

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П.КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

В .Р Каргин

**Лабораторный практикум
по курсу «Методология научных исследований»**

Электронное учебное пособие

САМАРА
2011

Автор: **Каргин Владимир Родионович**

Каргин, В. Р. Лабораторный практикум по курсу «Методология научных исследований» [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / В. Р. Каргин; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Электрон. текстовые и граф. дан. (3,10 Мбайт). - Самара, 2011. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

Описаны методы исследования основных параметров процессов деформирования металлов, математическое имитирование и обработка результатов эксперимента, анализ размерностей.

Практикум предназначен для студентов, обучающихся в магистратуре по направлению 150100.68 «Металлургия» по магистерской программе «Теория и технология обработки материалов с заданными свойствами».

Подготовлено на кафедре обработки металлов давлением.

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №1	4
Определение контактных напряжений в процессах обработки металлов давлением	4
Лабораторная работа №2	12
КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ МАССОВЫХ МАТРИЦ	12
Лабораторная работа №3	24
ПЛАНИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ	24
Лабораторная работа №4	41
Осадка поковок плоскими бойками	41

Лабораторная работа №1

Определение контактных напряжений в процессах обработки металлов давлением

Цель работы – освоение метода фольговых датчиков для нахождения контактных напряжений; изучение распределения напряжений на поверхности открытого штампа; получение практических навыков обработки результатов эксперимента (4 часа).

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1. Метод фольговых датчиков

Условия работы деформирующего инструмента характеризуется интенсивным воздействием весьма высоких температурно-силовых нагрузок. Реактивные силы при деформировании заготовки вызывают упругую или упругопластическую деформацию отдельных участков инструмента являются причиной износа, появления трещин, а в отдельных случаях разрушения. Кроме того, от условий эксплуатации зависит теплопередача от заготовки к инструменту, условия контактного трения, особенности возникновения и развития разгарных трещин. Наконец, фазовые и структурные превращения в поверхностном слое инструмента происходят не только в связи с тепловым, но и силовым воздействием деформируемого металла на инструмент.

Развиваемые в процессе обработки металлов давлением контактные напряжения иногда превышают допустимые значения напряжений для металла инструмента. В результате этого имеет место смятие рабочих кромок матриц, пресс-шайб, образование глубоких трещин. Поэтому очень важно знать силовой режим деформирования и уровень контактных напряжений.

Одним из методов экспериментального определения нормальных контактных напряжений является метод фольговых датчиков, предложенный Я.М. Охрименко с сотрудниками.

На рис. 1 представлена схема измерения h с помощью фольговых датчиков. Для этого перпендикулярно поверхности инструмента просверливается отверстия малого диаметра 1 и закрываются фольгой 2 толщиной t из достаточно прочного и пластичного металла. После деформации металла на фольге остаются выпуклые отпечатки, по высоте которых h судят о величине нормальных напряжений на поверхности контакта. Обычно используется фольга толщиной $t=0.1-0.3$ мм.

Тарировка датчиков производится полиуретаном в замкнутом объеме при различных значениях гидростатического давления σ (рисунок 2). Шайба 1 с отверстиями 2 и с датчиком 3 устанавливаются в контейнере 4. При нажатии на пуансон 5 силой P в закрытой полости контейнера с помощью полиуретана 6 создается гидростатическое давление. Нормальное напряжение σ , действующее на поверхность шайбы, определяется по выражению:

$$\sigma = \frac{P}{F_K}, \text{ а высота лунок } \bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^N h_i}{N}, \quad (1)$$

$$\text{где } F_K - \text{площадь контактной поверхности, } F_K = \frac{\pi D^2}{4} ; \quad (2)$$

N – число отверстий на шайбе;

h_i – высота лунки в i -ом отверстии;

D – диаметр контейнера для тарировки.

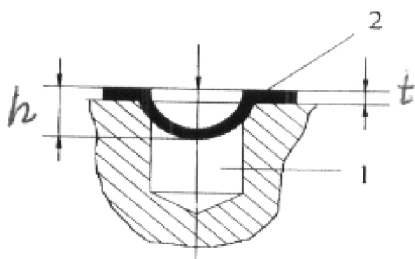


Рис. 1. Схема измерений контактных напряжений с помощью фольговых датчиков

1. Отверстие
2. Датчик -фольга

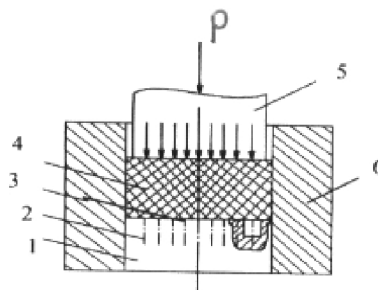


Рис. 2. Тарировочный штамп

- 1 - Шайба с отверстиями
- 2 - Отверстия
- 3 - Датчик фольга
- 4 - Полиуретан
- 5 - Пуансон
- 6 - Контейнер

Метод фольговых датчиков имеет недостатки:

1. Не идентичность условий при образовании отпечатка на фольге в процессе тарировки и эксперимента;
2. Фольговые датчики замеряют давление лишь в ограниченном количестве мест контактной поверхности. Измеренная величина давления является средней.

2. Аппроксимация экспериментальных данных

Методы аппроксимации осуществляют путём подбора, по возможности, простых аналитических формул, с достаточной степенью точности отображающих экспериментально полученные зависимости. Чаще всего вид общей формулы заранее неизвестен.

По характеру расположения экспериментальных точек на графике или анализа теоретической информации всегда можно установить примерный вид изучаемой зависимости.

Результаты экспериментов содержат случайные ошибки, поэтому нельзя требовать, чтобы подобранная формула точно соответствовала всем экспериментальным точкам. Другими словами, график искомой функции не должен проходить через все точки. Желательно, чтобы отклонения результатов эксперимента, от значений, вычисленных по формуле, были как можно меньше.

Пусть в результате эксперимента получен ряд измерений, величин $U_3; U_{31}; U_{32}, \dots, U_{3n}$ соответствующих значениям аргумента $X_1; X_2, \dots, X_n$, которые на

графике представлены в виде точек. Необходимо установить эмпирическую зависимость между X и Y . При этом принимают следующие допущения:

1. все значения переменной X_i являются точными, т.е. ошибками в их экспериментальном определении можно пренебречь
2. результаты эксперимента $Y_1; Y_2; Y_3, \dots, Y_n$ являются независимыми случайными величинами, подчиняющимися нормальному закону распределения.

Уравнения, связывающие случайную величину Y с неслучайной X , называются уравнениями регрессии по предложению Френсиса Гамильтона.

Пусть экспериментальная зависимость на рисунке 3 аппроксимируется уравнением прямой вида $Y_i = ax_i$, где a – постоянная, подлежащая определению.

Для нахождения a используют среднеарифметический метод и метод наименьших квадратов.

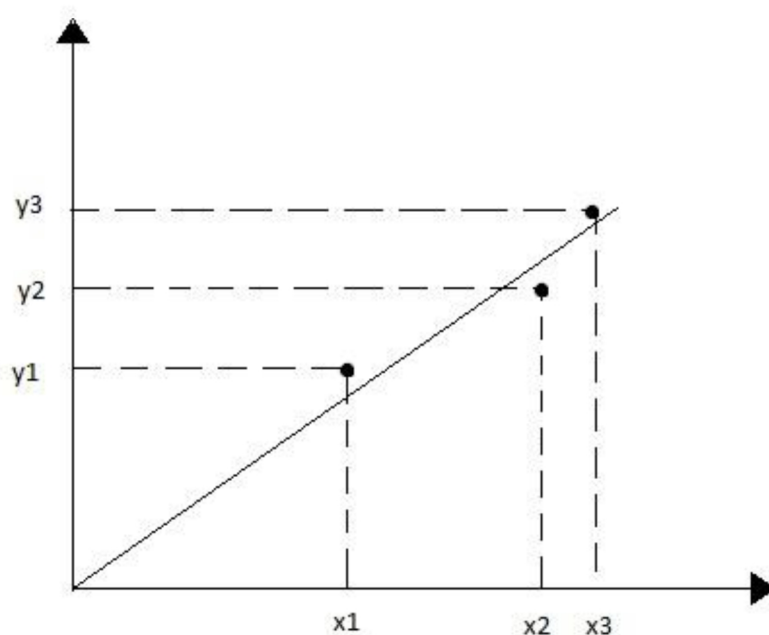


Рисунок 3 - Аппроксимация экспериментальных точек уравнения $y = ax$.

