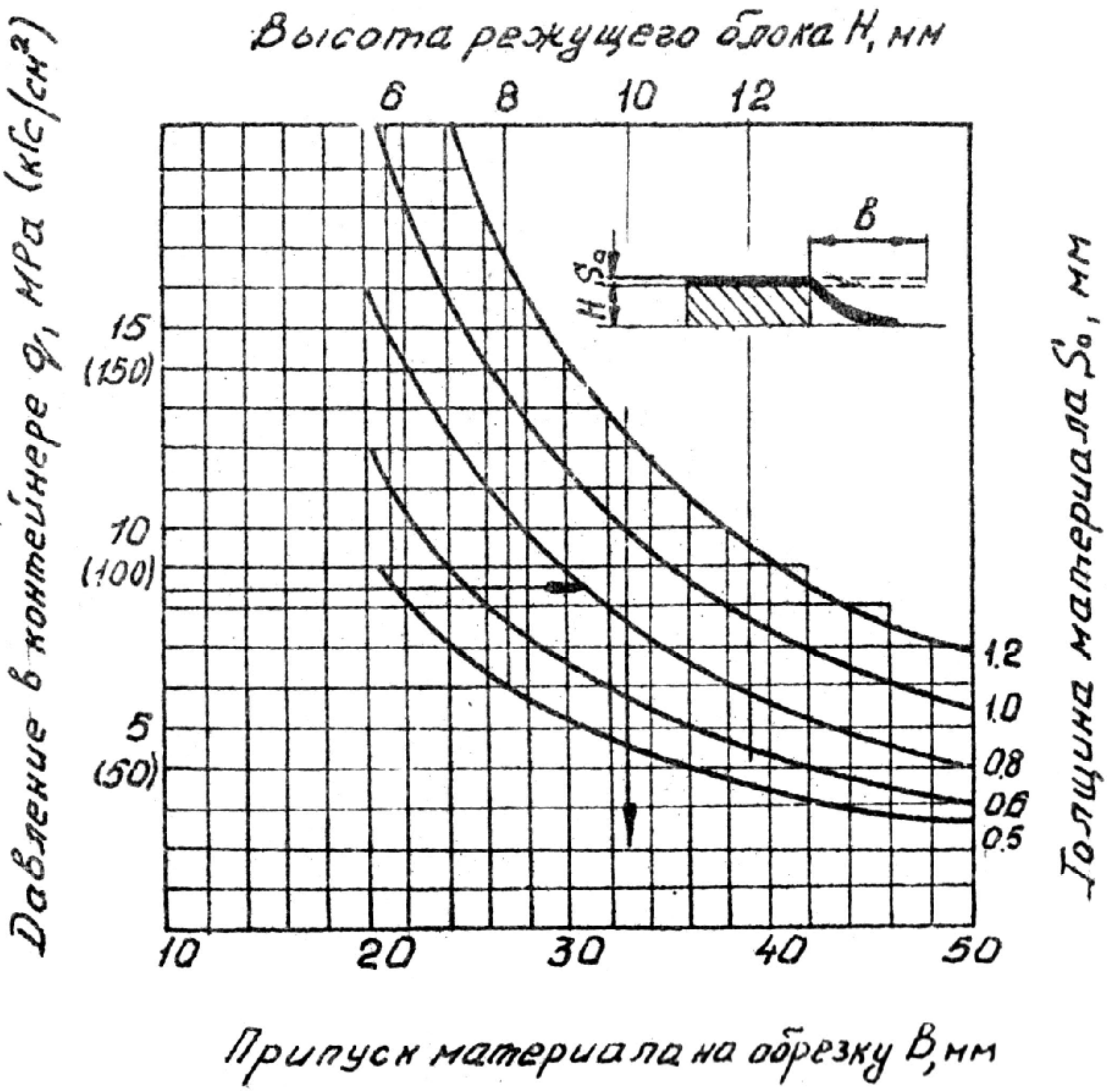


Рис. 29.4. Номограмма определения параметров вырубки резиной в зависимости от толщины материала.

29.3. ОБОРУДОВАНИЕ, ИНСТРУМЕНТ, МАТЕРИАЛЫ

Работа выполняется на гидравлическом прессе усилием 400 кН (40 тс). Штамп состоит из контейнера с внутренним диаметром Дк.в.=50 мм, резиновой подушки, уложенной на дно контейнера, пуансона, через который передается усилие от ползуна пресса, и набора шаблонов.

Для вырубки используются шаблоны Дт.в.=10, 15, 20 и 25 мм. Для пробивки − кольцевые шаблоны с диаметром отверстия Дш.п.= 10, 15, 20 и 25 мм.

Заготовки изготовлены из алюминиевого сплава и стали диаметром 49,5±0,1 мм и толщиной 0,5-0,8 мм.

Усилие фиксируется с помощью аппаратуры для записи диаграммы «усилия-ход ползуна» или по манометру.

Измерительный инструмент − штангенциркуль.

29.4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ И УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

1. Ознакомиться с конструкцией штампа.
2. Составить план эксперимента.
3. Измерить штангенциркулем размеры шаблонов для вырубки и пробивки. Занести данные в таблицы 29.1 и 29.2.
4. Измерить размеры заготовок (диаметр и толщину); занести данные в таблицы.
5. Произвести сборку штампа вместе с заготовкой. С учетом конусности боковой поверхности шаблонов необходимо, чтобы заготовка прилегала к шаблону рабочей поверхностью.
6. Установить штамп в сборе с заготовкой и одним из шаблонов на пресс. Проверить соосность штампа и пресса. Закрыть защитную дверцу пресса.
7. Включить аппаратуру для записи усилия по ходу ползуна (осциллограф и усилитель, самописец и усилитель).
8. Включить электропривод пресса. В процессе нагружения наблюдать изменение усилия по индикаторной диаграмме или по манометру. Зафиксировать максимальную нагрузку. Занести величину максимального усилия в таблицы.
9. По окончании процесса вырубки или пробивки поднять ползун, выключить привод, установить между столом и ползуном распорку, вынуть штамп, разобрать его, вынуть заготовку.
10. Повторить эксперимент с новой заготовкой и новым шаблоном.
11. Правила техники безопасности.

29.5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Вычислить удельное усилие на резине для каждого эксперимента

$$q = \frac{P_{\max}}{F}, \qquad \text{(мПа)};$$

где F − площадь поперечного сечения резиновой подушки ($F = \pi D_k^2 / 4$).

2. Вычислить величину припуска ($в$) Для вырубки $в = \frac{1}{2}(Д_{заг.} - Д_{ш.в.})$.

3. Построить график зависимости $q=f\,(B)$.

4. Вычислить площадь припуска $F^o_{пр}$ до деформации

$$F_{пр} = \frac{\pi D^2_{заг}}{4} - \frac{\pi D^2_{шв}}{4} = 0{,}785(D^2_{заг} - D^2_{шв}).$$

5. Вычислить площадь проекции припуска после вырубки $F^2_{пр.}$ и вычислить ее составляющие: площадь защемленной части $F_{пр}$ и площадь проекции свободной части $F_{пр.своб.}$.

6. Построить графики зависимости $q=f(F_{пр.своб.})$.

7. Вычислить площади пробиваемых отверстий $F_{ОТВ}$ и длину их периметра ln.

8. Построить графики зависимости удельного усилия пробивки от площади пробиваемого отверстия $q=f(F_{отв})$; $q=f(ln)$.

9. Определить уравнения кривых.

10. Проанализировать полученные результаты.

29.6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Конспект теоретической части, схема процесса вырубки-пробивки.

2. План эксперимента, таблица с исходными и экспериментально полученными данными, результаты вычислений.

3. Графические зависимости: $q=f(в)$; $q=f(F_{пр.св.})$; $q=f(F_{отв})$; $q=f(ln)$.

4. Уравнение кривых.

5. Выводы о влиянии геометрических параметров вырубки, пробивки резиной на удельное усилие.

29.7. ЛИТЕРАТУРА

1. Зубцов М.Е. Листовая штамповка. − М.: Машиностроение, 1980. − 432 с: с ил.

2. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. − Л.: Машиностроение, 1979.

3. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. − М.: Мир, 1972.

29.8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие преимущества имеет штамповка резиной?
2. Область применения штамповки резиной.
3. Недостатки штамповки резиной.
4. Какие операции выполняют при штамповке резиной?
5. От чего зависит усилие вырубки, пробивки?
6. Какое значение имеет припуск при вырубке резиной?
7. Как можно уменьшить припуск при вырубке резиной?
8. Какое преимущество имеет закрытый способ вырубки по сравнению с открытым?
9. Назовите составляющие, на которые расходуется энергия при вырубке-пробивке резиной.
10. Каково качество заготовки после вырубки или пробивки?

Таблица 29.1

Исходные данные, результаты эксперимента и результаты вычислений при вырубке

№ пп	Марка материала заготовки	Размеры заготовки		Площадь контейнера $F_{конт.}$	Размеры шаблона			Максимальное усилие вырубки (P)		Ширина припуска, мм			Диаметр припуска после деформации		Удельные усилия	Площадь припуска			
		$Д_{заг}$ мм	$H_{заг}$ мм		$Д_{ш.в.}$ мм	$F_{ш.в}$ мм	$H_{ш.в}$ мм			до	после деформации					до	после деформации		
								кгс	Н	$в = \frac{D_{дал} - D_{ств}}{2}$	$B_{пр.ж.защ.}$	$B_{пр.св.}$	$D_{пр.заг.}$	$D_{пр.св.}$	$q = \frac{P}{F_k}$ МПа	$F_{про}$ мм^2	$F_{прк}$ мм^2	$F_{пр.св.}$ мм^2	$F_{пр.з.}$ мм^2

Таблица 29.2

Исходные данные, результаты эксперимента и результаты вычислений при пробивке

№ пп	Марка материала заготовки	Размеры заготовки[x]		Площадь контейнера		Размеры шаблона		Максимальное усилие проб. P			Удельное усилие
		D мм	H заг. мм	F_k мм^2	$D_{ш.п.}$ мм	$F_{ст}$ мм^2	$H_{ш.п.}$ мм	кгс	Н	мм	

[x/] Для повышения точности измерения в двух взаимоперпендикулярных направлениях и вычислять среднеарифметическую величину

Лабораторная работа 30

ВЫТЯЖКА С ЖЕСТКИМ И ПРУЖИННЫМ ПРИЖИМОМ

(2 часа)

30.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение процесса вытяжки цилиндрических изделий на первом переходе; определение влияния способа прижима и усилия прижима на величину усилия вытяжки.

30.2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Вытяжка без утонения не первом переходе (свертка) − это процесс превращения плоской листовой заготовки в полую деталь цилиндрической, прямоугольной или другой какой-либо формы.

Для вытяжки (рис. 30.1) цилиндрического изделия (стакана) берется плоская заготовка диаметром D_3 и толщиной S_o. Вытяжка проходит без утонения, если $Z = \frac{d_m - d_n}{2} \succ S_o$.

В кольцевой части заготовки, находящейся вне действия пуансона, действуют интенсивные тангенциальные напряжения сжатия (σ_t) и радиальные напряжения растяжения (σ_z). Первые максимальны на периферии заготовки (во фланце), вторые − вблизи дна стакана.

Вследствие действия сжимающих напряжений (σ_t) при больших деформациях ($\frac{D_3}{d}$) и относительно малой толщине заготовки ($\frac{S}{D_3}$) во фланце теряется устойчивость и образуются складки. Для предотвращения образования складок применяют прижим фланца, иди складкодержатель.

Вытяжку можно осуществлять без прижима, если относительная толщина заготовки достаточно велика ($\frac{S_o}{D_{заг}} \cdot 100 \geq 2$ или $D_{заг} - d \leq 18 \cdot S_o$). Но основным способом вытяжки является вытяжка с прижимом. С применением прижима можно увеличить допустимую степень деформации за один переход, избежав образования складок. Однако с применением прижима увеличивается сопротивление трения перемещению заготовки на границах матрица-заготовка, прижим-заготовка. Это приводит к возрастанию растягивающих напряжений в опасном сечении и возникает опасность отрыва дна стакана.

Таким образом, при отсутствии прижима или недостаточной силе прижима при вытяжке могут образовываться складки, при значительной силе прижима происходит разрыв заготовки.

Величина усилия прижима рассчитывается по формуле:

$$Q = \frac{\pi}{4}\left[D_{заг}^2 - \left(d_1 + 2r_m\right)^2\right] \cdot q \text{ (кгс) (9,8 Н)}, \qquad (30.1)$$

где $D_{заг}$ − диаметр заготовки, мм;

d_1 − диаметр изделия, мм;
r_m − радиус округления рабочей кромки матрицы, мм;
q − удельное усилие Прижима, МПа (табл. 30.1).

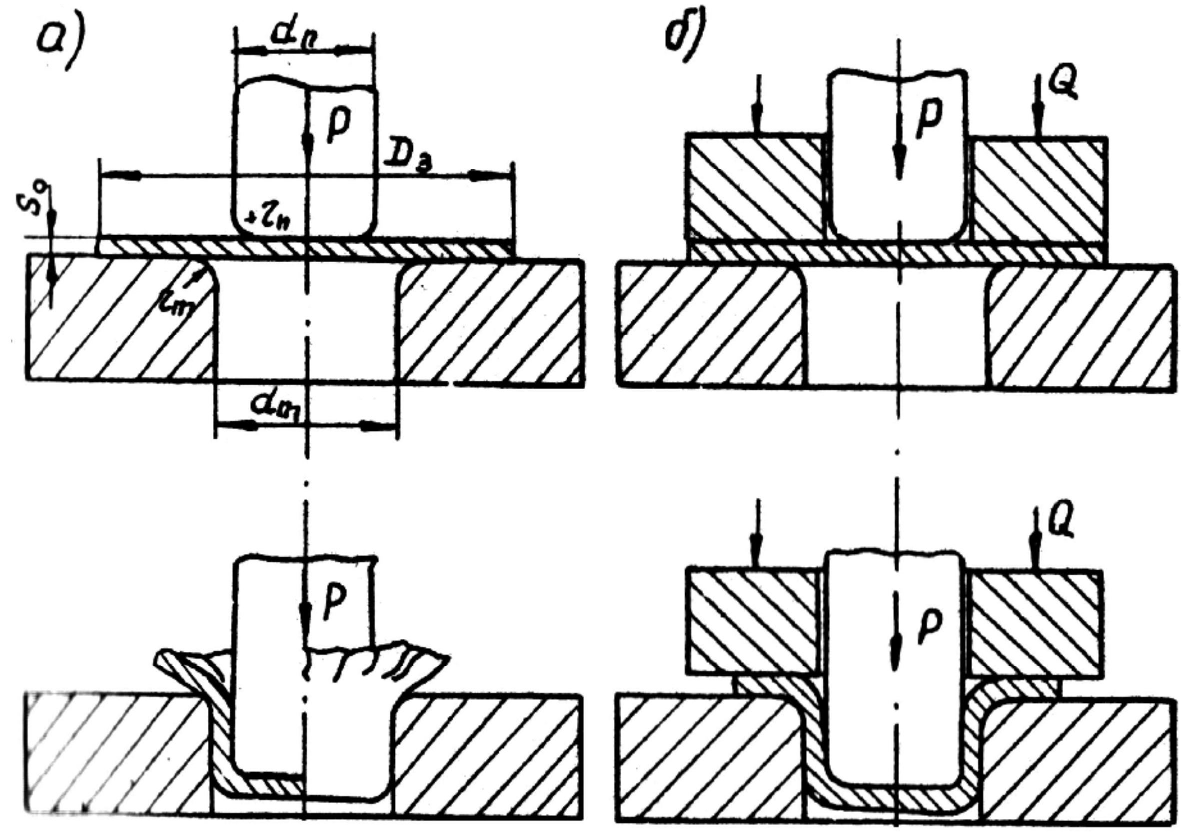


Рис. 30.1. Схема вытяжки без прижима (а) и с прижимом (б).