По методу средних или среднеарифметическому методу требуется, чтобы сумма разностей между значениями искомой величины, определёнными по найденной формуле, и экспериментальными её значениями равнялась нулю: $\sum_{i=1}^n (Y_{xi} - Y_i) = 0$.

Для уравнения $y=ax$ имеем:

$$\sum_{i=1}^n (y_{xi} - y_i) = \sum_{i=1}^n (y_{xi} - a x_i) = 0,$$

$$\sum_{i=1}^n y_{xi} = a \sum_{i=1}^n x_i = 0 \rightarrow a = \frac{\sum_{i=1}^n y_{xi}}{\sum_{i=1}^n x_i}.$$

По методу наименьших квадратов (МНК), разработанному Гауссом более 170 лет назад, требуется, чтобы сумма квадратов разностей между значениями искомой величины, определёнными по найденной формуле, и экспериментальными её значениями была минимальной:

$$\sum_{i=1}^n (y_{xi} - y_i)^2 \Rightarrow \min.$$

Для уравнения прямой вида $y_i = a x_i$ по методу наименьших квадратов

$$\sum_{i=1}^n (y_{xi} - y_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_{xi} - a x_i)^2 \Rightarrow \min$$

Для определения значения a надо взять производную по a от этой суммы и приравнять к нулю (n - число измерений):

$$\frac{d}{da} \sum_{i=1}^n (y_{xi} - a x_i)^2 = 0, \quad \sum_{i=1}^n (y_{xi} - a x_i)^2 x_i = 0;$$

$$\sum_{i=1}^n y_{xi} x_i = a \sum_{i=1}^n x_i^2; \quad a = \frac{\sum_{i=1}^n y_{xi} x_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2}.$$

Оборудование, инструмент, материалы:

1. Универсальная испытательная машина ЦДМУ-30.
2. Оснастка для тарировки.
3. Открытый разборный штамп.
4. Цилиндрические заготовки диаметром 50 мм и высотой 50 мм из свинца.
5. Пластины из отожженной алюминиевой фольги толщиной 0,3 мм.
6. Микрометр.
7. Ацетон, сухая ветошь.

Порядок выполнения работы

1. Изучить конструкцию оснастки для тарировки.
2. Тарировку датчиков осуществлять на машине ЦДМУ-30 ступенчатым нагружением датчиков. Нагружение производится в диапазоне усилий пресса от 0 до 150 кН с интервалом 50 кН.

На каждом j - этапе при тарировке замеряется высота каждого отпечатка h на фольге микрометром. Затем вычисляется средняя высота по формуле (1). По величине усилия P вычисляются значения σ по формуле (2). Далее строится тарировочный график в координатах. Вначале на графике указывают расположение экспериментальных точек (σ, h) , а затем проводят график в виде луча. Данная зависимость $\sigma=f(h)$ может быть аппроксимирована линейной функцией по формуле: $P = ah$.

Величину a необходимо найти по среднеарифметическому методу и методу наименьших квадратов.

3. Собрать оснастку по схеме (рисунок 4) и отштамповать заготовку да максимального усилия $P = 200$ Кн. Штамповка заготовки 2 осуществляется между верхней 1 и нижней 3 гравюрами штампа.

В качестве исследуемого металла используется свинец.

4. Измерить высоту отпечатков. Фольгу с отпечатками отверстий осторожно отделить от заготовки. Далее с помощью микрометра замерить

высоту отпечатков. По формуле(3) рассчитать нормальные контактные σ напряжения и построить эпюры распределения нормальных напряжений на контакте: деформируемый металл-инструмент. Проанализировать эпюры. Сделать выводы.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Эскизы фольговых датчиков, тарировочных приспособлений, схемы открытого штампа.
2. Тарировочный график.
3. Результаты эксперимента.
4. Формула для расчета контактных напряжений.
5. График эпюры распределения нормальных напряжений в меридианальном сечении гравюры штампа.
6. Выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что в основном определяет условия работы деформирующего инструмента?
2. Сущность метода фольговых датчиков для определения нормальных контактных напряжений?
3. На каких участках штампового инструмента нормальные контактные напряжения наибольшие?
4. Укажите резервы повышения работоспособности деформирующего инструмента.
5. Недостатки метода фольговых датчиков?
6. В чем заключается сущность метода аппроксимации экспериментальных данных.
7. Опишите метод наименьших квадратов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Штампы для горячего деформирования металлов: Учеб. Пособие М. А. Тылкин, Д.И. Васильев, А.М. Рогачев и др. Под общей ред. М.А. Тылкина М.: Высш.шк., 1977.- 496 с.
2. Тепловые процессы при обработке металлов и сплавов давлением: Учеб. Пособие Н.И.Яловой, М.А.Тылкин, П.И.Полухин и др. М.: Высш.шк., 1973.-631 с.

Лабораторная работа №2

КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ МАССОВЫХ МАТРИЦ

Цель работы — изучение методов выравнивания скоростей истечения отдельных элементов при прессовании профилей сложной формы; закрепление навыков интерполяции экспериментальных данных; получение практических навыков конструирования прессовых матриц.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1. Методика проектирования матриц

Большую часть профилей, получаемых прессованием, составляют профили, имеющие форму поперечного сечения, отличную от круга. Эти профили прессуют из цилиндрического контейнера, чаще всего в плоскую матрицу. Нарушение геометрического подобия между сечением заготовки и сечением прессуемого профиля приводит к неравномерному истечению различных участков некруглого профиля. При этом более массивные участки, расположенные около оси прессования, имеют большую скорость истечения. В результате неравномерности скоростей истечения отдельных элементов профиля возникают различного рода дефекты: геометрические размеры более тонких частей не соблюдаются, появляются расслоения на поверхности соединения отдельных частей, гофры, а также большие остаточные напряжения, которые ухудшают механические свойства прессуемых изделий и иногда приводят к короблению или разрушению профиля [1]. Для снижения возникающих дополнительных напряжений и улучшения процесса истечения необходимо максимально возможное уменьшение неравномерности скоростей отдельных частей сплошного профиля путем рационального конструирования прессовой матрицы.

В данной лабораторной работе описан метод проектирования матриц, основанный на формализации результатов экспериментальных исследований,

предложенный Гуном Г. Я., Прудковским Б. Д. [2]. Суть его сводится к следующему. При проектировании матриц для прессования профилей с поперечным сечением (отличным от круга), имеющих достаточно сложную форму, целесообразно рассмотреть процесс прессования в многоканальные матрицы, т.е. любой сложный профиль можно представить в виде совокупности элементов, разделенных достаточно тонкими перегородками. При прессовании в многоканальные матрицы происходит разделение металла в очаге деформации на отдельные потоки по соответствующим каналам. Объемы этих потоков по существу и определяют скорости истечения отдельных «ниток», длина которых в общем случае неодинакова и зависит от многих параметров.

Согласно проведенным экспериментальным исследованиям [2] к основным параметрам конструкции матрицы, влияющим на скорости установившегося течения материала при прессовании из канала ω_k , следует отнести (рисунок 1): площади поперечного сечения

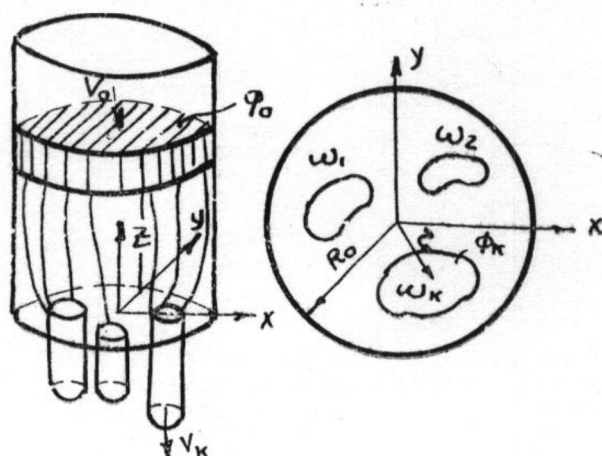


Рис. 1. Схема очага деформации при прессовании профилей

заготовки Φ_0 и канала Φ_n , расстояние r_k от центра тяжести канала K до центра матрицы, площадь тормозного пояса Φ_n и среднюю скорость истечения - $V_{ср}$.

$$V_{\text{ср}} = \frac{V_0 \Phi_0}{\sum_{k=1}^N \Phi_k}, \quad (1)$$

где N — количество каналов, на которые разделен профиль;
 V_0 — скорость пресс-штемпеля.

Значительно меньшее значение имеет форма каналов и взаимное их расположение, метод прессования, температура и скорость прессования. Ввиду множественности параметров вопрос конструирования матриц не поддастся строгому математическому анализу, поэтому был принят развиваемый авторами [2] теоретико-экспериментальный подход. Суть такого подхода состоит в определении структуры формы, которая бы гарантировала выполнение качественных закономерностей многоканального истечения и экспериментальное нахождение ряда констант. Для нахождения структуры формулы для расчета матрицы был использован принцип размерностей и аппарат теории подобия [3], на основе которых можно получить закономерно обобщенный вывод и установить строгие границы применения. Кроме того, принцип размерностей сокращает объем экспериментов без потери контроля над ним.

Итак, получаем шесть фундаментальных переменных. Общее уравнение можно записать в следующем виде

$$V_k = f(\Phi_0, \Phi_k, \Phi_n, r_k, V_{\text{ср}}).$$

Это функциональное соотношение можно выразить через комбинации безразмерных величин. Для этого воспользуемся рэлеевским методом решения размерных систем. Все размерные переменные будем рассматривать по отношению к двум основным единицам: длине L и времени Θ . Допустим, что между этими величинами существует следующее соотношение

$$V_{\kappa} = f(\Phi_0^a, \Phi_{\kappa}^b, \Phi_{\Pi}^c, r_{\kappa}^d, V_{\text{ср}}^e). \quad (3)$$

Подставим сюда вместо символов размерности

$$L^1 \Theta^{-1} = f[(L^2)^a, (L^2)^b, (L^2)^c, (L)^d, (L^1 \Theta^{-1})^e].$$

Чтобы данное уравнение было однородным относительно размерностей, должны выполняться следующие соотношения между показателями степени

$$\begin{aligned} \text{для } L: & 1 = 2a + 2b + 2c + e + d, \\ \text{для } \Theta: & -1 = -e. \end{aligned}$$

Имеем два уравнения с четырьмя неизвестными. Упростим их, исключив e и b . Тогда $e = 1$ и $b = -a - c - 0,5d$. Подставляя эти соотношения для показателей степени в формулу (3), получаем

$$V_{\kappa} = f[\Phi_0^a, \Phi_{\kappa}^{-a-c-0,5d}, \Phi_{\Pi}^c, r_{\kappa}^d, V_{\text{ср}}].$$

Объединяя члены с одинаковыми показателями степени, можно составить безразмерные комбинации

$$\frac{V_{\kappa}}{V_{\text{ср}}} = f\left[\left(\frac{\Phi_0}{\Phi_{\kappa}}\right)^a, \left(\frac{\Phi_{\Pi\kappa}}{\Phi_{\kappa}}\right)^c, \left(\frac{r_{\kappa}}{R_0}\right)^d\right].$$

Шесть первоначальных переменных задачи согласно теореме дают четыре безразмерных комбинации. Исходя из физического смысла (при $\Phi_{\Pi} = 0$ и $R_{\kappa} = 0$, функция $\frac{V_{\kappa}}{V_{\text{ср}}} \neq 0$), запишем функциональную связь в следующем виде

$$\frac{V_{\kappa}}{V_{\text{ср}}} = \frac{1}{\left(\frac{\Phi_0}{\Phi_{\kappa}}\right)^a \left(1 + \frac{\Phi_{\Pi\kappa}}{\Phi_{\kappa}}\right)^c \left(1 + \frac{r_{\kappa}}{R_0}\right)^d}. \quad (4)$$

Проанализируем полученную формулу. Первый член выражения (4) в знаменателе определяет сопротивление истечению в канале площадью Φ_{κ} .

При 111, а при 222. Это согласуется с экспериментами по прессованию материалов. Второй и третий члены выражения в знаменателе определяют сопротивление истечению, вызванное поверхностью трения рабочего пояса со смещением канала К относительно центра матрицы. С увеличением этих параметров скорость истечения падает, что также соответствует действительности.

Из условия равномерного истечения из всех каналов следует, что $V_K = V_i$. Тогда

$$\frac{1 + \frac{\Phi_{пк}}{\Phi_K}}{1 + \frac{\Phi_{пi}}{\Phi_i}} = \left(\frac{\Phi_i}{\Phi_K} \right)^{a/c} \left(\frac{1 + \frac{R_i}{R_0}}{1 + \frac{r_K}{R_0}} \right)^{d/c}.$$

Обозначив $\alpha = a/c$ и $\beta = d/c$, получим формулу для расчета поверхности трения. Задаваясь величиной эффективной площади трения на одном из участков профиля, можно определять ее и на других участках канала матрицы

$$\frac{1 + \frac{\Phi_{пк}}{\Phi_K}}{1 + \frac{\Phi_{пi}}{\Phi_i}} = \left(\frac{\Phi_i}{\Phi_K} \right)^{\alpha} \left(\frac{1 + \frac{r_i}{R_0}}{1 + \frac{r_K}{R_0}} \right)^{\beta}.$$

Если каналы равноудалены от центра потока ($R_K = R_i$), то

$$\frac{1 + \frac{\Phi_{пк}}{\Phi_K}}{1 + \frac{\Phi_{пi}}{\Phi_i}} = \left(\frac{\Phi_i}{\Phi_K} \right)^{\alpha}.$$

При $\alpha = 0$ (исключается влияние площади каналов) и $\Phi_{пк} = \Pi_K h_i$, где Π_K и L_K — периметр и ширина рабочего пояса на участке получаем формулу Матвеева-Журавского

$$\frac{\Pi_K L_K}{\Phi_K} = \frac{\Pi_i L_i}{\Phi_i}.$$

Для определения рационального расположения канала на плоскости матрицы необходимо ввести величину U - среднеквадратичное отклонение

(в процентах) скорости V_K от скорости V_{cp} , с которой прессуется сплошной профиль

$$U = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(1 - \frac{V_K}{V_{cp}}\right)^2} \cdot 100\% . \quad (5)$$

Эта величина зависит от расположения профили относительно центра матрицы. Будем считать конструкцию матрицы оптимальной, если U принимает минимальное значение.

Если оптимальное расположение профиля на зеркале матрицы не обеспечивает полного выравнивания скоростей истечения различных элементов профиля, то для последующего выравнивания скоростей необходимо использовать тормозные рабочие пояски.

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 выбирают из априорных соображений по литературным данным, с учетом теории исследуемого процесса. Пригодность интерполяционных формул оценивают чаще всего путем постановки дополнительных опытов и сравнения расчетных (теоретических) и измеренных значений.

Задача интерполяции может быть сведена в большинстве случаев к задаче решения системы уравнений заданного вида

$$\begin{aligned} y_1 &= f(c_1, x_1) \\ y_2 &= f(c_2, x_2) \\ y_N &= f(c_N, x_N) \end{aligned}$$

Здесь N —число опытов, равное числу неизвестных коэффициентов c_i .
Значения y_i и x_i , являются известными из опытов величинами.

ОБОРУДОВАНИЕ, ИНСТРУМЕНТ, МАТЕРИАЛЫ

3. Вертикальный гидравлический пресс модели ПСУ-250 усилием 2,5 мН.
4. Оснастка для прямого метода прессования.
5. Двухканальная матрица с различными площадями поперечного сечения каналов.
6. Многоканальная матрица с каналами одинаковых размеров.
5. Комплект матриц с различным положением Т-образного профиля на зеркале матрицы.
6. Цилиндрические заготовки диаметром 49 мм и высотой H — 50 — 60 мм из технически чистого свинца.
7. Масштабная линейка.
8. Машинное масло, кисточка.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Коэффициенты α и β определяют из экспериментов по прессованию в двухканальную матрицу с различными площадями поперечного сечения канала (рисунок 2) и в многоканальную матрицу с каналами одинаковых размеров (рисунок 3).