Прижим заготовки можно осуществлять гидравликой, пружинами. Существует способ вытяжки с помощью так называемого жесткого прижима. Жесткий прижим крепится к матрице (рис. 30.2 а, б) и препятствует образованию складок путем поддержания определенного зазора между прижимом и матрицей. Зазор должен обеспечивать разглаживание складок, не зажимая заготовку. Величина зазора зависит от характеристик материала заготовки, ее толщины, степени деформации. Величина усилия прижима влияет на усилие вытяжки (рис. 30.3). Недостаточное усилие прижима приводит к вторичному подъему усилия вытяжки вследствие дополнительного сопротивления, возникающего при распрямлении образовавшихся складок при прохождении их между пуансоном и матрицей. По мере увеличения усилия прижима вторичный максимум исчезает. Дальнейшее увеличение силы прижима заготовки приводит к увеличению максимума усилия вытяжки и может привести к обрыву дна стакана.

Таблица 30.1

Удельное усилие прижима заготовки (*q*)

Материал	q, МПа
Алюминий АД, АД1	0,8-1,0
Дуралюмин Д16 А-М	1,0-1,2
Дуралюмин Д16 А-Т, В95А-1	1,4-1,8
Алюминиевый сплав АМuМ и медь	1,2-1,5
Латунь Л63, Л68	1,5-2,0
Сталь для глубокой вытяжки: S>0,5 S<0,5	 2,0-2,5 2,5-3,0
Аустенитные стали	3,0-4,5

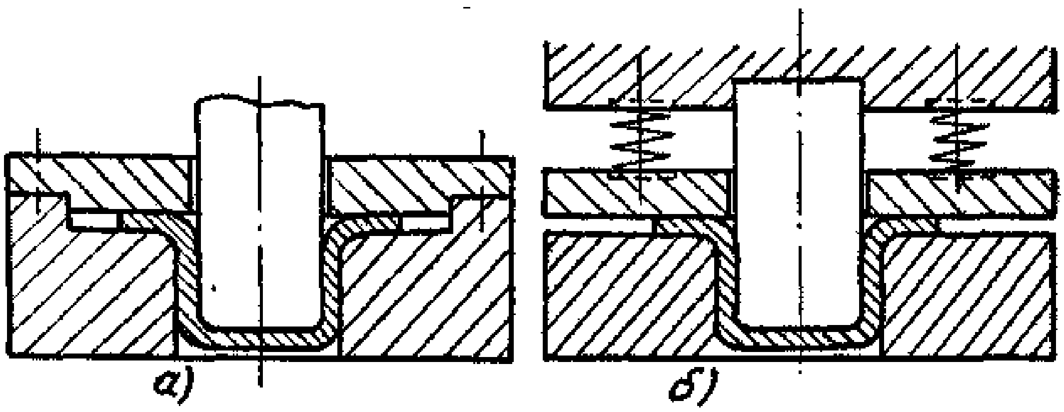


Рис. 30.2. Схема вытяжки с жестким (а) и прижимным (б) прижимом.

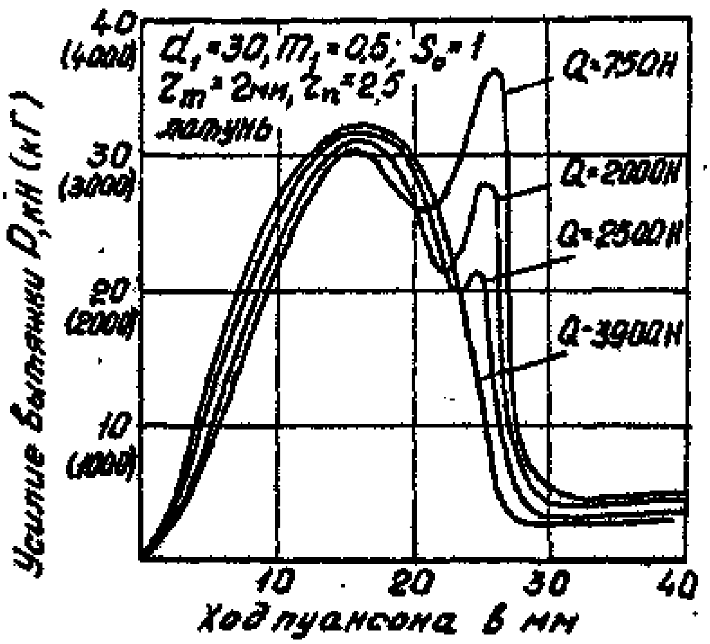


Рис. 30.3. Влияние усилия прижима на усилие вытяжки *P*.

30.3. ОБОРУДОВАНИЕ, ПРИБОРЫ, ИНСТРУМЕНТ, МАТЕРИАЛЫ

Вытяжка проводится на гидравлической испытательной машине усилием 50 кН, оснащенной аппаратурой для записи диаграммы «усилие – рабочий ход».

Штамп для вытяжки (рис. 30.4 а) позволяет осуществлять вытяжку стаканчиков с жестким (правая часть) и пружинным прижимом (левая часть).

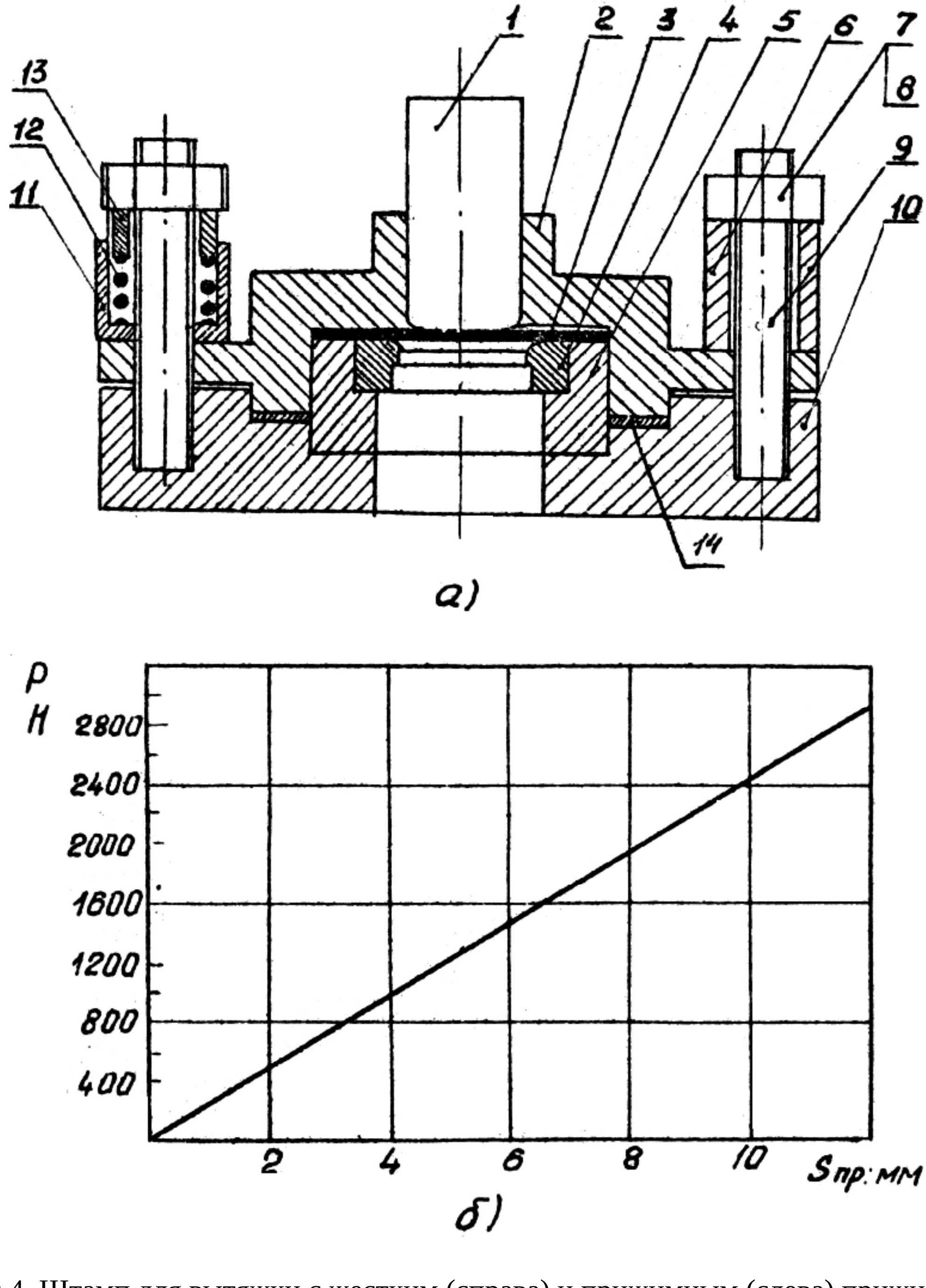


Рис. 30.4. Штамп для вытяжки с жестким (справа) и прижимным (слева) прижимом заготовки (а) и тарировочный график сжатия пружин (б).

Пуансон *1* направляется складкодержателем *2*, который является и прижимом. Жесткий прижим заготовки *3* через втулку 6 производится путем затяжки гаек *7, 8*, шпилек *9*, ввинченных в основание *10* штампа. Необходимый зазор между матрицей *4*, установленной в обойме *5*, и складкодержателем *2* поддерживается прокладками *14*, устанавливаемыми под прижим.

При вытяжке с пружинным складкодержателем (левая часть рис. 30.4 а) гайки *7*, *8* через кольцо *13* прижимают заготовку к матрице пружинами 12, установленными в обойме *11*. Путем изменения затяжки пружин можно изменять силу прижима в соответствии с тарировочным графиком (рис. 30.4 б).

Заготовки для вытяжки – круглые: ∅50 мм, толщиной 1+1,5 мм, из одного из следующих материалов: сталь, медь, латунь, алюминий.

Измерительный инструмент – штангенциркуль, радиусомер.

30.4 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ И УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Половина группы, выполняющей работу, делится на две бригады по 3-4 человека. Каждая бригада выполняет работу на одном из материалов с различной толщиной заготовки.

1. Ознакомиться с конструкцией штампа, его сборкой и разборкой.
2. Составить план эксперимента.
3. Измерить диаметр и толщину заготовок, диаметры пуансона и матрицы, радиусы округления пуансона и матрицы.

Подобрать и измерить толщины прокладок для вытяжки с жестким прижимом.

4. Произвести вытяжку без прижима.
5. Произвести вытяжку с жестким прижимом с толщиной прокладки, равной толщине материала. Далее последовательно произвести вытяжку с увеличением толщины прокладки на 0,1 мм. Оценить качество стаканчиков. Определить оптимальный зазор, т.е. такой, при котором получается стаканчик без складок и обрывов.
6. Произвести вытяжку с пружинным прижимом. В плане эксперимента предусмотреть определение оптимального усилия прижима при минимальном количестве экспериментов.

Необходимо соблюдать следующее:

1) установку штампа в собранном виде снятие его с испытательной машины производить при поднятой и зафиксированной траверсе и выключенном двигателе;

2) во избежание падения штампа на пол сборку и разборку штампа, укладку заготовки и изъятие изделия производить на отдельном столе.

30.5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Результаты эксперимента свести в табл. 30.2.
2. Построить графики зависимости текущего усилия P_i по ходу пуансона h_i для разных толщин прокладок и для разных усилий прижима $P_i=f(h_i;\ h_{пр})$; $P_i=\varphi(h_i;\ P_{пр})$.
3. Определить величины оптимального усилия прижима или зазора жесткого прижима.
4. Вычислить величину усилия прижима по формуле (30.1), а также используя данные таблицы 30.2.
5. Сравнить вычисленное значение с экспериментальным.
6. Проанализировать полученные результаты.

Таблица 30.2

Исходные данные и результаты эксперимента

Марка материала заготовки	Толщина заготовки S_o, мм	Диаметр заготовки $D_{заг}$, мм	Относительная толщина заготовки $\frac{S_o}{D_{заг}} \cdot 100$	Толщина прокладки или усилие прижима $P_{пр}$, Н	Ход пуансона h_i, мм	Усилие вытяжки P_i, Н	Примечание
							Коэффициент вытяжки $M = d_m / D_{заг}$ Диаметр матрицы d_m= Диаметр пуансона d_n= Радиус округления матрицы r_m= Радиус округления пуансона r_n= Смазка –

30.6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Конспект теоретической части, схема процесса вытяжки, схема инструмента.
2. Методика эксперимента с таблицей исходных и полученных экспериментально данных, результаты вычислений.
3. Графический материал: $P_i=f(h_i;\ h_{прот})$; $P_i=\varphi(h_i;\ P_{приж})$.
4. Выводы о влиянии зазора между матрицей и жестким прижимом, усилия пружинного прижима на величину и характер изменения текущей и максимальной вытяжки и на качество детали.

30.7. ЛИТЕРАТУРА

1. Зубцов М.Е. Листовая штамповка. − Л.: Машиностроение, 1980. - 432 с.: с ил.
2. Охрименко Я.М. и др. Лабораторный практикум по курсу "Технология кузнечно-штамповочного производства и прессования", Ч.П. − М.: МИСиС, 1973.

30.8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Действие каких напряжений приводит к гофрообразованию?
2. В каком месте возможно разрушение заготовки при вытяжке?
3. Какими способами уменьшают вероятность гофрообразования?
4. Как влияет прижим на условия вытяжки?

5. Как зависит усилие вытяжки от усилия прижима?
6. От чего зависит величина усилия прижима?
7. Влияет ли толщина материала на величину усилия прижима?
8. Как влияют механические свойства материала на величину усилия прижима?
9. Вследствие чего возникает вторичный максимум усилия вытяжки?
10. Каковы требования к жесткому прижиму?

Лабораторная работа 31

ИСПЫТАНИЯ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ГЛУБОКУЮ ВЫТЯЖКУ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

(2 часа)

31.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение методики технологических испытаний листовых материалов; получение практических навыков по проведению активного эксперимента в лабораторных условиях; получение навыков работы на машине типа ЦНИИТМАШ.

31.2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Способность сплавов деформироваться без разрушения зависит от схемы напряженно-деформированного состояния при обработке. Для выявления способности листового материала подвергаться деформациям, аналогичным тем, которые металл претерпевает при штамповке, применяют технологические испытания.

При глубокой вытяжке симметричных деталей типа стаканов в вытяжном штампе формообразование происходит за счет уменьшения диаметра заготовки, на фланце действуют радиальные растягивающие напряжения, тангенциальные сжимающие и осевые сжимающие (если есть прижим). В вертикальных стенках стакана преобладает одноосное растяжение.

Разрушение стакана при глубокой вытяжке происходит всегда по линии сопряжения дна и стенки стакана. Обрыв дна обусловлен превышением максимального усилия, необходимого для вытяжки фланца (Р), над усилием, которое выдерживает данный материал, соприкасающийся с кромкой пуансона, поэтому для получения целостного изделия необходимо удовлетворение условия:

$$P < P_q, \qquad (31.1)$$

где P_q – усилие обрыва дна стакана.

Во время технологических испытаний конкретного листового материала требуется найти путем эксперимента:

$$P_q = ?$$

$$P = f(m, g, s, \ldots), \qquad (31.2)$$

где m − коэффициент вытяжки, $m = d/D$, D – диаметр заготовки;

d − внутренний диаметр стакана;

q − напряжение прижима фланца, равное

$$q = P_{пж}/F_ф;$$

где $F_ф = \frac{\pi}{4}\left[D^2 - (d + 2r_m)^2\right]$ - площадь фланца;

r_m − радиус округления матрицы;

S − тип и (или) способ смазки заготовки или инструмента.

Экспериментально установлено, что усилие обрыва дна P_q, не зависит от указанных в (31.2) условий вытяжки, т.е. факторов (объясните почему?).

Аналитическая зависимость (31.2) может быть найдена с использованием методов математического планирования эксперимента (см. раздел 31.4).

Из зависимости $P=f(m, g, s)$ можно найти в явном виде относительно m:

$$M=\varphi(P, g, s) \tag{31.3}$$

Поставив в уравнение (31.3) значение максимально допустимого усилия, равного усилию обрыва дна P_q, определяют искомую зависимость критического коэффициента вытяжки m^* от технологических условий процесса вытяжки:

$$m^*=\varphi(P_g, g, S) \tag{31.4}$$

31.3. ОБОРУДОВАНИЕ, ПРИБОРЫ, ИНСТРУМЕНТ, МАТЕРИАЛЫ

1. Испытательная машина ЦНИИТМАШ усилием на приводе пуансона 0,17 мН (17 тс) (рис. 31.1).

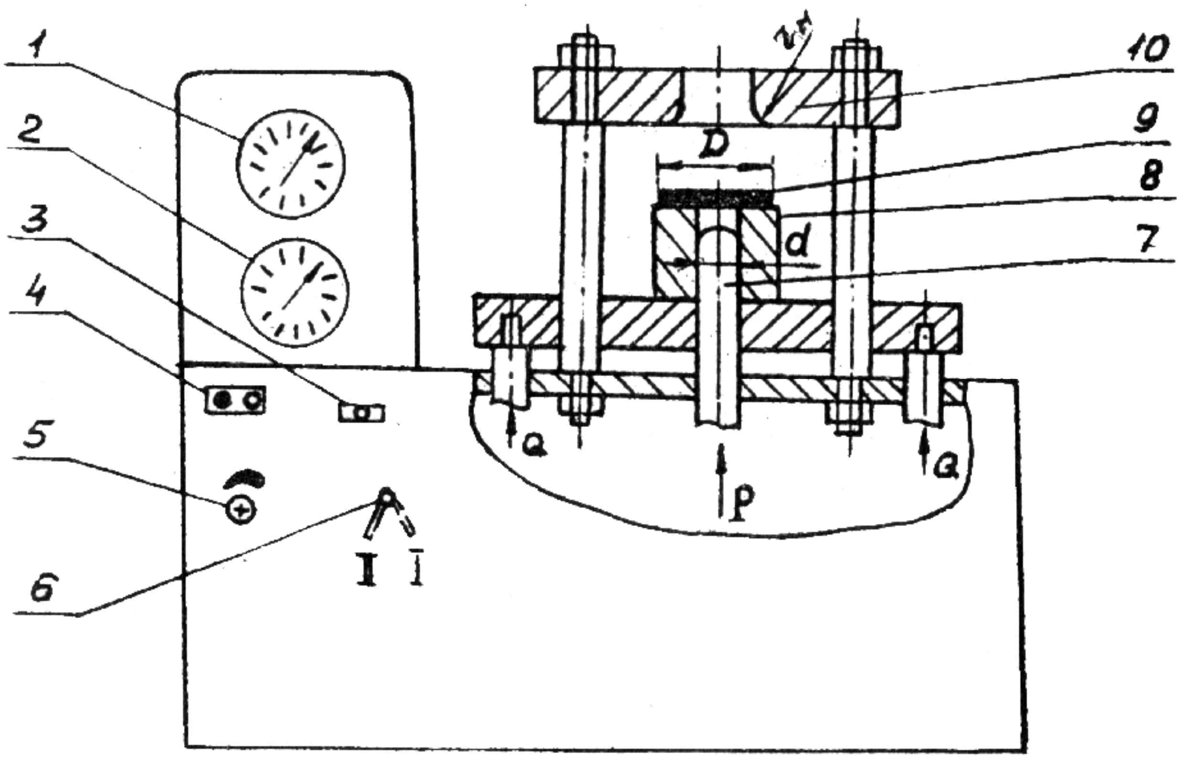


Рис. 31.1. Схема испытательной машины для втяжки колпачков:
1 − манометр привода пуансона (7); *2* − рукоятки управления движением прижима (8); 3 − рукоятки управления движением Пуансона («вверх» − нажать; «вниз» − потянуть к себе); 4 −кнопки «пуск» и «стоп»; 5 − регулировка усилия прижима; 6 −ход прижима: I − вверх; II − вниз; 9 − заготовка; 10 − матрица.

2. Приборы для регистрации усилий приводов пуансона:

- два манометра типа МО;

- потенциометр ЩЩ-04.
3. Образцы листовые различных диаметров (табл. 31.1).
4. Комплект смазок: масло индустриальное 30, графит серебристый, ланолин, солидол, мыльная эмульсия.
5. Ацетон.
6. Сухая ветошь.
7. Штангенциркуль ШЦ 0-250.
8. ЭЦВМ «Наири-2» или «Искра-1256».

31.4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ И УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Изучить технику безопасности при работе на машине ЦНИТМАШ.

Работа выполняется бригадами по вариантам, назначаемым преподавателем (см. табл. 31.1).

Таблица 31.1

Варианты выполнения работы

Ва-риант	Зависимость (31.2) и ее вид	Количество факторов	Формула плана	Количество опытов	Число на-блюдений	Число об-разцов
1	*P=f(m, g, S)* линейная	3	2^3-1	4	по 2	8 ∅ 50-4 ∅ 65-4
2	*P=f(m, g)* линейная	2	2^2	4	по 2	8 ∅ 50-4 ∅ 65-4
3	*P=f(m, S)* линейная	2	2^2	4	по 2	8 ∅ 50-4 ∅ 65-4
4	*P=f(m)* полином 2-й степени	1	4^1	4	по 2	8 ∅50, ∅57,5 ∅65, ∅72,5
5	*P=f(m, g, S)* линейная	3	2^3	8	по 1	8 ∅ 50-4 ∅ 65-4

Каждая бригада получает еще по два образца диаметром 90 мм для определения величины усилия обрыва дна. По 1, 3 и 5 вариантам - еще смазку.

Эксперимент начинают с разработки, точнее выбора плана эксперимента (табл. 31.2-31.5), соответствующего назначенной зависимости (31.2).

Таблица 31.2

План 2^2, уравнения $P=в_o+в_1x_1+в_2x_2+в_{12}x_1x_2$

Опыт *i*	Значение факторов			Усилие вытяжки		
				измеренное		среднее
	X_{1i}	X_{2i}	X_{3i}	P'_i	P''_i	$P_i=(P'_i+P''_i)/2$
1	+	-	-			
2	-	-	+			
3	+	+	+			
4	-	+	-			

Таблица 31.3

План 2^{3-1}, уравнение $P=в_o+в_1x_1+в_2x_2+в_3x_3$

Опыт *i*	Значение факторов			Усилие вытяжки		
				измеренное		среднее
	X_{1i}	X_{2i}	X_{3i}	P'_i	P''_i	$P_i=(P'_i+P''_i)/2$
1	+	-	-			
2	-	-	+			
3	+	+	+			
4	-	+	-			

Таблица 31.4

План 2^3, уравнение $P=в_o+в_1x_1+в_2x_2+в_3x_3+в_{12}x_{12}x_1x_2+в_{13}x_1x_3+в_{23}x_2x_3+в123x_1x_2x_3$

Опыт *i*	Значение факторов			X_1	X_2	X_{13}	X_{23}	X_{123}	Усилие вытяжки		
	X_{1i}	X_{2i}	X_{3i}						P'_i	P''_i	$P_i=(P'_i+P''_i)/2$
1	+	-	-								
2	-	-	-								
3	+	+	-								
4	-	+	-								
5	+	-	+								
6	-	-	+								
7	+	+	+								
8	-	+	+								

Таблица 31.5

План 4[1], $P = в_o + в_1 m + в_2 m_2$

Опыт *i*	Значение фактора m	Усилие вытяжки		
		измеренное		Среднее
		P'_i	P''_i	$P_i = (P'_i + P''_i)/2$
1 2 3 4				

Перед выполнением плана эксперимента следует проверить штангенциркулем толщину образцов, которая для всех образцов должна быть одинаковой.

В планах квазилинейных (см. табл. 31.2-31.4) каждый фактор принимает только два значения (два уровня: + 1 или − 1 в кодированных обозначениях. Например, верхнему уровню (+) фактора *m* соответствует диаметр заготовки D = 50 мм, нижнему уровню (−)− 65 мм). Каждая строка плана соответствует условиям *i*-того опыта, т.е. условиям вытяжки, при которых производится очередное наблюдение максимального усилия вытяжки *P* (по два образца на один опыт).

При изменении условий трения (значении фактора S) следует воспользоваться ветошью и ацетоном.

После окончания эксперимента привести в порядок рабочее место, образцы, материалы, инструмент и пособия сдать учебному мастеру.

31.5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

1. Результаты измеренных в опытах значений P_g и максимального усилия усредняют.

2. Вычисления неизвестных значение коэффициентов уравнения $в_o$, $в_1$, … для линейных планов производят по выражению:

$$в_j = \sum_{i=1}^{n} (xjiP_i)/n, \qquad (31.5)$$

где *n* − число опытов (строк) плана;

P_i − средние значения измеренных усилий вытяжки;

J − метка коэффициента регрессии.

Например, по табл. 31.2 находим величину $в_1$;

$$в_1 = (+P - P_2 + P_3 - P_4)/4,$$

Величина свободного коэффициента $в_o$ для этих планов находится как общее среднее для плана:

$$в_o = (P_1 + P_2 + P_3 + P_4)/4.$$

По варианту 4 коэффициенты регрессии рассчитываются на ЭЦВМ «Наири-2» или «Искра-1256» (описание программы и перфоленту выдает учебный мастер).

3. Определяют конкретный вид функции φ. Для линейных планов на примере плана 2^{3-I} получим в явном виде относительно x_1:

$$x_1 = \frac{1}{в_1}(P - в_o - в_2 x_2 - в_3 x_3).$$

Учитывая, что $x_1 = \dfrac{m - m_o}{I_m}$,

где $m_o = 0,68$; $I_m = 0,09$ − значения основного уровня и интервала варьирования первого фактора – m, получим:

$$m = \frac{I_m}{в_1}(P - в_o - в_2 x_2 - в_3 x_3) + m_o \qquad (31.6)$$

Подстановкой критического значения $P=Pg$ в это выражение получим искомую зависимость.

Указанную зависимость изобразить в виде графиков $m^*=\varphi(g, S)$. Вид представления − произвольный. При этом целесообразно воспользоваться точками соответствующего плана; значения факторов равны +1 или -1.

Для варианта 4 (план 4^1) следует построить график зависимости $P=f(m)$, найти аналитические значения m^*, при котором $P=Pg$. Для этого необходимо найти корни квадратного уравнения $в_n(m^*)^2+в_1 m^*+(в_o-P_g)=0$. Один из корней отбросить. Показать на графике $P=f(m)$ точку с координатами (P_g, m^*).

После выполнения расчетов сдать перфоленту и пособия учебному мастеру. По результатам расчетов сделать качественные выводы, поясняющие полученные зависимости.

31.6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

В отчет по работе должны войти: цель работы, конспект теоретической части, схема глубокой вытяжки на машине ЦНИИТМАШ, номер варианта, исходная толщина образцов, измерение значения усилия обрыва дна P_g, план эксперимента, расчеты коэффициентов регрессии $в_j$, график зависимости $P=f(m)$ (вариант 4) или график зависимости $m^*=\varphi(g, S)$ (остальные варианты).

31.7. ЛИТЕРАТУРА

Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. − *Л.*: Машиностроение, 1971. − С. 103-105, 146, 732.

31.8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. От каких факторов зависит усилие вытяжки?
2. В каком месте происходит разрушение заготовки при вытяжке?
3. Какая схема напряженного состояния в стенке стакана?
4. Какая схема напряженного состояния во фланце при вытяжке?

5. От каких факторов зависит усилие прижима?

6. Зависит ли предельный (критический) коэффициент вытяжки от усилия прижима?

7. С какой целью используется математическое планирование эксперимента?

8. Как составляется план эксперимента?

Лабораторная работа 32

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОТБОРТОВКИ И ВЫСОТЫ ПОЛУЧАЕМОГО БОРТА

(2 часа)

32.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение влияния формы пуансона, радиуса закругления матрицы на предельно допустимый коэффициент отбортовки, высоту борта, усилие отбортовки.