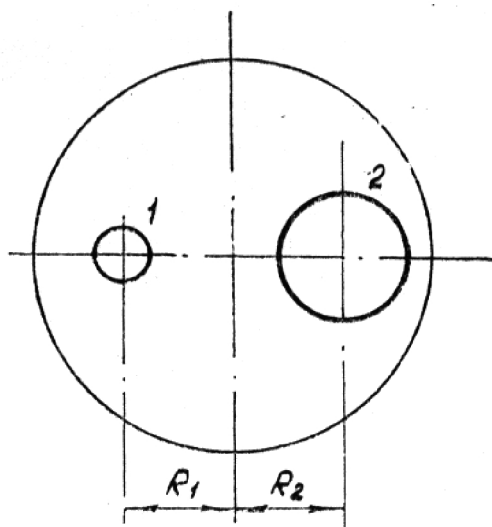


Рис. 2. Матрица двухканальная

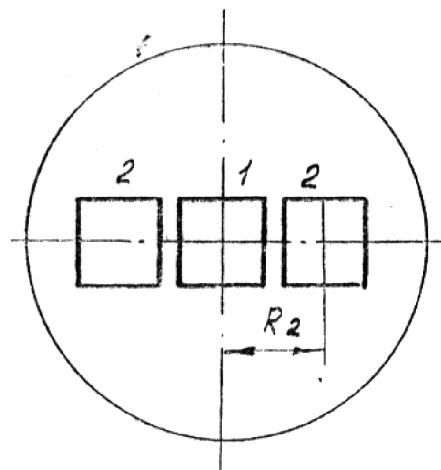


Рис. 3. Матрица с каналами одинаковых размеров

Для каждого материала определенной температуры и скорости прессования коэффициенты α и β принимают конкретные значения.

Для проведения эксперимента по прессованию в двухканальную матрицу (см. рисунок 2) расположение отверстий выбиралось таким образом, чтобы $R_1 = R_2 = \text{const}$. Рабочие пояски отсутствовали, поэтому уравнение (2) имеет вид

$$\frac{V_1}{V_{\text{ср}}} = \frac{A}{\left(\frac{\Phi_0}{\Phi_1}\right)^\alpha \left(1 + \frac{R_1}{R_0}\right)^\beta} \quad \text{— для канала 1,}$$

$$\frac{V_2}{V_{\text{ср}}} = \frac{A}{\left(\frac{\Phi_0}{\Phi_2}\right)^\alpha \left(1 + \frac{R_2}{R_0}\right)^\beta} \quad \text{— для канала 2,}$$

тогда

$$\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{\Phi_2}{\Phi_1}\right)^\alpha,$$

откуда коэффициент

$$\alpha = \frac{\lg \frac{V_2}{V_1}}{\lg \frac{\Phi_2}{\Phi_1}}. \quad (6)$$

Для определения коэффициента β необходимо провести эксперимент по прессованию полосы, разбитой на три элемента (см. рисунок 3). В этом

случае $\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3 = \text{const}$, пояски также отсутствуют. Тогда уравнение (2) упрощается:

$$\frac{V_1}{V_{\text{ср}}} = \frac{A}{\left(\frac{\Phi_0}{\Phi_K}\right)^\alpha} \text{ — для канала 1,}$$

$$\frac{V_2}{V_{\text{ср}}} = \frac{A}{\left(\frac{\Phi_0}{\Phi_2}\right)^\alpha \left(1 + \frac{R_2}{R_0}\right)^\beta} \text{ — для канала 2.}$$

Таким образом,

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{\left(1 + \frac{R_2}{R_0}\right)^\beta},$$

откуда

$$\beta = - \frac{\lg \frac{V_2}{V_1}}{\lg \left(1 + \frac{R_2}{R_0}\right)}. \quad (7)$$

Если определить скорости истечения i -го элемента как

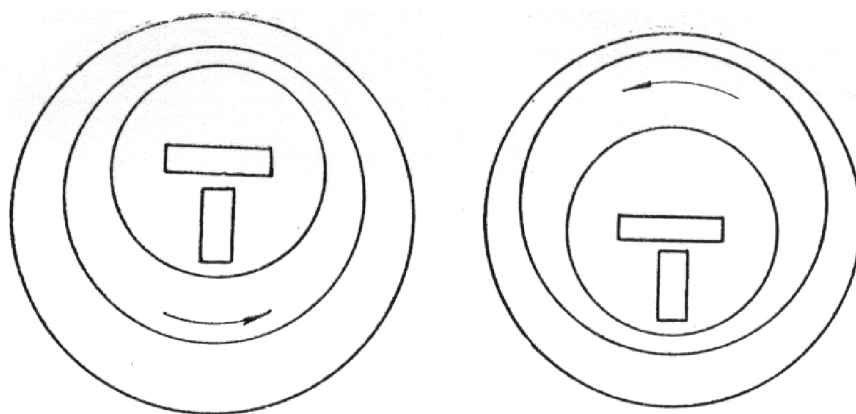
При этом считаем, что изменение скоростей истечения в процессе прессования незначительно. Произведя измерения длин отпрессованных элементов с помощью масштабной линейки, нетрудно определить коэффициенты α и β по формулам (6), (7) и (8).

Далее предполагаем, что найденные на основании экспериментальных исследований при прессовании в беспоясковые многоканальные матрицы коэффициенты α и β будут оставаться неизменными для конкретного сплава и данных условия прессования профиля произвольной конфигурации,

состоящего из любого числа элементов, имеющих различные площади поперечных сечений.

В данной лабораторной работе необходимо найти оптимальное расположение Т-образного профиля на зеркале матрицы. Ввиду симметрии профиля относительно одной из осей координат достаточно определить одну координату, что сокращает объем вычислений. Для четырех возможных положений профиля на зеркале матрицы вдоль оси симметрии (рассматривать расположение, при котором часть профиля выходит за пределы контура контейнера, не имеет смысла) определим среднеквадратичное отклонение и построим график в координатах U — (r_g/R_0) . Минимум на кривой будет соответствовать оптимальному расположению профиля в плоскости матрицы. Очевидно, для сложных профилей при поиске оптимальных параметров матрицы необходимо использовать ЭВМ.

Для проверки правильности расчетной формулы необходимо провести эксперимент по прессованию Т-образного профиля в специально сконструированную матрицу с расположением канала согласно расчетам. Матрица состоит из нескольких колец,



Р и с. 4. Матрица для прессования Т-образного профиля

эксцентрично расположенных относительно друг друга (рисунок 4). Таким образом, матрица находится в промежуточной втулке, а втулка в матрицедержателе. Вращением втулки с матрицей можно добиться смещения центра тяжести профиля относительно оси симметрии. По результатам эксперимента оценивается точность методики проектирования прессовых матриц.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Краткое описание работы.
2. Запись результатов замера и расчетов.
3. Обработка результатов экспериментов.
4. Выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислить способы выравнивания скоростей истечения.
2. Что такое скорость прессования и скорость истечения металла и как они определяются?
3. К каким дефектам приводит нарушение геометрического подобия между сечением заготовки и сечением прессуемого профиля?
4. В чем заключается сущность проектирования матриц, основанная на формализации результатов экспериментальных исследований?
5. Укажите факторы, вызывающие неравномерность скоростей истечения.
6. Каким образом нужно расположить отверстие на зеркале матрицы для прессования асимметричного профиля?
7. Укажите границы применимости формулы Матвеева-Журавского. В чем заключается сущность интерполяции экспериментальных данных?
8. Что принято в качестве критерия оценки оптимального положения профиля на зеркале матрицы?

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Перлин И. Л., Райтбарг Л. Х. Теория прессования металлов. 2-е изд. — М.: Металлургия, 1975. — 448 с.
2. Гун Г. Я., Яковлев В. И., Прудковский Б. А. и др. Прессование алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1974. — 336с.
3. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. — М.: Мир, 1972. — 381с.

Лабораторная работа №3

ПЛАНИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА В ПРОЦЕССАХ ПРЕССОВАНИЯ

Цель работы — изучение методов обработки экспериментальных данных и планирования эксперимента для построения математических моделей процессов прессования и их оптимизация; практическое применение методов планирования и обработки результатов эксперимента в условиях конкретного процесса прессования; построение математической модели, связывающей усилие прессования трубы с технологическими параметрами процесса — конусностью матрицы и вытяжкой; исследование закономерностей формирования труб с внутренним оребрением в зависимости от технологических параметров процесса прессования и конструкции иглы; нахождение оптимальных параметров инструмента при прессовании трубы с наружным оребрением, обеспечивающих минимальную неравномерность скоростей истечения.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1. Понятие о планировании эксперимента

Планирование эксперимента — это процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью. Наиболее важными в областях науки и техники являются задачи, связанные с поиском оптимальных условий и построением математических моделей.