32.2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В производстве используются два основных вида отбортовки: отбортовка отверстий и отбортовка наружного контура. Отбортовка отверстия − операция, при которой происходит образование отверстия с бортом в заготовке, имеющей предварительно пробитое отверстие меньшего диаметра.

Отбортовку отверстий применяют для замены операций вытяжки с последующей пробивкой дна для получения кольцевых деталей с фланцем, для образования отверстий с резьбой (резьба нарезается после отбортовки), для соединения деталей сваркой и в других случаях.

На рис. 32.1 показан процесс отбортовки отверстия без утонения. Под действием пуансона деформируемая часть заготовки находится в плоском напряженном (растяжение в радиальном и тангенциальном направлениях) и объемном деформированном состояниях. Радиальные растягивающие напряжения максимальны у кромки матрицы и равны нулю у кромки борта, т.е. металл здесь находится в условиях линейного напряженного состояния. Это приводит к тому, что при отбортовке отверстия происходит растяжение в тангенциальном направлении и уменьшение толщины материала, т.е. сужение в поперечном направлении.

На параметры процесса отбортовки может влиять способ получения отверстия под отбортовку: пробивка, сверление или фрезерование. Пробивка более производительна, но допускает меньшую степень деформации вследствие наклепа и образования заусенцев на кромке отверстия, сверление или фрезерование менее производительны, но допускают большую степень деформации.

Возможность отбортовки отверстий без разрыва борта определяется при помощи коэффициента отбортовки $К_{отб}$, который равен отношению диаметра отверстия в заготовке d_o к диаметру борта после отбортовки по средней линии D (рис. 32.2).

$$K_{отб} = \frac{d_o}{D} \qquad (32.1)$$

Чем больше допустимая степень деформации металла, тем меньший коэффициент отбортовки можно получить. Минимальный коэффициент отбортовки зависит:

а) от пластических свойств материала, состояния материала у кромки отверстия (отсутствие трещин);

б) от формы и размеров отверстия под отбортовку;

в) от относительной толщины материала (S_o/d_o);

г) от формы рабочей части пуансона для отбортовки (рис. 32.3 а, б, в).

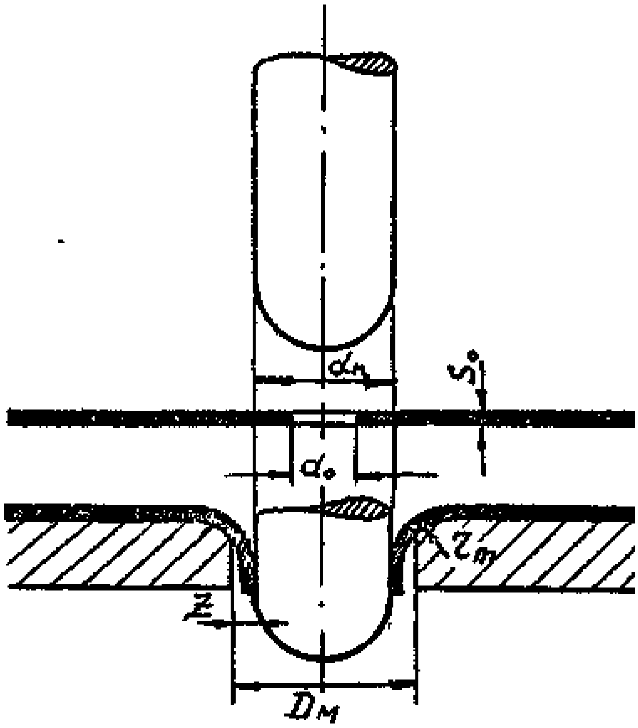


Рис. 32.1. Схема процесса отбортовки.

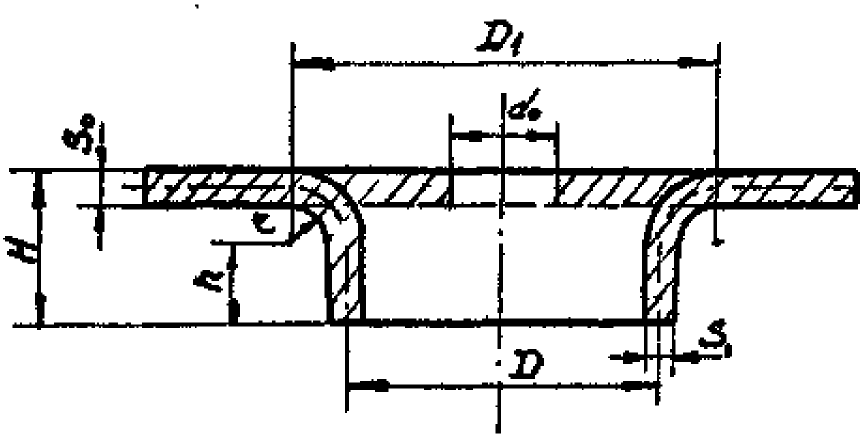


Рис. 32.2. Размеры заготовки и детали при отбортовке.

Наименьший коэффициент отбортовки и наименьшее усилие наблюдаются при отбортовке пуансоном заостренной формы (рис. 32.3 в).

Геометрические размеры при отбортовке определяются из условия постоянства объема. Так как размеры борта обычно заданы чертежом детали, возникает необходимость определить диаметр отверстия под отбортовку d_o. Для этого пользуются приближенной формулой, выведенной по аналогии с расчетом заготовки при гибке.

$$d_o = D_1 - \pi\left(r + \frac{S_o}{2}\right) - 2h \qquad (32.2)$$

При обратной задаче можно определить высоту с помощью зависимости

$$H = \frac{D - d_o}{2} + 0{,}43r + 0{,}72S_o\,. \quad (32.3)$$

Усилие, необходимое для отбортовки цилиндрическим пуансоном, может быть определено по приближенной формуле

$$P = 1{,}1 \cdot \pi \cdot S_o \cdot б_s (D - d_o). \quad (32.4)$$

Наименьшая толщина у края борта составляет

$$S_1 = S_o \sqrt{K_{отб}} \text{ (мм)} \quad (32.5)$$

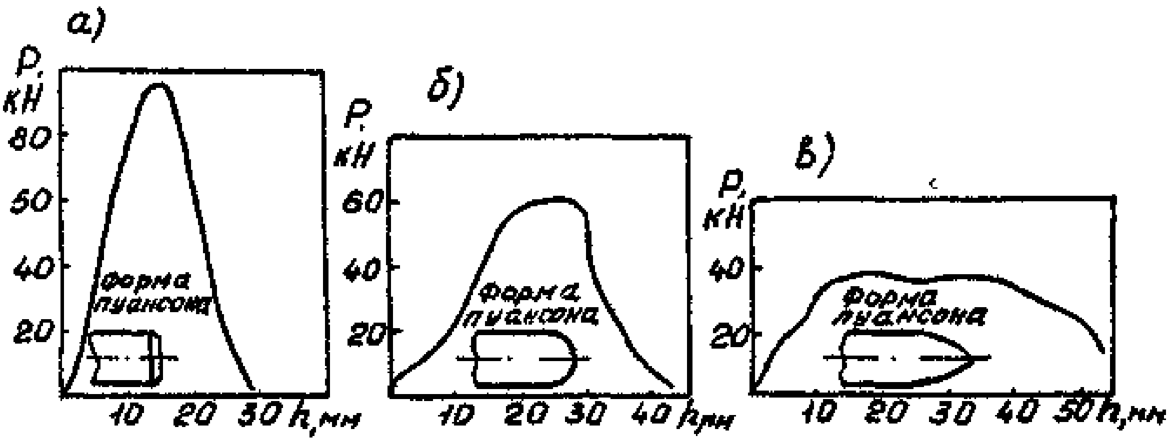


Рис. 32.3. Влияние формы рабочей части пуансона на усилие отбортовки в зависимости от хода пуансона.

32.3. ОБОРУДОВАНИЕ, ПРИБОРЫ, ИНСТРУМЕНТ, МАТЕРИАЛЫ

Эксперименты по отбортовке производятся на гидравлическом прессе ЦНИИТМАШ для испытания материалов на вытяжку (см. работу 31).

Образцами служат плоские круглые или квадратные заготовки из малоуглеродистой стали, алюминиевого сплава, латуни толщиной 0,8-1,2 мм, в которых отверстия различных диаметров пробиваются или высверливаются, отбортовка производится пуансонами ∅ 35 мм различней формы в матрице ∅ 37,5 мм с радиусом закругления *r=4, 6, 8, 12* мм.

Измерительный инструмент − микрометр, штангенциркуль, радиусомер.

Усилие определяется с помощью манометра (умножением развиваемого давления на площадь рабочего поршня) или с помощью тензометрической и записывающей аппаратуры.

32.4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ И УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Половина группы выполняет эксперименты на одном из указанных материалов. Половина группы делится на две бригады, каждая бригада выполняет эксперименты, имеющимися пуансонами на матрицах соответственно с различными радиусами закругления (по указанию преподавателя). Для каждого пуансона и матрицы устанавливается предельный коэффициент отбортовки.

1. Ознакомиться с конструкцией пресса и оснастки.
2. Разработать план эксперимента.
3. Измерить диаметр отверстий и толщину заготовок, диаметр матрицы и пуансонов, радиусы округления матриц.
4. Одним из пуансонов и в одной из матриц производится отбортовка заготовок с разными диаметрами отверстия. Определяются предельный коэффициент отбортовки и по манометру или с помощью записывающей аппаратуры максимальное усилие отбортовки. Отбортовку начинать с большего диаметра отверстия.
5. Аналогично произвести отбортовку пуансонами другой формы.
6. После выполнения отбортовки измерить диаметры отбортованных отверстий и другие размеры образца. Все измерения занести в таблицу 32.1.

При выполнении работы необходимо соблюдать следующие требования по технике безопасности:

1) монтаж и демонтаж пуансонов и матриц вести при выключенном приводе установки;

2) укладку заготовки и ее объем осуществлять при выключенном приводе установки.

32.5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Вычислить высоту борта $H_{расч.}$ по формуле (32.3) и внести результаты в табл. 32.1 (графа 2).
2. Вычислить толщину борта S_1, рассчитать по формуле (32.5) и внести результаты а табл. 32.1 (графа 9).
3. Вычислить усилие отбортовки $P_{расч.}$ по формуле (32.4) для каждой отбортованной заготовки (графа 7). (Величину $б_s$ определять по справочникам).
4. Сравнить вычисленные и экспериментальные значения H, S_1, P.
5. Построить графики $P_{эксп.}=f(K_{отб})$; $P_{расч.}=f(K_{отб})$; $H_{эксп.}= f(K_{отб})$; $H_{расч.}= f(K_{отб})$; $S_{1эксп.}= f(K_{отб})$; $S_{1расч.}= f(K_{отб})$, для разных форм пуансона радиусов округления марицы.
6. Проанализировать влияние формы пуансона и радиуса округления матрицы на предельный коэффициент отбортовки, максимальное усилие отбортовки, высоту борта и его толщину.

32.6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

1. Конспект теоретической части, схема процесса отбортовки, схема инструмента.
2. Методика эксперимента с таблицей исходных и полученных экспериментальных данных, результаты вычислений.
3. Графический материал: $P=f(K_{отб});H= f(K_{отб}); S_1= f(K_{отб})$.
4. Выводы о влиянии формы пуансона, радиуса округления матрицы на предельный коэффициент отбортовки, максимальное усилие отбортовки, высоту борта, его толщину.

32.7. ЛИТЕРАТУРА

Зубцов М.Е. Листовая штамповка. − Л.: Машиностроение, 1980. − 482 с. : ил.

32.8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Для каких целей служит отбортовка?
2. Как оценивается степень деформации при отбортовке?
3. Что влияет на величину предельного коэффициента отбортовки?
4. От чего зависит усилие отбортовки?
5. Как уменьшить усилие отбортовки?
6. Из каких условий определяют размеры при отбортовке?
7. В каком месте очага деформации действуют максимальные тангенциальные напряжения?
8. Как влияет толщина материала на усилие и предельный коэффициент отбортовки?
9. Каким способом можно получать отверстие? Как способ получения отверстия влияет на параметры отбортовки?
10. Имеет ли влияние смазка матрицы на параметры отбортовки?
11. Имеет ли влияние смазка пуансона на параметры отбортовки?

Таблица 32.1

Исходные данные и результаты эксперимента

№	Марка материала	S_o мм	d_o мм	$K_{отб.}$	Усилие отбортовки		Толщина борта		Высота борта		Форма пуансона	Примечание
					$P_{эксп}$ кГс	$P_{расч}$ кГс	$S_{1экс}$ мм	$S_{1расч}$ мм	$H_{эксп}$	$H_{расч}$	плос. – п сфер. – с заост. - з	Диаметр пуансона – D_n. Радиус округления матрицы – r Смазка –

ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Погрешности при измерениях делятся на случайные и систематические. Причиной систематических погрешностей может быть, например, «дрейф» нуля прибора в процессе работы, изменение температуры в помещении. Систематические погрешности, связанные с фактором времени, частично устраняются рандомизацией эксперимента во времени, т.е. за счет случайной последовательности реализации запланированных опытов. Полагаем, что при проведении измерений систематические погрешности пренебрежимо малы. Особое место в измерениях при изучении процессов ОМД имеют случайные погрешности, которые, как правило, подчинены нормальному (Гауссову) закону распределения. Причиной случайных погрешностей является совокупность множества случайных факторов, причем действие их на каждое измерение непредсказуемо.

Для уменьшения влияния случайных погрешностей на результат измерения повторяют n раз, каждое из которых (Y_i) назовем «наблюдением». Оценкой искомого истинного значения величины Y является среднее арифметическое, или «оценка математического ожидания»:

$$Y \approx \bar{Y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} Y_i . \qquad 1.1)$$

Величину случайной погрешности, называемую ниже просто «погрешностью», оценивают среднеквадратичным отклонением, которое называют также среднеквадратичной ошибкой, или стандартом S. Величина S определяется точностью единичного измерения (1) и не уменьшается с увеличением числа наблюдений n. Если при повторных наблюдениях условия не варьировались, то значение S вычисляют по одному из приведенных выражений:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\bar{Y} - Y_i\right)^2}{n-1}}; \qquad S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Y_i^{\,2} - n\cdot \bar{Y}^2\right)}{n-1}}. \qquad 1.2)$$

Квадрат величины S представляет собой дисперсию воспроизводимости D, называемую также «дисперсией ошибки»:

$$D = S^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Y_i^{\,2} - n\cdot \bar{Y}^2\right)}{n-1}. \qquad 1.3)$$

Погрешность определения среднего арифметического по группе из n наблюдений оценивают величиной доверительного интервала I:

$$J = \left(\bar{Y} - d; \bar{Y} + d\right), \qquad 1.4)$$

в котором с заданной вероятностью P при уровне значимости $\alpha = I - P$ будет находиться математическое ожидание У. Величина доверительной погрешности d – половины доверительного интервала – определяется по выражению:

$$d = \frac{S}{\sqrt{n}} t_{\alpha, f} \,, \qquad (1.5)$$

где f − число степеней свободы дисперсии ошибки, равное $n - 1$, если дисперсия ошибки вычисляется по одной серии из n наблюдений (см. (1.3)), и равное $N(n\text{-}1)$, если величина S^2 вычисляется путем усреднения дисперсий в N опытах по n наблюдений в каждом.

$t_{\alpha,f}$ − коэффициент Стьюдента, выбираемый по табл. 1.1.

Искомое значение Y записывается следующим образом:

$$Y = \bar{Y} \pm d. \qquad (1.6)$$

Пример 1.1. Определить доверительный интервал для измеренной в пяти наблюдениях (при одинаковых условиях) величины напряжения течения σ_S : 5,1; 5,3; 5,0; 5,2; 5,2 МПа (рис. П.1)

Таблица 1.1

Коэффициент Стьюдента $t_{\alpha,f}$ при уровне значимости α = 0,05

f	t	*f*	t
1	12,71	8	2,306
2	4,303	9	2,262
3	3,182	10	2,228
4	2,776	15	2,131
5	2,571	20	2,086
6	2,447	30	2,042
7	2,365	∞	1,960

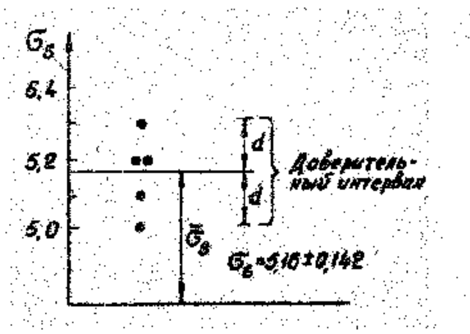


Рис. П.1. К расчету доверительного интервала n=5 в опыте.

Изучение зависимостей путем эксперимента проводят варьированием опытов и параллельным измерением исследуемой величины, называемой «откликом» *У.* Вместо выражения «условия опыта» будем использовать термин «опыт» (в примере 1.1 ставился всего один опыт при пяти наблюдениях). Рассмотрим общий случай, когда ставится несколько опытов, например *N*. Погрешность в этом случае определяется также путем повторения наблюдений в одном, нескольких или всех опытах. Если наблюдения повторяются только в одном опыте, то по ним может быть определена дисперсия ошибки, как в примере 1.1, полагают, что искомая погрешность не зависит от условий опыта, т.е. одинакова для всех опытов.

Таблица 1.2

Критерий Фишера $F_{f1,f2}$ при уровне значимости $\alpha = 0{,}05$

f	$f_{ag} = 1$	2	3	4	5	6	12
1	164,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234,0	244,9
2	18,5	19,2	19,2	19,3	19,3	19,3	19,4
3	10,1	9,6	9,3	9,1	9,0	8,9	8,7
4	7,7	6,9	6,6	6,4	6,3	6,2	5,9
5	6,6	5,8	5,4	5,2	5,1	5,0	4,7
6	6,0	5,1	4,8	4,5	4,4	4,3	4,0
7	5,5	4,7	4,4	4,1	4,0	3,9	3,6
8	5,3	4,5	4,1	3,8	3,7	3,6	3,3
9	5,1	4,3	3,9	3,6	3,5	3,4	3,1
10	5,0	4,1	3,7	3,5	3,3	3,2	2,9
11	4,8	4,0	3,6	3,4	3,2	3,1	2,8
12	4,8	3,9	3,5	3,3	3,1	3,0	2,7
13	4,7	3,8	3,4	3,2	3,0	2,9	2,6
14	4,6	3,7	3,3	3,1	3,0	2,9	2,5
15	4,5	3,7	3,3	3,1	2,9	2,8	2,5
16	4,5	3,6	3,2	3,0	2,9	2,7	2,4

Более целесообразно повторять наблюдения в каждом опыте несколько раз, усредненные в опытах значения откликов Y будут точнее единичных наблюдений в $\sqrt{n}$ раз, т.к. точность отклика определяется величиной *d* (см. (1.5)).

Рассмотрим определение доверительного интервала при равномерном дублировании опытов.

Обозначим: *N* – число опытов, каждый из которых дублируется (т.е. повторяется) *n* раз ($n_1 = n_2 = \ldots n_N = n$).

1. Для каждого *j*-го опыта определим средние арифметические и дисперсии в опытах (как в примере 1.1):

$$\left.\begin{aligned} Y_j &= \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} Y_{ji}; \\ D_j &= \frac{1}{n-1}\left(\sum_{i=1}^{n} Y^2{}_{ji} - n\bar{Y}_j^2\right) \end{aligned}\right\} \quad j = 1,2,\ldots N$$

Числа степеней свободы $f_1 = f_2 = \ldots = f_n = f = n-1$

2. Проверяется однородность дисперсии по критерию Кохрена:

2.1. Выберем максимальную D_{max} из всех D_j, j = 1,2,…N;

2.2. Расчетное значение критерия Кохрена есть отношение максимальной дисперсии к сумме всех дисперсий:

$$G_{рас} = \frac{D_{\max}}{D_1 + D_2 + ... + D_N}.$$

2.3. По табл. 1.3 и величинам n и N находим табличное значение критерия Кохрена $G_{табл}$.

2.4. Сравним $G_{расч}$ с $G_{табл}$, если $G_{расч} > G_{табл}$, то дисперсии неоднородны, в этом случае для каждого опыта по величине соответствующей дисперсии определяются значения d_j, j = 1,2,…N (как в примере 1.1).

Если $G_{расч} < G_{табл}$, то дисперсии однородны, что позволяет определить общую дисперсию как среднее арифметическое от дисперсии опытов D_j:

$$D_{общ} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} D_j.$$

3. Вычисленная т. о. величина $D_{общ}$ называется дисперсией воспроизводимости эксперимента. Число степеней свободы для нее:

$$f_{общ} = \sum_{j=1}^{N} j; \quad f_j = N \cdot f = N(n-1).$$

Таблица 1.3

Значения G - критерия Кохрена при пятипроцентном уровне значимости

N	n -1								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
4	0,907	0,768	0,684	0,629	0,590	0,560	0,537	0,518	0,502
6	0,781	0,616	0,532	0,480	0,445	0,418	0,398	0,382	0,368
8	0,680	0,516	0,438	0,391	0,360	0,336	0,319	0,304	0,292
10	0,602	0,445	0,373	0,331	0,303	0,282	0,267	0,254	0,244
12	0,541	0,392	0,362	0,288	0,262	0,244	0,223	0,219	0,210
15	0,471	0,335	0,276	0,242	0,220	0,203	0,191	0,182	0,174
20	0,390	0,271	0,221	0,192	0,174	0,160	0,142	0,142	0,136

4. Доверительная погрешность для каждого опыта одинакова

$$d_1 = d_2 = ... = d_{o\delta\varpi 1} = \frac{\sqrt{D_{o\delta\varpi}}}{\sqrt{n}} \cdot t_{f_{o\delta\varpi}}.$$

5. Доверительный интервал для каждого опыта

$$\left(\bar{Y}_j - d; \bar{Y}_j + d\right), \qquad j = 1,2,...N.$$

Рассмотрим определение доверительного интервала при неравномерном дублировании опытов.

Неравномерное дублирование опытов означает, что количество наблюдений в каждом опыте произвольно и возможен случай, когда

$$n_1 \neq n_2 \neq n_3 \neq \ldots \neq N.$$

6. Для каждого опыта определим среднее арифметическое $\bar{Y}_j$ и дисперсию опыта:

$$\left.\begin{aligned} \bar{Y}_j &= \frac{1}{n_j}\sum_{i=1}^{n_j} Y_{ji}; \\ D_j &= \frac{1}{n_j - 1}\left(\sum_{i=1}^{n} Y^2{}_{ji} - n_j \bar{Y}_j^2\right) \end{aligned}\right\} \quad j = 1,2,\ldots N$$

при числах степеней свободы $f_j = n_j - 1$.

7. Проверим однородность дисперсии опытов D_j по Q – критерию Бартлата:

7.1. Определим дисперсию воспроизводимости эксперимента как средневзвешенное по дисперсиям опытов. «Весами» являются числа степеней свободы f_j.

Число степеней свободы $D_{общ}$ равно $f_{общ} = \sum_{j=1}^{N} f_j$.

7.2. Определим величины C и $Q_{расч}$.:

$$C = 0{,}4343\left[1 + \frac{1}{3(N-1)}\left(\sum_{j=1}^{N}\frac{1}{f_j} - \frac{1}{f_{o\delta\varpi}}\right)\right];$$

$$Q_{рас} = \frac{1}{c}\left(f_{o\delta\varpi}\lg D_{o\delta\varpi} - \sum_{j=1}^{N} f_i \lg D_j\right).$$

Величина Q приблизительно подчиняется χ^2 – распределению с $N\text{-}1$ степенями свободы, где N − число сравниваемых дисперсий.

7.3. По табл. 1.4 и величине N найдем значение χ^2.

Сравним $Q_{расч}$ с X^2. Если $Q_{расч}$ больше X^2, то делается вывод, что дисперсии D_j неоднородны и для каждого опыта по соответствующим дисперсиям опыта D_j определяются доверительные погрешности:

$$d_j = \frac{\sqrt{D_i}}{\sqrt{n_j}} t_{f_j}, \quad j = 1,2,\ldots,N,$$

где $f_j = n_j - 1$.

Если $Q_{расч}$ меньше X^2 – критерия (более благоприятный случай), то дисперсии D_1, D_2, …, D_N однородны, тогда имеет смысл найденная выше величина $D_{общ}$ как дисперсии воспроизводимости эксперимента. В этом случае:

$$d_j = \frac{\sqrt{D_{o\delta\varpi}}}{\sqrt{n_j}} t_{f_{o\delta\varpi}}, \quad j = 1,2,\ldots,N,$$

где $f_{o\delta\varpi} = \sum_{(j)} f_j = \sum_{(j)} (n_j - 1).$

Таблица 1.4

Значения $Q = \chi^2$ – критерия Бартлета при пятипроцентном уровне значимости

Число степеней свободы, N-1	χ^2	Число степеней свободы, N-1	χ^2	Число степеней свободы, N-1	χ^2
1	3,84	11	19,68	21	32,7
2	5,99	12	21,0	22	33,9
3	7,82	13	22,4	23	35,2
4	9,49	14	23,7	24	36,4
5	11,07	15	25,0	25	37,7
6	12,59	16	26,3	26	38,9
7	14,07	17	27,6	27	40,1
8	15,51	18	28,9	28	41,3
9	16,52	19	30,1	29	42,6
10	18,31	20	31,4	30	43,8

8. Доверительный интервал для каждого опыта:

$$\left(\bar{Y}_j - d; \bar{Y}_j + d\right), \qquad j = 1,2,...N.$$

Пример 1.2. Рассмотрим применение критерия Бартлера для проверки однородности дисперсий, определенных при различных числах степеней свободы. Допустим, что эксперимент состоял из 4-х опытов. Первый опыт был повторен 5 раз (5 наблюдений), второй – 6, третий и четвертый – по четыре раза. При этом дисперсия первого опыта составила 3,5; второго – 4,22, третьего – 5,88, четвертого – 11,36. Необходимо проверить, верна ли гипотеза об однородности дисперсии.

$$D_{o\delta\varpi} = \frac{1}{\sum_{j=1}^{N} f_j}\left(\sum_{j=1}^{N} D_j f_j\right) = \frac{3{,}5 \cdot 4 + 4 \cdot 22 \cdot 5 + 5{,}88 \cdot 3 + 11{,}36 \cdot 3}{15} = 5{,}79;$$

$$C = 0{,}4343\left[1 + \frac{1}{3(4-1)}\left(\frac{1}{4} + \frac{1}{3} + \frac{1}{3} + \frac{1}{3} - \frac{1}{15}\right)\right] = 0{,}485;$$

$$Q = \frac{1}{0{,}485}\left(\lg 5{,}19 - 4\lg 3{,}5 - 5\lg 4{,}22 - 3\lg 5{,}88 - 3\lg 11{,}36\right) = 1{,}37.$$

Табличное значение X^2 для трех степеней свободы (N –1 = 3) и пятипроцентного уровня значимости (табл. 1.4) равно 7,82, т..к. Q < X^2, то гипотеза однородности дисперсии принимается, а величина дисперсии $D_{общ}$ = 5,79 является дисперсией воспроизводимости эксперимента, определенной при 15 степенях свободы ($f_{o\delta\varpi} = \sum_{(j)} f_j = 4 + 5 + 3 + 3. = 15$).

Оценим доверительную погрешность для третьего опыта с использованием дисперсии эксперимента:

$$d_3 = \frac{\sqrt{D_{o\delta\varpi}}}{\sqrt{n_3}} t_{f_{o\delta\varpi}} = \frac{\sqrt{5{,}79}}{\sqrt{4}} \cdot 2{,}13 = 2{,}56.$$

Случай, когда дисперсии опытов оказываются неоднородны, нежелателен, т.к. при этом доверительные интервалы для каждого опыта определяются по соответствующим дисперсиям опытов D_j:

Например, для третьего опыта $d_3' = \sqrt{D_3} \cdot t_{f_3} / \sqrt{n_3} = \sqrt{5{,}88} \cdot 3{,}182 / \sqrt{4} = 3{,}86$,

что на 50% выше величины d_3, определенной по $D_{общ}$.

Большая величина доверительного интервала объясняется меньшим числом степеней свободы $f_3 = n_3 - 1 = 4 - 1 = 3$ ($3 < 15$) и большим значением коэффициента Стьюдента (табл. 1.1), определяемым по числу степеней свободы.

В случае, когда число сравниваемых дисперсий равно двум, проверку однородности их проводят по критерию Фишера. При этом сравнивают величину $F_{расч}$ с $F_{табл}$. Причем $F_{расч} = D_1/D_2$, где $D_1 > D_2$, а $F_{табл}$ выбирают по табл. 1.2 по числу степеней свободы сравниваемых дисперсий. Дисперсии считаются однородными, если расчетное значение критерия не превосходит табличного и наоборот.

Примечание. Уровень значимости или «надежности» α численно равен вероятности того, что в случае $F_{расч} > F_{табл}$ или $G_{расч} > G_{табл}$ решение «дисперсии неоднородны» будет сделано ошибочно, т.е. дисперсии на самом деле окажутся однородны. В приложении даны таблицы только для $\alpha = 0{,}05$. Иногда используют такие значения: $\alpha = 0{,}01$; $\alpha = 0{,}1$. Существуют и другие показатели точности (погрешности).