Поставленная задача решается на основе представления о кибернетической системе, которую называют «черным ящиком». Он представляет собой систему связей, недоступную для наблюдения, так как о содержании, механизме процесса нам ничего не известно или известно лишь частично. Известны только входы, переменные участвующие в процессе (факторы), и выходы — результат процесса (параметр оптимизации), обозначенный символом y .

Каждый фактор может принимать в опыте одно или несколько значений. Такие значения называются уровнями. Схема «черного ящика» позволяет строить математические уравнения, связывающие параметр оптимизации с факторами

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k).$$

Задача эксперимента состоит в том, чтобы определить численные значения коэффициентов этого уравнения. Обычно функцию, $f(x_1, x_2, \dots, x_k)$ выбирают в виде степенного ряда. В частности, для двух факторов функция имеет вид полиномов первой степени $Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2$ с неполным квадратным членом $Y = b_0 + b_{11}x_1 + b_{22}x_2 + b_{12}x_1x_2$. Модель должна быть достаточно точной, т. е. близкой к фактической зависимости. Тогда считают, что она адекватна.

2. Полный факторный эксперимент

При планировании по схеме полного факторного эксперимента реализуются все возможные комбинации факторов на всех выбранных для исследования уровнях. Необходимое количество опытов N при полном

факторном эксперименте определяется по формуле $N = rk$, где r — количество уровней, k — число факторов.

Если эксперименты проводятся на двух уровнях, то постановка опытов по такому плану называется **полным факторным экспериментом типа 2к**. Каждый фактор, участвующий в процессе, имеет определенный предел изменения своей величины. Совокупность всех значений, которые принимает фактор, называется **областью определения фактора**. Но в области определения надо найти локальную подобласть для планирования эксперимента, т. е. для каждого фактора необходимо указать тот интервал изменения параметров, в пределах которого проводятся исследования. Для этого на основании априорной информации устанавливаются ориентировочные значения факторов, комбинации которых дают наилучший результат. Этой комбинации значений факторов соответствует многомерная точка в факторном пространстве, которая принимается за исходную при построении плана эксперимента. Координаты этой точки называются **основными уровнями факторов**.

После того как основной уровень выбран, переходим к следующему шагу — выбору интервалов варьирования. **Интервалом варьирования фактора** называется некоторое число, прибавления которого к основному уровню дает верхний, а вычитание — нижний уровень фактора.

Поскольку факторы изучаемого процесса неоднородны и имеют различные единицы измерения, их следует привести к единой системе исчисления путем перехода от действительных значений факторов к кодированным по формуле

$$x_j = \frac{\tilde{x}_j - \tilde{x}_{0j}}{\Delta \tilde{x}_j},$$

где $\Delta \tilde{x}_j = \frac{\tilde{x}_{j \max} - \tilde{x}_{j \min}}{2}$, $\tilde{x}_{0j} = \frac{\tilde{x}_{j \max} + \tilde{x}_{j \min}}{2}$;

x_j — кодированное значение фактора;
 $\tilde{x}_j$ — натуральное значение фактора;
 $\tilde{x}_{0j}$ — натуральное значение фактора на основном уровне;
 j — номер фактора;
 $\Delta \tilde{x}_j$ — интервал варьирования.

В безразмерной системе координат верхний уровень равен +1, нижний — соответственно —1, координаты основного уровня равны нулю. Для случая $N=22$ условия проведения эксперимента записываются в виде таблицы, которую называют матрицей планирования эксперимента (таблица 1). Строки соответствуют различным опытам, столбцы — значениям факторов (единицы для упрощения записи опущены).

Построение матриц планирования основано на правиле чередования знаков. В первом столбце они меняются поочередно, во втором чередуются через два, в третьем — через четыре и т. д. по степеням двойки. По результатам эксперимента определяются коэффициенты математической модели

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N y_i x_{ij}}{N}. \quad (1)$$

Чтобы провести процедуру вычисления коэффициента b_0 в соответствии с формулой (1), в матрицу планирования введен столбец фиктивной переменной x_0 , которая во всех опытах принимает значение +1.

Коэффициенты при независимых переменных указывают на силу влияния факторов. Чем больше численная величина коэффициента b_j , тем большее влияние оказывает фактор. Если коэффициент имеет знак «+», то с увеличением значения фактора y увеличивается, а если «—», то уменьшается.

Планируя эксперимент, мы стремимся получить линейную модель. Однако у нас нет уверенности в том, что в выбранных интервалах

варьирования процесс описывается линейной моделью. Один из часто встречающихся видов нелинейности связан с тем, что эффект (влияние) одного фактора зависит от уровня, на котором находится другой фактор. Это означает, что имеет место эффект взаимодействия двух факторов. Полный факторный эксперимент позволяет количественно оценивать эффекты взаимодействия. Для этого надо, пользуясь правилом перемножения столбцов, получить столбец произведения двух факторов (таблица 2). Математическая модель выглядит следующим образом

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 . \quad (2)$$

Коэффициент b_{12} вычисляется аналогично по формуле (1).

3. Дробный факторный эксперимент

Число опытов в полном факторном эксперименте быстро растет с увеличением размерности факторного пространства. При больших K матрицы планирования эксперимента оказываются практически неприемлемыми. При этом из множества полных факторных экспериментов 2^k может быть отобрана некоторая часть, представляющая дробный факторный эксперимент, содержащий подходящее число опытов.

Вернемся еще раз к модели (2). Если есть основание считать, что в выбранных интервалах варьирования процесс можно описать линейной моделью, то достаточно провести три опыта и на их основе определить три коэффициента: b_0 , b_1 , b_2 . Остается один свободный опыт. Его можно употребить для сокращения числа опытов. При линейном приближении b_{12} к нулю можно использовать столбец x_1x_2 еще для одного нового фактора x_3 . По результатам опытов (см. таблица 2) можно построить линейную модель уже для трех факторов

Коэффициенты этой модели вновь рассчитываются по известной формуле (1). Наиболее важное отличие приведенного метода планирования от полного факторного эксперимента заключается в следующем. Из матрицы планирования видно, что величина b_{12} в точности совпадает с величиной b_3

(знаки столбцов x_1x_2 и x_3 одинаковы). Если в дополнение к столбцам, указанным в табл. 2, построить столбцы x_1x_3 и x_2x_3 , то они в точности совпадут соответственно со столбцами x_2 и x_1 и, следовательно, коэффициенты b_{13} и b_{23} совпадают соответственно с коэффициентами b_2 и b_1 , т.е.

$$b_1 \rightarrow \beta_1 + \beta_{23}, \quad b_2 \rightarrow \beta_2 + \beta_{13}, \quad b_3 \rightarrow \beta_3 + \beta_{12},$$

где $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ — истинные значения коэффициентов;
 $\beta_{23}, \beta_{13}, \beta_{12}$ — истинные значения парных взаимодействий.

Следовательно, вместо восьми опытов для изучения трех факторов можно поставить четыре опыта! Число экспериментов сокращается вдвое. При этом мы воспользовались только половиной полного факторного эксперимента 2^3 или полуреplikой.

В дробном факторном эксперименте линейные эффекты смешаны с эффектами парных взаимодействий, что свидетельствует о потере информации (если сравнить с полным факторным экспериментом). Это «естественная плата» за сокращение числа опытов. Но поскольку принята модель линейной и взаимодействие пренебрежимо малым, то точность расчета будет достаточной.

4. Поиск оптимальных условий

Задача оптимизации ставится таким образом: необходимо определить экспериментально координаты экспериментальной точки ($x_{1opt}, x_{2opt}, \dots, x_{kopt}$). Кратчайший путь их нахождения — это движение в направлении градиента

$$\text{grad } y = \frac{\partial y}{\partial x_1} \vec{i} + \frac{\partial y}{\partial x_2} \vec{j} + \dots + \frac{\partial y}{\partial x_k} \vec{k}, \quad (3)$$

где $\vec{i}, \vec{j}, \dots, \vec{k}$ — единичные векторы в направлении координатных осей факторного пространства.