Для оценки погрешности серии измерений используют среднеквадратичное отклонение среднего арифметического $S_{ср.}$

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ

В ряде случаев целесообразно проводить статистическую обработку первичных измерений (расчет X, S), далее рассчитывать по средним значениям X величину искомого параметра У. Каким образом использовать значения стандарта для первичных измерений S_x, чтобы получать величину стандарта $S_У$ для параметра У, зависящего от величины X?

Пример 2.1. Определить среднеквадратичную ошибку определения величины усилия, измеряемого месдозой, если при повторных нагружениях месдозы усилием одной величины, равной 300 кН, отклонение от нулевой линии светового луча на осциллограмме X составило соответственно 57,0; 56; 56,6; 56,5; 57,0; 56 мм.

Если в формулу для определения величины У входит только одна переменная X, измеряемая с погрешностью, то расчет $S_У$ ведут по выражению (рис. П.2):

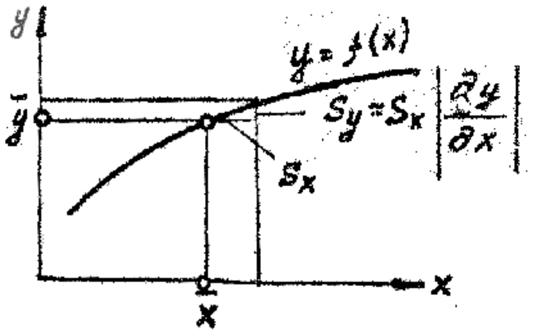


Рис. П. 2. К вопросу о преобразовании погрешностей.

В примере 2.1.: X = 56,5; D_x = 0,25; S_x = 0,5; полагая, что функция y = *f* (X) имеет вид y = CX, где C = 300/56,5 = 5,31, получим: P = 5,31· X, откуда $\frac{\partial P}{\partial X} = \frac{\partial(5,31X)}{\partial X} = 5,31$. Из выражения (2.1): S_p = 0,5 · 5,31 = 2,66 КН.

Значение критерия t выбирается по числу степеней свободы для дисперсии первичных измерений D_x.

В случае, если в функцию У входит несколько переменных: X_1, X_2, …, $X_к$, измеряемых с погрешностью S_{x1}, S_{x2}, …, S_{xk}, то значение S_y определяется по выражению:

$$S_y = \sqrt{\left(S_{X_1}\frac{\partial Y}{\partial X_1}\right)^2 + \left(S_{X_2}\frac{\partial Y}{\partial X_2}\right)^2 + \left(S_{X_3}\frac{\partial Y}{\partial X_3}\right)^2 + \ldots + \left(S_{X_k}\frac{\partial Y}{\partial X_k}\right)^2}.$$

ИНТЕРПОЛЯЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Задачей интерполяции является отыскание коэффициентов уравнения, которое наилучшим образом соответствует экспериментальным данным. При интерполяции число опытов равно числу неизвестных коэффициентов. Вид уравнения (линейное, степенное и пр.) выбирают из априорных соображений, по литературным данным, с учетом теории исследуемого процесса. Каждый опыт представляет собой набор заданных условий Х («факторов») и измеряемое значение интересующего нас параметра У («отклика»). Если фактор Х всего один, то одному опыту соответствует одна точка на графике (рис. П.3 а) или пара значений Х, У.

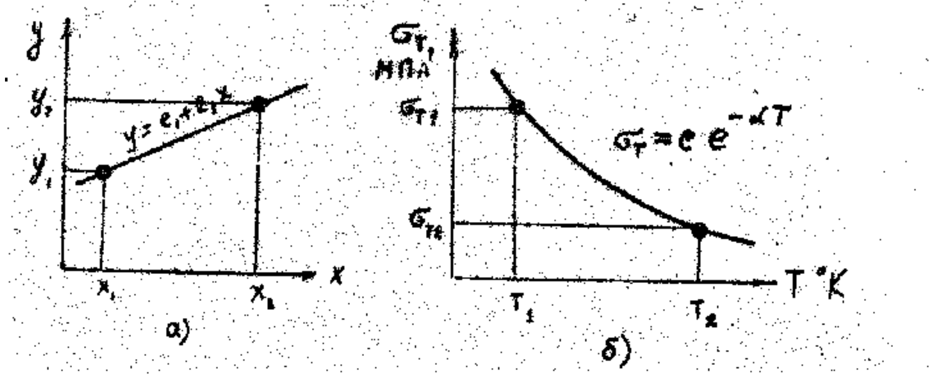


Рис. П.3. Примеры интерполяции линейной (а) и экспоненциальной (б) по двум точкам.

Задача интерполяции может быть сведена в большинстве случаев к задаче решения системы уравнений заданного вида.

Номер опыта

$$\left.\begin{array}{ll} 1. & Y_1 = f(C, X_1) \\ 2. & Y_2 = f(C, X_2) \\ \ldots\ldots\ldots & \\ N. & Y_N = f(C, X_N) \end{array}\right\} \quad X = \{x_1, x_2, ..., x_N\},\ C = \{c_1, c_2, ..., c_N\} \qquad (3.1)$$

Здесь N – число опытов, равное числу уравнений системы и равное числу неизвестных коэффициентов C_i.

Способ решения системы уравнений определяется видом выбранной функции *f*. Заметим, что здесь значения $У_i$ и X_i являются известными из опытов величинами.

Пример 3.1. Зависимость предела текучести металла от температуры может быть описана уравнением (см. рис. П.3):

$$\sigma_{\text{Т}} = C \cdot e^{-\alpha \text{Т}},$$

где Т – температура деформации по шкале Кельвина;

С и α – неизвестные коэффициенты.

Эксперимент заключается в измерении двух значений $\sigma_т$ металла при двух значениях температуры.

Найдем значения двух коэффициентов С и α по двум опытам:

Таблица 3.1.

Результаты опытов

Опыт	T^0, K	$\sigma_т$, МПа
1	1000	90
2	1100	75

Подставим измеренные значения напряжения текучести и температуры в два уравнения:

Опыт 1.
$$\sigma_{T_1} = C \cdot e^{-\alpha T_1}; \quad \sigma_{T_2} = C \cdot e^{-\alpha T_2}. \tag{3.2}$$

Поделив одно уравнение на другое, получим выражение:

$$\frac{\sigma_{T_1}}{\sigma_{T_2}} = e^{\alpha(T_1 - T_2)}, \tag{3.3}$$

которое представляет из себя закон Курнакова. Отсюда найдем величину α – коэффициента температурной чувствительности.

$$\ln\frac{\sigma_{T_1}}{\sigma_{T_2}} = \alpha(T_1 - T_2) \rightarrow \alpha = \frac{\ln\frac{\sigma_{T_1}}{\sigma_{T_2}}}{T_2 - T_1}. \tag{3.4}$$

Подставив опытные данные, получим

$$\alpha = 1{,}823 \cdot 10^{-3} \ {}^0K^{-1}$$

Из первого уравнения системы (3.1) найдем С:

$$C = \frac{\sigma_{T_1}}{c^{-\alpha T_1}} = 557{,}3 \text{ Мпа}.$$

Величина С равна значению $\sigma_т$, экстраполированному до абсолютного нуля. Следует иметь в виду, что при интерполяции теоретическое значение функции в точках плана должно совпасть с экспериментальным (см. рис. П.3).

Проверим полученное уравнение: $\sigma_T = 557{,}1 e^{-1{,}823 \cdot 10^{-3} T}$.

при $T = T_2 = 1100\ {}^0K$;

$\sigma_т = 557{,}3 \exp(-1{,}823 \cdot 10^{-3} \cdot 1100) = 75{,}02$ МПа

Разница с экспериментальным значением (75,0) составила 0,02, что обусловлено погрешностью вычислений.

Ниже приведена таблица формул для интерполяции, часто используемых при описании процессов обработки металлов давлением (табл. 3.2).

В формулы для подсчета неизвестных коэффициентов (табл. 3.2) обычно подставляют результаты $У_1$ и $У_2$ после усреднения по нескольким наблюдениям в каждом опыте, уменьшая тем самым случайную погрешность.

Применяя формулы для преобразования погрешностей (приложение 2), можно оценить погрешность величины У, рассчитав вначале погрешности измерения величин X и У по ряду повторных наблюдений, далее в соответствии с расчетными формулами столбца 4 табл. 3.1 найдем S_{c1}, S_{c2} и наконец искомую S_y с учетом выражений столбца 2 табл. 3.1.

Однако такой путь трудоемок, поэтому пригодность интерполяционных формул оценивают чаще путем постановки дополнительных опытов и сравнением расчетных (теоретических) и измеренных значений (см. ниже) величины У.

Таблица 3.2

Формулы одномерной интерполяции

№	Уравнение	Число коэффи-циентов и опытов	Расчетные формулы	Применение при исследовании процессов ОМД
1	2	3	4	5
1	У = C_1X	1	$C_1 = \frac{Y_1}{X_1}$	Расчет тарировочных коэффициентов при тарировке датчиков месдоз, холографов и пр.
2	У = $C_1 + C_2X$	2	$C_2 = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}$ $C_1 = Y_1 - C_2 Y_2$	Тарировка датчиков, описание любых зависимостей в сравнительно малом интервале значений X.
3	$Y = C_1 e^{+C_2 X}$	2	$C_1 = \frac{\ln \frac{Y_1}{Y_2}}{X_2 - X_1}$	Описание зависимости напряжения течения, усилий, в том числе удельных, при ковке, штамповке, прокатке, прессовании, волочении от температуры. Зависимость
	1	2	3	4
			$C_1 = Y \exp(C_2 X_2)$	пластических свойств сплавов от жесткости схемы напряженно-деформированного состояния
4	$Y = C_1 X^{C_2}$	2	$C_2 = \frac{\ln \frac{Y_1}{Y_2}}{\ln \frac{X_1}{X_2}}$ $C_1 = Y_1 \cdot X_1^{-C_2}$	Описание зависимости напряжения течения от скорости и степени деформации, зависимость усилия ковки, штамповки, прокатки, прессования и волочения от скорости деформирования при горячей деформации
5	$Y = C_1 \left(1 + \frac{C_2}{X}\right)$	2	$C_2 = \frac{X_1 X_2 (Y_1 - Y_2)_1}{X_2 Y_2 - X_1 Y_1}$ $C_1 = \frac{Y_1 X_{21}}{X_1 + C_2}$	Зависимость удельного и полного усилия деформирования от высоты образца при осадке, штамповке, высадке, протяжке
6	$Y = C_1 \ln X + C_2$	2	$C_1 = \frac{Y_2 - Y_2}{\ln \frac{X_1}{X_2}}$ $C_2 = Y_1 - C_1 \ln X_1$	Зависимость усилия деформирования (в том числе удельного) от коэффициента вытяжки при прессовании, волочении, листовой штамповке

АДЕКВАТНОСТЬ УРАВНЕНИЯ

Адекватность полученного уравнения, т.е. соответствие уравнения фактической зависимости, можно проверить одним из указанных способов.

Способ 1. Сравнением значения У теоретического ($У_т$), т.е. вычисленного по полученному уравнению, с величиной У экспериментального ($У_э$), т.е. измеренного. Для «хорошей», т.е. адекватной модели, разность $У_т – У_э$, называемая невязкой ξ, не должна по модулю превышать величины доверительной погрешности d (рис. П.4):

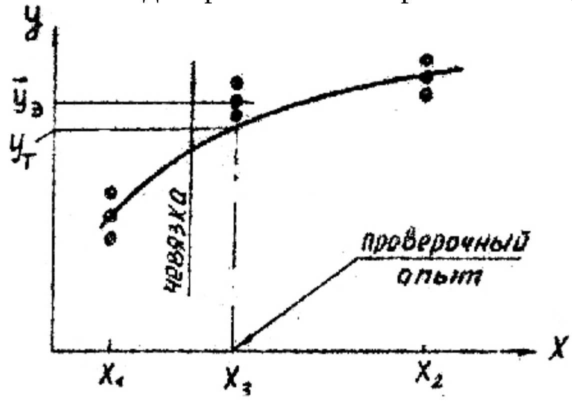


Рис. П.4. Проверка адекватности модели по одному опыту.

$$\xi = \left|Y_Т - Y_e\right| \le d\,, \qquad (4.1)$$

где $d = \frac{S}{\sqrt{n}}t$ (см. приложение 1).

В этом случае модель адекватна. Это означает соизмеримость погрешности модели с погрешностью измерения величины У. Если неравенство (4.1) не выполняется , то модель неадекватна.

Способ 2. По этому способу сравнение $У_э$ и $У_т$ производится по всему числу опытов, которых может быть больше, чем число вычисленных коэффициентов Ci; i = 1, 2, …, k. Вычисленные в точках плана X_1, X_2,…X_N значения функций $У_{тi}$ и измеренные $У_{эi}$ (i = 1, 2, …, N) определяют величину дисперсии адекватности $S^2_{ад}$:

$$S^2_{ag} = \frac{n\sum\limits_{(i)}\xi_i^2}{N-K}\,, \qquad (4.2)$$

где K – число вычисленных коэффициентов уравнения;

n – число наблюдений в каждом опыте.

Для выражений У = C_1 (1+ C_2/X) величина K = 2. Единица – невычисляемый коэффициент.

Разность N – K = $f_{ад}$ – есть число степеней свободы дисперсии адекватности.

Вопрос об адекватности модели решается сравнением дисперсии адекватности $S^2_{ад}$ и дисперсии ошибки S^2 (см. приложение 1). Они не должны слишком сильно отличаться. Стандартная статистическая проверка их различия – это проверка на однородность по критерию Фишера (см. приложение 1), как вообще двух дисперсий:

$$\frac{S_{ag}^2}{S^2} \le F_{табл.} \qquad (4.3)$$

Если неравенство выполняется, то модель считается адекватной. В противном случае – неадекватной. Величина F – критерия выбирается по соответствующим степеням свободы $f_{ад}$ и f при уровне значимости α. Величина α есть вероятность практически невозможного события, когда, получив ответ «нет», дисперсии на самом деле окажутся однородны, а модель – адекватна.

Пример 4.1. Проверить адекватность уравнения (3.6) первым способом, для чего использовать данные дополнительного опыта по изучению зависимости $\sigma_г$ от температуры: при температуре 1050 ^{0}K (средней между 1000 и 1100 ^{0}K) измерено три повторных значения $\sigma_г$: 79,0; 81,0; 80,0 МПа. При температуре 1050 ^{0}K теоретическое значение текучести (по уравнению 3.6) составит 82,2 МПа, а среднее по трем наблюдениям в этой точке – 80 МПа. Из уравнения (4.1)

$$\xi = 82{,}2 - 80 \le \frac{S}{\sqrt{n}} t.$$

Из трех наблюдений имеем: S = 1,0 МПа; величина коэффициента Стьюдента при f = n –1 = 3-1 = 2: t = 4,303 (см. приложение 1), откуда получим:

$$2{,}2 \le \frac{1}{\sqrt{3}} 4{,}303; \quad 2{,}2 \le 2{,}484.$$

следовательно, модель (3.6) адекватна.

Пример 4.2. Проверить адекватность полученной зависимости коэффициента трения от температуры $\mu = C_1 + C_2T$.

Известны результаты четырех опытов по два наблюдения в каждом $\mu_э$ и теоретические значения $\mu_т$ при тех же условиях.

Таблица 3.1.

Результаты опытов

Опыты	$\mu_э$ наблюдения		$\bar{\mu}_э$	S_i	S_i^2	μ_1	ξ_i^2
Опыт 1	0,30	0,32	0,31	0,02	0,0004	0,30	0,0001
Опыт 2	0,21	0,23	0,22	0,02	0,0004	0,23	0,0009
Опыт 3	0,44	0,40	0,42	0,04	0,0016	0,39	0,0009
Опыт 4	0,35	0,31	0,33	0,04	0,0016	0,34	0,0001
				Σ	0,004		$\sum$ 0,002

Дисперсия ошибки, как среднее арифметическое от S_i^2, будет равна

$$S^2_{ср} = \frac{\sum_{(i)} S_i^2}{4} = 0{,}001.$$

Число степеней свободы для $S_{ср}^2$ равно f = 4 (2-1) = 4.

Дисперсия адекватности $S_{ag}^2 = \dfrac{n\sum_{i=1}^{4}\xi_i}{N-k} = \dfrac{0{,}004}{4-2} = 0{,}002$, при $f_{ад}$ = N – K = 2.

Проверим дисперсии $S_{ад}^2$ и $S_{ср}^2$ на однородность.

$$\frac{S_{ag}^2}{S_{cp}^2} = \frac{0{,}002}{0{,}001} = 2.$$

Табличное значение критерия Фишера равно 8,94. Т.к. 2 < 6,94, то дисперсии однородны, а модель – адекватна.

АППРОКСИМАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И МЕТОД НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ

Задачей аппроксимации является отыскание коэффициента уравнения, которое, как и при интерполяции (приложение 3), наилучшим образом соответствовало бы экспериментальным данным. При аппроксимации расчет коэффициентов уравнения ведется по опытам, число которых заведомо больше числа коэффициентов N > K. Поскольку «удовлетворить» систему N уравнений меньшим числом коэффициентов невозможно в общем случае, то теоретические значения $У_т$ не совпадают с величиной измеренных значений У (рис. П.5).

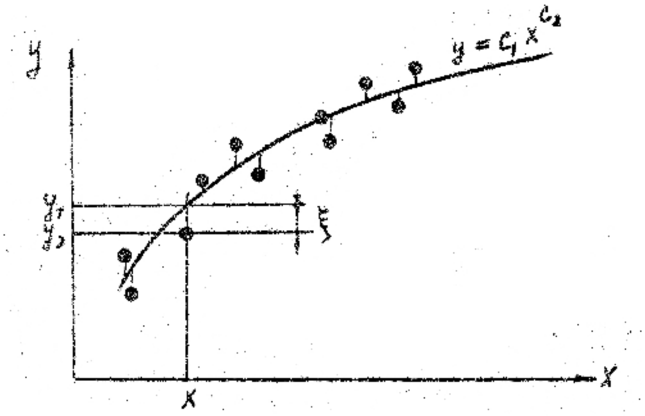


Рис. П.5. Пример аппроксимации данных степенной функцией N=11, K=2.

Наиболее статистически обоснованным и одновременно простым методом расчета аппроксимирующей функции является метод наименьших квадратов МНК, согласно которому искомые коэффициенты должны удовлетворять условию минимума суммы квадратичных невязок

$$\varphi = \sum_{i=1}^{N} \xi_i^2 \to \min. \qquad (5.1)$$

Рассмотрим использование МНК на примере аппроксимации табличных данных уравнением типа У = СХ. Пусть из эксперимента известно:

Опыт 1: (X_1,$У_1$); Опыт 2: (X_2,$У_2$); … Опыт N: (X_N,$У_N$).

$$\varphi = \sum_{i=1}^{N} \xi_i^2 = \sum_{i=1}^{N} \left(CX_i - Y_i\right)^2. \qquad (5.2)$$

В точке минимума частная производная φ по С должна равняться нулю:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial C} = 0.$$

Рассмотрим первый член суммы (5.2)

$$\xi_1^2 = (CX_1 - Y_1)^2;$$

$$\frac{\partial \xi_1^2}{\partial C} = 2(CX_1 - Y_1)(X_1) = 2(CX^2{}_1 - X_1Y_1). \qquad (5.3)$$

Аналогично с учетом (5.3):

$$\frac{\partial\left(\sum\limits_{(i)} \xi_i^2\right)}{\partial C} = 2\sum (CX^2{}_1 - X_1Y_1) = 0.$$

Отсюда найдем С:

$$C\sum X_i^2 - \sum Y_i X_i = 0 \to C = \frac{\sum Y_i X_i}{\sum X_i^2}. \qquad (5.4)$$

Расчеты по формулам типа (5.4) ведут при помощи таблиц (табл. 5.1)

Таблица 5.1

Пример расчета коэффициентов аппроксимации

	Х	У	ХУ	$Х^2$
1	0	0	0	0
2	0,5	20	10	0,25
3	1,0	36	36	1,0
4	1,5	66	99	2,25
		Σ	145	3,50

Результат: С = 145/3,50 = 41,4. Ответ: У = 41,4 · Х.

Аналогичным образом определяются коэффициенты более сложных моделей. Если число коэффициентов больше, например, К, то в точке минимума частные производные функции по всем коэффициентам должны быть равны нулю:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial C_1} = 0; \quad \frac{\partial \varphi}{\partial C_2} = 0; \ldots; \frac{\partial \varphi}{\partial C_k} = 0; \qquad (5.5)$$

Из полученной системы К уравнений можно найти К неизвестных коэффициентов.

Ниже приведены готовые формулы для расчета коэффициентов некоторых функций (табл. 5.2).

Методика оценки адекватности аппроксимирующих моделей не отличается по существу от описанного выше второго способа.

Заметим, что методом наименьших квадратов минимизируется сумма квадратичных невязок, при этом минимизируется и величина дисперсии адекватности, числитель которой и есть эта сумма. В этом смысле метод лучше любого другого. Заметим также, что при числе опытов, равном числу коэффициентов ($f_{ад}$ = N – K = 0), аппроксимация фактически приводится к интерполяции и об адекватности способом 2 судить нельзя, как и в случае интерполяции.

Таблица 5.2

Формулы аппроксимации методом наименьших квадратов

	Уравнение	Число коэффициентов	Расчетные формулы, i = 1,2,…, N	Примеры применения при исследовании процессов ОМД
	У = C_1X	1	$C_1 = \frac{\sum y_i x_i}{\sum x_i^1}$	Расчет тарировочных коэффициентов при тарировке датчиков
	У = C_1 + C_2X	2	$C_1 = \frac{db - da}{Nb - a^2}$; $C_{21} = \frac{Ng - da}{Nb - a^2}$; где $d = \sum y_i$ $b = \sum x^2{}_i$ $g = \sum x_i y_i$ $a = \sum X_i$	Тарировка, описание линейных и практически любых зависимостей в сравнительно малом интервале значений X
	У = $C_1X^{C_2}$	2	$C_2 = \frac{Nbg - da}{Nb - a^2}$; $C_1 = e^f$. где $f = \frac{1}{N}(d + C_2 a)$;	Описание зависимостей напряжения течения от скорости деформации (горячая деформация) или от степени деформации (холодная деформация)
			$d = \sum \ln y_i$ $b = \sum (\ln x)^2{}_i$ $g = \sum (\ln x_i \ln y_i)$ $a = \sum \ln X_i$	Зависимости усилия (в том числе удельного) ковки, штамповки, прокатки, прессования, волочения от скорости деформирования

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНЖЕНЕРНЫХ ФОРМУЛ ТЕОРИИ ОМД И ТЕОРИИ ПРОЦЕССОВ ОМД ПРИ АППРОКСИМАЦИИ ИЛИ ИНТЕРПОЛИРОВАНИИ

В условиях реального процесса зависимость интересующего нас параметра (отклика У) от многочисленных условий (факторов Х) чрезвычайно разнообразна.

В теории ОМД существует достаточное количество формул, структура которых и набор факторов в них определены из существа конкретного процесса.

В общем виде: У = ψ (Х).

Однако в условиях лаборатории или производства точность их оказывается низкой в силу ряда причин, например, из-за того, что неизвестен фактический коэффициент трения или напряжение текучести.

Как уточнить эти формулы, «привязав» их к небольшому количеству экспериментальных данных? Для этого целесообразно построить диаграмму $У_э – У_ф$ (рис. П.6) по имеющимся данным: экспериментальным (т.е. измеренным) $У_э$ и теоретическим (т.е. по формуле) $У_ф$.

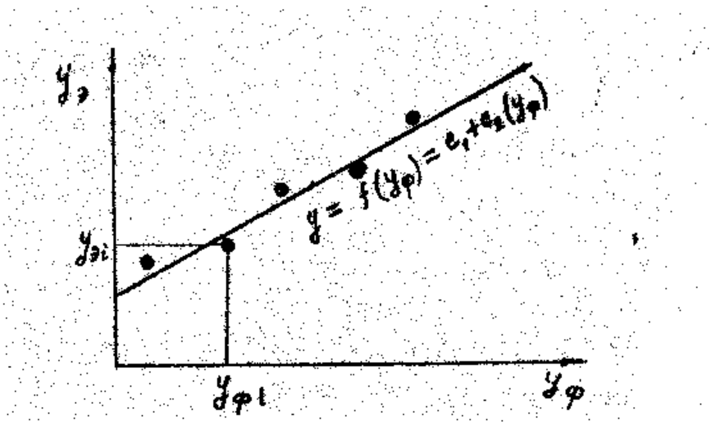


Рис. П.6. Диаграмма $У_э$ - $У_ф$.

С учетом вида диаграммы (см. рис. П.6) подбирают простое аппроксимирующее выражение, связывающее $У_э$ и $У_ф$. Тогда имеем уточненную зависимость У от Х, в которую войдут теоретическое выражение ψ (Х) и поправочные коэффициенты С j:

$$У = У_э = f\ (C_1, C_2, \ldots, C_к, \psi\ (X)) \qquad (6.1)$$

РЕГРЕССИВНЫЙ АНАЛИЗ. ЛИНЕЙНЫЕ ПЛАНЫ

В практике экспериментирования при исследовании процессов ОМД часто встречается ситуация, когда интересующий параметр (отклик) зависит от большого числа условий протекания процесса деформации сталей и сплавов (факторов), при этом характер этого влияния априори не известен. В этой ситуации рационально применение математического планирования эксперимента и его разновидности − регрессионного анализа.

Метод позволяет сочетать малое число опытов с простотой обработки и с высокой точностью вычисляемых коэффициентов.

Основные упрощающие приемы метода − это кодирование факторов и фиксирование значение факторов на двух-трех уровнях.

В линейных планах каждый фактор (X) может принимать только два значения: "верхнее" и "нижнее". Верхний уровень любого фактора условно обозначают "+1", а нижний "−1" . ($X_в$ и $X_н$ соответственно).

При регрессионном анализе ряд уравнения У = *f* (X) в кодированном масштабе имеет вид полинома:

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_3 + \ldots + B_{12}X_1X_2 + B_{123}X_1X_2X_3 + \ldots \qquad (7.1)$$

где $B_{(j)}$ – коэффициенты регрессии.

Ниже приведен пример плана эксперимента (табл. 7.1).

В этом примере число факторов 2, опытов – 4. Каждому опыту соответствует строка таблицы; номер опыта, условия эксперимента (+1, −1) и измеренное значение отклика (Y).

Таблица 7.1

План эксперимента в кодированном масштабе (матрица планирования типа 2^2)

№ опыта	Факторы		Отклик
	X₁	*X₂*	*Y*
1	+1	+1	(Y_1)
2	-1	+1	(Y_2)
3	+1	-1	(Y_3)
4	-1	-1	(Y_4)

Общее правило. Значение коэффициентов регрессии определяют алгебраическим суммированием столбца (Y) со знаками соответствующего фактора и делением полученной суммы на число опытов:

$$B_1 = \frac{Y_1 - Y_2 + Y_3 - Y_4}{4}; \qquad B_2 = \frac{Y_1 + Y_2 - Y_3 - Y_4}{4}; \qquad (7.2)$$

В общем виде $B_{(\gamma)} = \frac{\sum_i^N x_i y_i}{N}$. Величина свободного коэффициента:

$$B_O = \frac{\sum_i^N y_i}{N}$$

Это существенно проще, чем методы вычисления указанных выше различных методов поиска функций отклика.

Теоретическое значение отклика в опыте определяется по выражению 1.1 с учетом значении факторов в строках плана (табл. 1.1) и также очень просто − суммированием вычисленных коэффициентов регрессии:

Опыт 1. $Y_{T1} = B_0 + B_1(+1) + B_2(+1) = B_0 + B_1 + B_2$.

Опыт 2. $Y_{T2} = B_0 + B_1(-1) + B_2(+1) = B_0 - B_1 + B_2$.

В общем виде: $Y_{\text{Т}(i)} = \sum_{ij} b_i x_{ij}$.

Проверка адекватности модели проводится так же, как и в любом другом эксперименте.

При неадекватности линейного уравнения уменьшают интервалы варьирования факторов или переходят к полиному высшей степени, при этом вид плана и обработка данных существенно усложняется.

Регрессионный анализ позволяет ответить на вопрос: "значим ли данный фактор?" путем проверки неравенства

$$\left|b_j\right| \geq \frac{S}{\sqrt{N}} t_{j\alpha,f,+\dots J} = 1,2,3,\dots,k, \tag{7.3}$$

где правая часть представляет собой "доверительный интервал коэффициентов регрессии".

Здесь N − число опытов ;

S − среднеквадратичная ошибка;

$t_{\alpha,f}$ − коэффициент Стьюдента, выбирается по числу степеней свободы *f*, с которой определялась дисперсия ошибки измерения S^2.

Если неравенство (7.3) справедливо, то фактор X_j значим, в противном случае соответствующее произведение $B_J X_J$ в уравнении (7.1) отбрасывается, а фактор X незначим в последнем случае.

Остальные коэффициенты уравнения пересчитывать не нужно.