Из уравнения видно, что частная производная линейной функции по каждой переменной x_i равна соответствующему коэффициенту:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k,$$

т. е.

$$\text{grad } y = b_1 \vec{i} + b_2 \vec{j} + \dots + b_k \vec{k}.$$

Следовательно, чтобы осуществить движение по градиенту, значения факторов по каждой из осей $i, j, \dots, k$ необходимо изменить пропорционально величинам коэффициентов $b_1, b_2, \dots, b_k$ с учетом их знака.

Бокс и Уилсон [1] предложили шаговый метод движения в направлении градиента: на основе серии опытов находится локальное описание поверхности отклика в некоторой исходной области с помощью модели линейного вида. Далее определяют направление градиента по уравнению (3). В этом направлении планируют «мысленные» опыты. Серия «мысленных» опытов рассчитывается последовательным прибавлением к основным уровням значимых факторов факторных величин, пропорциональных величинам коэффициентов регрессии с учетом их знаков. Вначале определяют произведения коэффициентов на соответствующие интервалы варьирования $b_i \Delta x_i$, по каждому фактору. Потом находят базовый фактор, для которого произведение оказалось наибольшим по абсолютной величине, и для него вычисляют «единичный шаг» $\Delta_0 = \mu \Delta x_0$, где $0 \leq \mu \leq 1$. После этого рассчитывают «единичные шаги» для всех остальных факторов

$$\frac{\Delta_j}{\Delta_0} = \frac{b_j \Delta x_j}{b_0 \Delta x_0}$$

и округляют расчетные значения. Полученные таким образом «шаги» последовательно прибавляют (в зависимости от знака b_j и от того, что ищут — максимум или минимум) к основному уровню каждого фактора или вычитают из него. Незначимые факторы стабилизируют на любом уровне в интервале $\pm I$. Обычно рассчитываются 5—10 «мысленных» опытов. Реализация «мысленных» опытов начинается с опыта, условия которого выходят за область эксперимента хотя бы по одному из факторов. Из серии рекомендуется проводить 2—3 опыта. По оценке их результатов принимают решения о прекращении экспериментов или о дальнейшем проведении их.

Если одного линейного приближения недостаточно, то ставится новая серия опытов с центром в точке, которая соответствует наибольшему

значению y , и находится новое направление движения по поверхности отклика. Такой шаговый процесс продолжается до достижения экстремума.

5. Обработка результатов эксперимента

Каждый эксперимент содержит элемент неопределенности вследствие ограниченности информации. Постановка параллельных опытов не дает полностью совпадающих результатов, потому что всегда существует ошибка опыта (ошибка воспроизводности). Для ее определения опыт воспроизводится по возможности в одинаковых условиях несколько раз и затем берется среднее арифметическое всех результатов

Отклонение результата любого опыта от среднего арифметического можно представить как разность $y_q - \bar{y}$, где y_q — результат отдельного опыта. Наличие отклонений свидетельствует об изменении значений, полученных при повторных опытах. Для измерения этого различия чаще всего используют дисперсию опыта, описываемую уравнением

$$S_y^2 = \frac{\sum_{q=1}^n (y_q - \bar{y})^2}{f},$$

где f — число степеней свободы — понятие, учитывающее в статистических ситуациях связи, ограничивающие свободу изменения случайных величин. Значение f подсчитывается как разность между числом выполненных опытов и числом констант (коэффициентов, средних и т.д.), подсчитанных по результатам тех же опытов. В данном случае $f = n - 1$, так как на вычисление $\bar{y}$ расходуется одна степень свободы.

Для расчета S_y^2 опыты, заданные матрицей планирования, дублируют n раз и подсчитывают построчные дисперсии

$$S_{y_i}^2 = \frac{\sum_{l=1}^n (y_{li} - \bar{y}_i)^2}{n - 1},$$

где y_{li} — результат параметра оптимизации l -го повторения i -го опыта;
 $\bar{y}_i$ — среднее арифметическое значение всех n повторений i -го опыта.

$$S_y^2 = \sum_{i=1}^n S_{y_i}^2 / N.$$

Таким образом, ставится серия одинаковых опытов n , затем проверяется однородность дисперсий, т.е. выясняется, определяются ли различные значения y с одинаковой точностью по критерию Кохрена

$$G_{\text{расч}} = \frac{S_{y_{\text{макс}}}^2}{\sum_{i=1}^N S_{y_i}^2}.$$

Расчетное значение G -критерия сравнивают с табличным в зависимости от уровня значимости α , числа степеней свободы $f = n - 1$ и числа опытов N (таблица П1). Ряд дисперсий считается однородным, если $G_{\text{расч}} < G_{\text{табл}}$. Уровень значимости α — мера точности ответа. Для инженерных расчетов подходящим является $\alpha = 0,05$, что соответствует вероятности правильного ответа $p = 1 - \alpha$, или 95%. При этом считают, что в среднем только в 5% случаев возможна ошибка.

Проверка статической значимости коэффициентов модели

Прежде всего, рассчитывается дисперсия в определении коэффициентов

$$S_{bj}^2 = \frac{S_y^2}{n \cdot N}.$$

Коэффициент считается значимым, когда его абсолютная величина больше доверительного интервала, т. е.

$$|b_j| \geq \Delta b_j = t S_{bj},$$

где t — критерий Стьюдента (берется из таблиц в зависимости от уровня значимости α и числа степеней свободы при определении дисперсии опыта, табл. П2);

S_{bj} — среднеквадратичная ошибка определения коэффициентов

регрессии $S_{bj} = \sqrt{S_{bj}^2}$.

Смысл этого неравенства заключается в том, что абсолютная величина коэффициента должна быть в t раз больше, чем ошибка его определения.

Статическая незначимость коэффициента интерпретируется как отсутствие влияния соответствующего фактора в изученных интервалах его изменения. Такие коэффициенты из модели исключаются.

Проверка адекватности модели

Она необходима для того, чтобы ответить на вопрос — можно ли использовать полученное уравнение или необходима более сложная модель.

Адекватность модели проверяют с помощью критерии Фишера

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{неад}}^2}{S_y^2},$$

где $S_{\text{неад}}^2$ — дисперсия неадекватности,

$$S_{\text{неад}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_{i \text{ расч}} - y_{i \text{ эксп}})^2}{N - k}.$$

Здесь $y_{i \text{ расч}}$, $y_{i \text{ эксп}}$ — значения параметра оптимизации в i -м опыте, соответственно рассчитанные по уравнению регрессии и определенные экспериментально; k — число коэффициентов уравнения регрессии, включая b_0 .

Гипотеза об адекватности уравнения принимается в том случае, когда рассчитанное значение F -критерия не превышает таб-

личного для выбранного уровня значимости и числа степеней свободы f_1 , и f_2 , с которым определялись дисперсии неадекватности опыта (табл. ПЗ).

ОБОРУДОВАНИЕ, ИНСТРУМЕНТ, МАТЕРИАЛЫ

1. Вертикальный гидравлический пресс модели ПСУ-250.
2. Инструмент для прессования.
3. Заготовки из технически чистого свинца.
4. Штангенциркуль.
5. Масштабная линейка.
6. Ацетон, сухая ветошь.
7. Машинное масло, кисточка.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Выбрать независимые переменные изучаемого процесса по заданию преподавателя; определить центр эксперимента и область определения факторов; заполнить предлагаемую таблица 1.

Таблица 1

Выбор уровней факторов

Уровни	Факторы		
Основной			
Интервал варьирования			
Верхний			
Нижний			
Код	x_1	x_2	x_3

2. Чтобы исключить влияние случайных ошибок, рекомендуется опыты, заданные матрицей планирования, проводить в случайной последовательности, т.е. рандомизированно по времени. Порядок проведения опытов следует выбирать по таблице случайных чисел (таблица Г14). Если, например, необходимо провести 4 опыта, то из любого места таблицы выписывают числа с 1 по 4,

отбрасывал числа больше 4 и уже выписанные. Полученная последовательность цифр определяет последовательность проведения опытов и заносится в таблицу 2 (столбцы 2, 3).