ПРИМЕР 7.1. Используя линейный план типа 2^{3-1}, определить зависимость коэффициента трения μ от трех факторов: шероховатости поверхности бойков (фактор X_1), температуры нагрева образца (фактор X_2) и типа смазки (фактор X_3, качественный).

Таблица 7.2

План типа 2^{3-1} (полуреплика от плана 2^2)

i	X_0	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2	$Y_{экспп,i}$	S_i^2	Y_T
1	+	+	+	+	0,32	0,33	0,33	$2{,}10^{-4}$	0,333
2	+	+	+	-	0,24	0,23	0,23	$2{,}10^{-4}$	0,228
3	+	-	-	-	0,22	0,24	0,24	$8{,}10^{-4}$	0,238
4	+	-	-	+	0,14	0,13	0,13	$2{,}10^{-4}$	0,133

В каждом опыте предусматриваем по два наблюдения. После реализации эксперимента известны Y_1 и Y_2,, $\bar{Y}_{\text{эксп}} = \frac{y_{1,i} + y_{2,i}}{2}$.

По величинам $\bar{Y}_{\text{эксп}}$ и столбцам X_i находим значения коэффициентов регрессии:

$b_0 = (0{,}33 + 0{,}23 + 0{,}24 + 0{,}13)/4 = 0{,}2325,$

$b_1 = (0{,}33 - 0{,}23 + 0{,}24 - 0{,}13)/4 = 0{,}05250,$

$b_2 = (0{,}33 + 0{,}23 - 0{,}24 - 0{,}13)/4 = 0{,}04750,$

$b_3 = (-0{,}33 + 0{,}23 - 0{,}24 + 0{,}13)/4 = -0{,}0025.$

Поскольку число коэффициентов регрессии равно 4 и равно числу опытов, то дисперсию адекватности, а вместе с тем адекватность модели определить нельзя, т.е. имеем интерполяционное уравнение.

Оценим значимость коэффициентов регрессии. Для этого определим дисперсии ошибки в опытах 1- 4.

Рассчитаем дисперсии ошибок $S_i{}^2$ в опытах 1-4:

$$S_i^2 = \frac{(0{,}32 - 0{,}33)^2 + (0{,}34 - 0{,}33)^2}{2-1} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ и т.д.}$$

Общая дисперсия ошибки измерения будет равна среднему арифметическому от S_i^2 :

$$S_y^2 = 3{,}5 \cdot 10^{-4} \text{ при } f = N(n-1) = 4(2-1) = 4 \text{ степенях свободы.}$$

Значение доверительного интервала коэффициента регрессии:

$$d_b = \frac{S_y^2}{\sqrt{N}} \cdot t_{\alpha,f} = \frac{3{,}5 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{4}} \cdot 2{,}78 = 0{,}000487\,.$$

Каждый вычисленный коэффициент регрессии больше по модулю величины d_b, следовательно, все факторы значимы.

Окончательно уравнение регрессии имеет вид:

$$y = \mu = 0{,}233 + 0{,}0525x_1 + 0{,}0475x_2 - 0{,}0025x_3.$$

Допустим, что один из них, например b_3 , оказался незначим, тогда получим:

$\mu = 0{,}233 + 0{,}0525x_1 + 0{,}0475x_2\,.$

Проверим адекватность этого уравнения. Вычислим расчетные значения μ в точках плана (см. табл. 1.2).

$Y_{\text{Т}1} = 0{,}233 + 0{,}0525 \cdot (+1) + 0{,}0475 \cdot (+1) = 0{,}333$

$Y_{\text{Т}2} = 0{,}233 + 0{,}0525 \cdot (-1) + 0{,}0475 \cdot (+1) = 0{,}228$ и т.д.

....

Рассчитаем ξ_i для каждого опыта.

Дисперсия адекватности: $$S_{ad}^2 = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^{N} \xi_i^2}{f_{ad}}\,.$$

Сравнивая значение отношения $\dfrac{S_{ad}^2}{S_y^2}$ с табличным значением критерия Фишера, оценим адекватность полученного уравнения.

Ниже приведены матрицы планирования и соответствующие им типы уравнений регрессии (табл. 7.3 – 7.6).

Коэффициенты регрессии при произведениях факторов (например, b_{12}) вычисляются по соответствующим столбцам аналогично коэффициентам при факторах.

Таблица 7.3

План полного факторного эксперимента типа 2^2
(2 фактора и 4 опыта)

i	X_0	X_1	X_2	$X_1 X_2$	$Y_{экспп,i}$	Y_T
1	+	+	+	+		
2	+	-	+	-		
3	+	+	-	-		
4	+	-	-	+		
$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2$						

Таблица 7.4

План полного факторного эксперимента типа 2^3
(3 фактора, 8 опытов)

i	X_0	X_1	X_2	X_3	$X_1 X_2$	$X_2 X_3$	$X_2 X_3$	$X_1 X_2 X_3$	$Y_{экспп,i}$	Y_T
1	+	+	+	+	+	+	+	+		
2	+	-	+	+	-	-	+	-		
3	+	+	-	+	-	+	-	-		
4	+	-	-	+	+	-	-	+		
5	+	+	+	-	+	-	-	-		
6	+	-	+	-	-	+	-	+		
7	+	-	-	-	+	+	+	-		
$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3$										

Таблица 7.5

План дробного факторного эксперимента типа 2^{3-1}

i	X_0	X_1	X_2	X_3	$Y_{экспп,i}$	Y_T
1	+	+	+	+		
2	+	-	+	-		
3	+	+	-	-		
4	+	-	-	+		
$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3$						

Таблица 7.6

План полного факторного эксперимента типа 2^{4-1}
(4 фактора, 8 опытов)

i	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4	$X_1 X_2$	$X_1 X_3$	$X_1 X_2 X_3 X_4$	$Y_{экспп,i}$	Y_T
1	+	+	+	+	+	+	+	+		
2	+	-	+	+	-	-	-	+		
3	+	+	-	+	-	-	+	-		
4	+	-	-	+	+	+	-	-		
5	+	+	+	-	-	+	-	-		
6	+	-	+	-	+	-	+	-		
7	+	+	-	-	+	-	-	+		
8	+	-	-	-	-	+	+	+		
$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{1234} x_1 x_2 x_3 x_4$										

Приложение 8

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ИМЕЮЩЕЙСЯ БИБЛИОТЕКИ ПРОГРАММ ДЛЯ ЭВМ И АРМ

Для облегчения трудоемких вычислительных работ во время обработки данных целесообразно использовать программы в виде перфолент, всю совокупность которых можно разбить на следующие основные группы:

А. Программы статической обработки (расчет погрешностей, доверительных интервалов и пр.);

В. Программы интерполяции и аппроксимации, включая встроенные в память машины;

С. Программы расчета показателей схемы напряженно-деформированного состояния, включая методы расчета этих показателей, приведенные в лабораторных работах 14 и 15 по теории ОМД;

D. Проблемно-ориентированные программы, имеющие названия, соответствующие номерам лабораторных работ, в которых они используются;

Е. Проблемно-ориентированные программы исследовательского характера. Описание каждой программы состоит из названия, алгоритмического языка и формы обращения, математического обоснования, численного метода, краткой блок-схемы, характеристик ввода и вывода.

Программы, используемые в лабораторном практикуме, хранятся в учебном зале кафедры ОМД. Название каждой программы состоит из символа группы, к которой она относится (А, В, С, D см. выше), года, в котором она подготовлена (например 82) и порядкового номера (двухзначного числа), нумерация идет сквозная по годам, например «С7404» – четвертая программы группы С, подготовленная в 1974 году.

Ниже приведены примеры описания программ и блок-схем (рис. П.7, П.8).

Пример 8.1. Программа «А8102». Предварительная статистическая обработка экспериментальных данных (нормальный, логарифмически-нормальный законы).

Целью расчетов является предварительная статистическая обработка выборки экспериментальных данных с оценкой следующих параметров и характеристик распределения: среднего арифметического значения X, дисперсии S^2, среднего квадратичного отклонения S и коэффициента вариации γ:

Обработка данных производится для нормального и логарифмически-нормального законов распределения.

Вычисление оценок параметров и характеристик распределения производится по формулам:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{N} N_i}{N}; \quad S^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(x_i - \bar{x}\right)^2}{N-1}; \quad J = \frac{S}{x}.$$

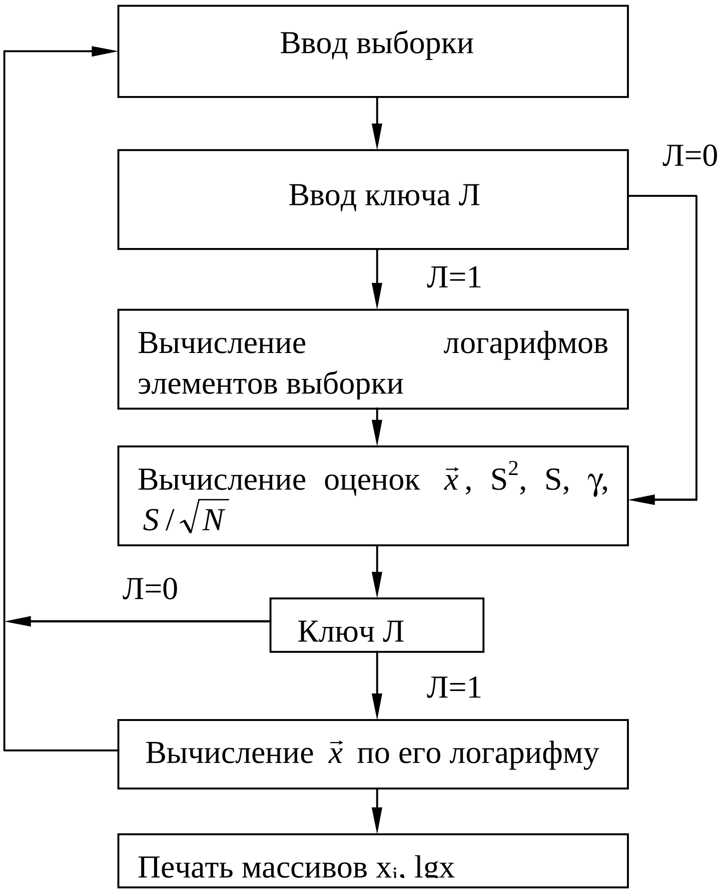


Рис. П.7. Блок-схема программы предварительной статистической обработки экспериментальных данных.

Дополнительно вычисляется значение выражения $S/\sqrt{N}$ для оценки величины доверительного интервала для X:

$$t_{kp.} \cdot S/\sqrt{N}$$

где $t_{кр}$ – критическое значение критерия Стьюдента для числа степеней свободы f= N –1 и выбранного уровня значимости.

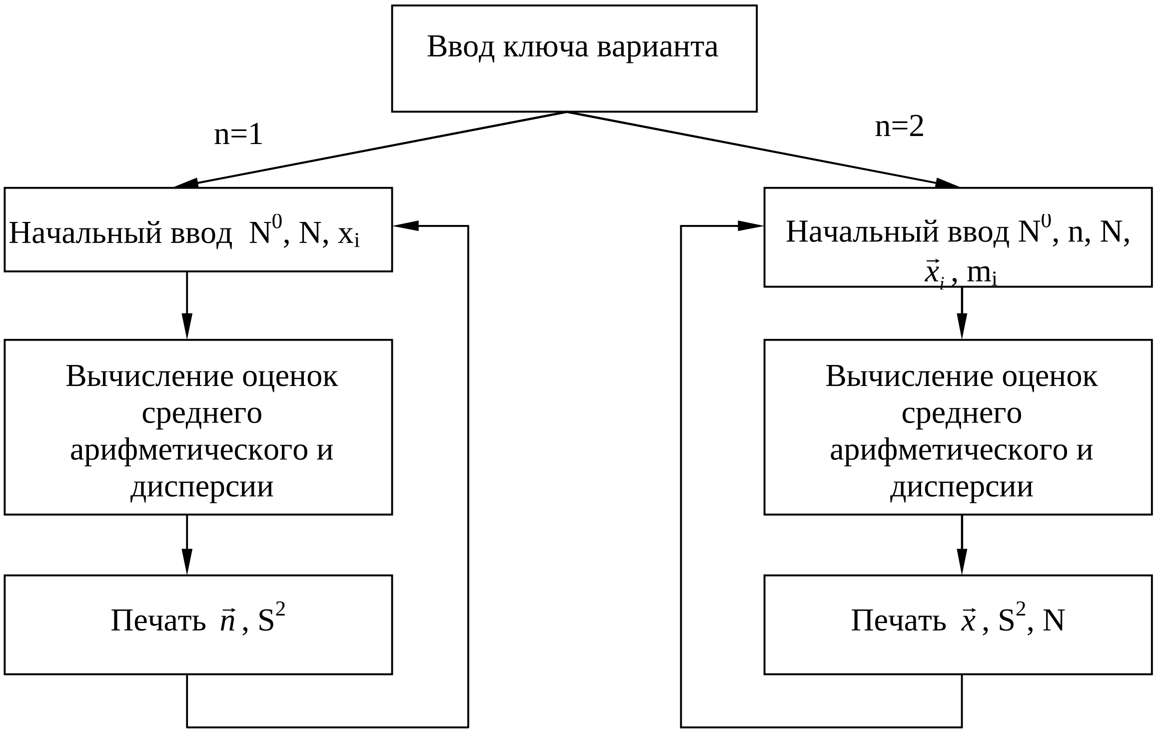


Рис. П. 8. Блок-схема программы среднего значения и дисперсии для группированных и негруппированных выборок.

Программа включает следующие основные этапы расчета :

1. Ввод обрабатываемой выборки данных.
2. Ввод ключа, определяющего вариант выбора (Л = 0 для нормального закона, Л = 1 для логарифмически-нормального закона).
3. Логарифмированные элементы выборки.
4. Вычисление оценок параметров X, S^2, S и γ.
5. Восстановление величины X по среднему значению логарифма.
6. Печать вычисленных оценок.
7. Передача управления на ввод новой выборки.

В программе предусмотрена печать массивов исходной выборки X_i и логарифмов элементов выборки lgX (Л = 1).

АНТОЩЕНКОВ Юрий Михайлович
ТАУПЕК Иван Михайлович
ЛИСОВСКИЙ Александр Владимирович

ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ КУЗНЕЧНО-ШТАМПОВОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА И ПРЕССОВАНИЯ.

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ.

Рецензент проф. д.т.н. А.Г. Кобелев

Редактор Г.В. Атмашкина

Уч.-изд. п.л.12,7
Цена «С»

Электростальский политехнический институт (филиал)
Университета машиностроения.
144000, Московская область., г. Электросталь,
ул. Первомайская, д.7.