Таблица 2

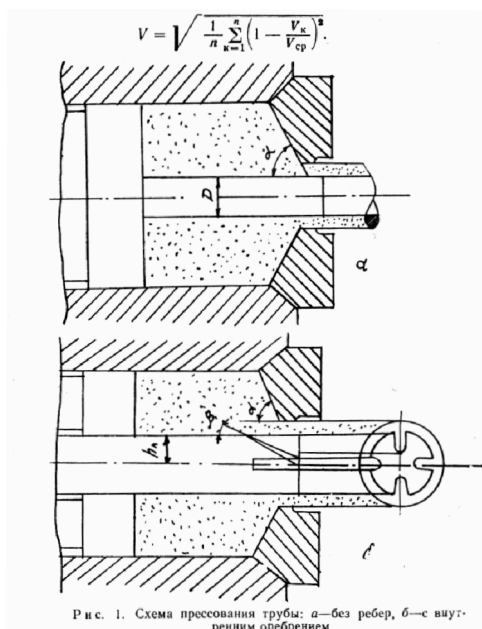
Матрица планирования экспериментов

Номер опыта	Порядок реализации опытов		x_0	x_1	x_2	x_3 или $x_{1,2}$	Результаты эксперимента и дисперсии				Проверка адекватности модели	
	n_1	n_2					y_1	y_2	$\bar{y}_{ср}$	$S^2_{y_i}$	$y_{i \text{ расч}}$	$(y_i^{\text{расч}} - y_i^{\text{эксп}})^2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1												
2												
3												
4												
Коэффициент b_i							—	—	—	$\sum S^2_{y_i}$	—	Σ

$$\frac{\dot{V}_k}{V_{ср}} = \frac{l_k \sum_{k=1}^n \Phi_k}{\sum \Phi_k l_k},$$

где Φ_k — площадь к-го канала;
 n — число элементов, на которые разделен канал ребристой трубы.

Оптимальные параметры игл рассчитываются из условия минимизации дисперсии скоростей истечения [2]



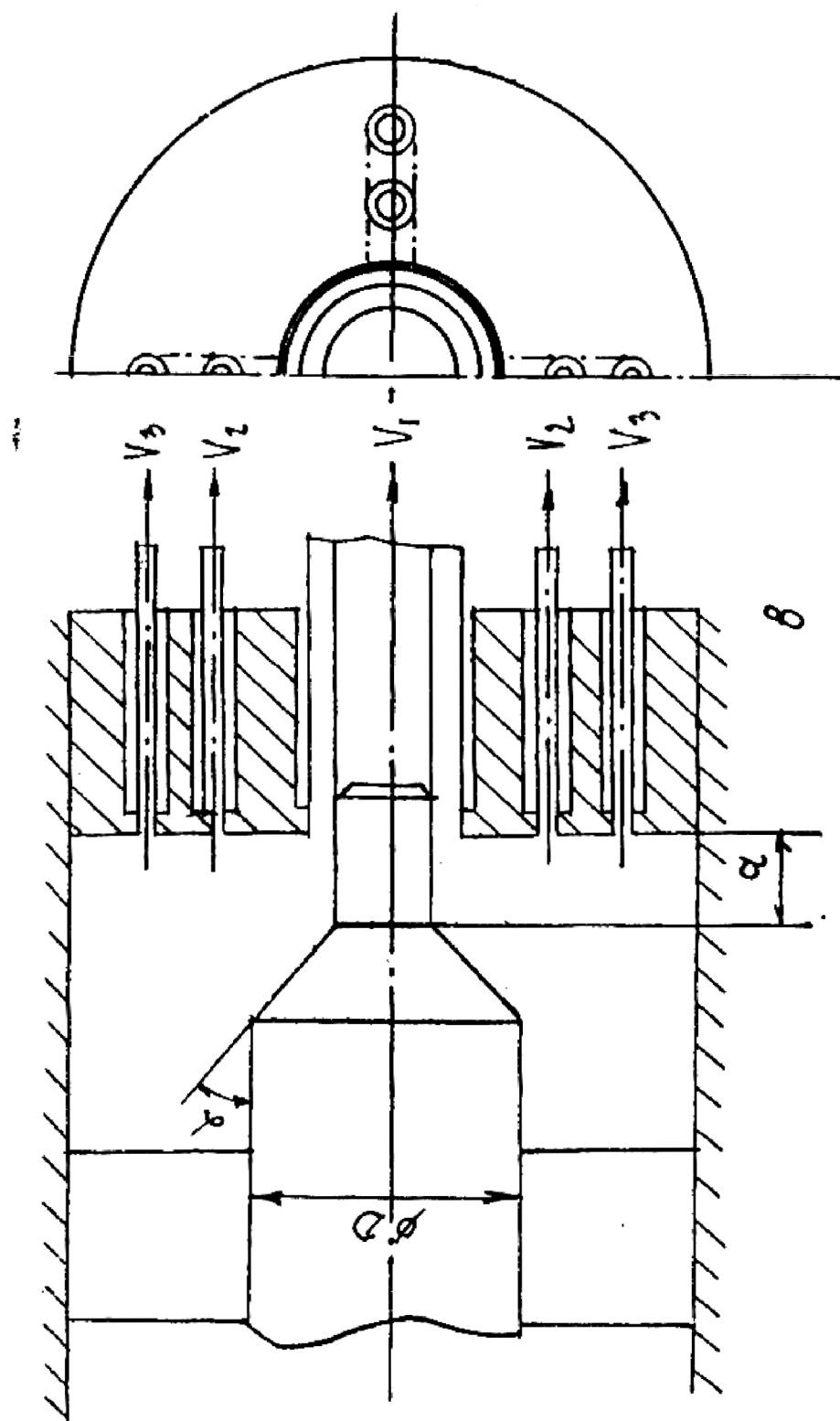


Рис. 1. Схема прессования трубы: δ — с наружным оребрением

ПОРЯДОК ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Рассчитываются средние значения $\bar{y}_{\text{ср}}$ и дисперсии S_{yi}^2 в каждой строке матрицы (см. таблица 2, столбцы 10, 11). Проверяются однородности дисперсий по таблица 3..

Таблица 3

*Сводные данные для проверки
однородностей дисперсий*

ΣS_{yi}^2	
$S_{yi\text{макс}}^2$	
$G_{\text{расч}}$	
α	0,05
$f_1 = n - 1$	
$f_2 = N$	
$G_{\text{табл}}$	
$G_{\text{расч}} - G_{\text{табл}}$	
Вывод	Дисперсии (не) однородные

Определяются коэффициенты модели и их статическая значимость по таблица 4, адекватность модели — по таблица 5.

Таблица 5

Проверка значимости коэффициентов

S_y^2		S_b^2				
α	0,05	S_b				
f		Δb_i				
$t_{\text{табл}}$		$ b_i - \Delta b_i$				
Вывод						

Осуществляется поиск оптимальных условий путем планирования серии «мысленных» опытов (таблица 6) и реализации части «мысленных» опытов.

Таблица 5

Проверка адекватности модели

$\sum (y_i \text{ эксп} - y_i \text{ расч})^2$	
$S^2_{\text{неад}}$	
$F_{\text{расч}}$	
α	0,05
f_1	
f_2	
$F_{\text{табл}}$	
$F_{\text{расч}} - F_{\text{табл}}$	
Вывод	

Таблица 6

Поиск оптимальных условий

Уровни	Факторы			
	x_1	x_2	x_3	y
Верхний +1				
Нижний -1				
Основной 0				
Интервал варьирования				
b_j				
$b_j \Delta x_j$				
Шаг Δ_j				
«Мысленный» опыт 1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Проводится анализ полученной модели, оценивается влияние факторов, анализируются оптимальные условия, делаются выводы по работе.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Схема изучаемого процесса.
2. Матрица планирования эксперимента и результаты эксперимента, представленные в виде таблиц.
3. Обработка результатов эксперимента, представленных в виде таблиц.
4. Поиск оптимальных условий технологического процесса прессования труб с внешним продольным оребрением.
5. Анализ изучаемого процесса и выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что понимают под ПФЭ?
2. Что понимают под ДФЭ?
3. Каким образом выбирается основной уровень и интервалы варьирования факторов?
4. В чем заключается проверка однородности дисперсий?
5. В чем заключается проверка оптической значимости коэффициентом модели?
6. Каким образом проводится анализ математической модели?
7. Каким образом производится проверка адекватности модели?
8. Объясните сущность поиска оптимальных условий метода Бокса-Уилсона.
9. Какой критерий применяется для выбора оптимальной геометрии прессового инструмента с целью получения труб с минимальной неравномерностью скоростей истечения?

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. А д л е р Ю. П., Маркова Г. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. — М.: Наука, 1976. - 279 с.
2. Г у н Г. Я., Яковлев В. П., Ирудковский Б. А. и др. Прессование алюминиевых сплавов. - М.: Металлургия, 1974. — 336 с.

Лабораторная работа №4

Осадка поковок плоскими бойками

Цель работы: компьютерное моделирование холодной осадки цилиндрических заготовок из алюминия с помощью программного комплекса *DEFORM-2D* и анализ технологических параметров процесса, влияющих на характер распределения напряженно-деформированного состояния.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Осадка металла поковок плоскими бойками является простейшей и наиболее распространенной операцией обработки металлов давлением.

Подавляющее большинство кузнечных слитков перед дальнейшей ковкой проходит операцию осадки. Осадка используется также при ковке дисков, валов с фланцами, плит и т.д.

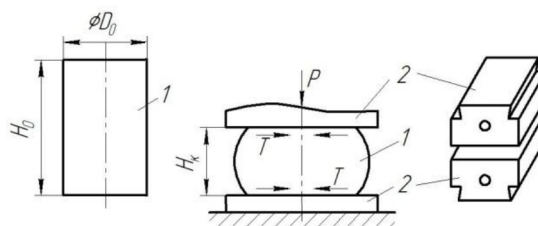
Помимо этого, элементы осадки имеют место почти во всех других кузнечных операциях, кузнечной протяжке, первых стадиях выдавливания, прессования и прошивки в закрытых матрицах, открытой прошивки, первой стадии штамповки тел самой разнообразной формы.

Операция осадки имеет два самостоятельных значения:

- 1) получение в кованном изделии требуемых физико-механических свойств;
- 2) получение поковки требуемых размеров.

Сущность процесса осадки заключается в уменьшении размера в направлении действия приложенной активной силы P и одновременном увеличении поперечного сечения осаживаемой заготовки 1 (рисунок 1).

В качестве инструмента при осадке используют параллельно расположенные бойки 2, один из которых крепится к подвижному органу кузнечной



1 – заготовка, 2 – бойки

Рисунок 1 - Схема осадки цилиндрических заготовок

машины, а второй закрепляется на столе прессы или молота. Верхний боек совершает возвратно-поступательное движение.

Течение металла в процессе осадки происходит неравномерно вследствие влияния сил трения T (рисунок 1), возникающих на контактной плоскости между металлом и бойками. Эти силы трения тормозят смещение слоев металла, примыкающих к плоскости инструмента в радиальном направлении. Слои металла, удаленные от контактных плоскостей, деформируются интенсивнее. Важнейшим проявлением этой неравномерности является превращение свободной боковой поверхности осаживаемой заготовки, ранее бывшей прямолинейной, в криволинейную. Цилиндрическая заготовка приобретает бочкообразный вид. Чем больше силы трения на контактных поверхностях, тем сильнее отстает течение слоев металла, примыкающих к контактным плоскостям, от течения центральных слоев металла, и тем больше кривизна боковой поверхности осаживаемой заготовки после деформации.

При осадке заготовки с отношением исходной высоты H_0 к исходному диаметру D_0 менее двух, наибольший диаметр бочки получается обычно на середине высоты (рисунок 1). При неодинаковых условиях трения (температуры) на торцах заготовки наибольший диаметр может смещаться вверх или вниз.

Весь объем деформируемой заготовки можно условно разбить на три зоны деформации (рисунок 2). Зона *I* состоит из двух областей «затрудненной» деформации, прилегающих к торцам заготовки. Зона *II* в осевом сечении заготовки имеет крестообразную форму, в этой зоне наблюдается наиболее интенсивная деформация. В зоне *III* интенсивность деформации больше, чем в зоне *I*, но меньше, чем в зоне *II*. При осадке заготовок из малопластичных материалов в зоне *III* возможно образование трещин, расположенных вдоль образующей.

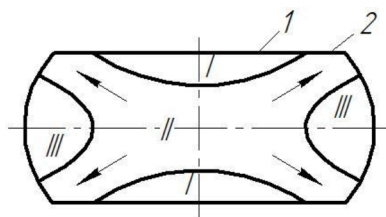


Рисунок 2 - Зоны деформации при осадке

Области деформации *I* и *II* образуют на каждом торце заготовки две зоны: внутреннюю 1, в которой металл практически не перемещается, и наружную кольцевую 2, в которой происходит интенсивное течение металла в радиальном направлении.

При $H_0/D_0 > 1$ увеличение торцевой поверхности исходной заготовки происходит главным образом за счет перетекания металла с боковой поверхности заготовки.

По мере увеличения степени осадки и сближения между собой зон *I*, последние сливаются с зоной *II*, а торцовые поверхности при $H/D < 1$ начинают увеличиваться главным образом за счет течения поверхностных слоев металла в радиальном направлении, причем переход боковой поверхности на торцы уменьшается. При этом также значительно уменьшается зона *III* – деформация по всему объему тела становится более однородной и бочкообразность заготовки уменьшается.

При $H_0/D_0 > 2$, т.е. когда зоны I весьма удалены друг от друга в начальный момент осадки можно наблюдать образование двойной бочки, а при $H_0/D_0 > 2,5$ – образование двух бочек с недеформированной еще цилиндрической частью между ними (рисунок 3). В обоих случаях по мере сближения зон I заготовка постепенно принимает вид обычной бочки. Однако при $H_0/D_0 > 2,5-3,0$ осадка цилиндрической заготовки, как правило, сопровождается продольным изгибом.

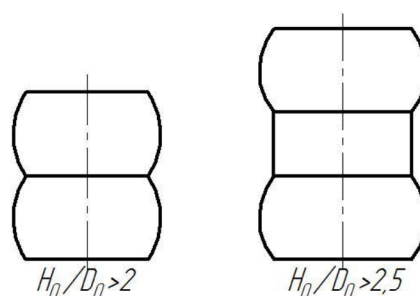


Рисунок 3 - Схемы деформации высоких заготовок

С увеличением степени деформации при осадке

$$\varepsilon = \frac{H_0 - H_{\kappa}}{H_0} 100\%$$

бочкообразность заготовки сначала увеличивается, достигая максимума, а затем уменьшается. Бочкообразность у низких заготовок меньше, чем у высоких. Повышение контактного трения во всех случаях увеличивает бочкообразность.

Для анализа процесса осадки цилиндрической заготовки применяют осесимметричное напряженное состояние. При его рассмотрении удобно пользоваться взамен декартовых цилиндрическими координатами, в которых положение любой точки A определяется радиус-вектором R , полярным углом θ и аппликатой z , как представлено на рисунке 4.

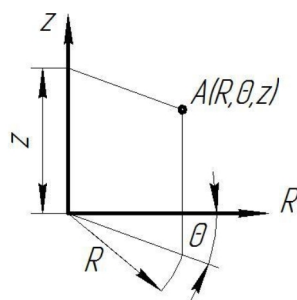


Рисунок 4 - Цилиндрическая система координат

Напряженно-деформированное состояние в любой точке деформируемой заготовки в цилиндрической системе координат описывается симметричными тензорами напряжений и деформаций

$$T_{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_R & 0 & \tau_{Rz} \\ 0 & \sigma_{\theta} & 0 \\ \tau_{zR} & 0 & \sigma_z \end{pmatrix}, \quad T_{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_R & 0 & \frac{1}{2}\gamma_{Rz} \\ 0 & \varepsilon_{\theta} & 0 \\ \frac{1}{2}\gamma_{zR} & 0 & \varepsilon_z \end{pmatrix},$$

где σ_R , σ_{θ} , σ_z – радиальное, тангенциальное и осевое нормальные напряжения соответственно;

τ_{Rz} – касательное напряжение;

ε_R , ε_{θ} , ε_z – радиальная, тангенциальная и осевая деформации соответственно;

γ_{Rz} – угловая деформация.

Интегральными характеристиками напряженно-деформированного состояния в рассматриваемой точке деформируемой заготовки являются:

- 1) интенсивность напряжений

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sigma_R - \sigma_{\theta}}^2 + \sigma_{\theta} - \sigma_z^2 + \sigma_z - \sigma_R^2 + 6\tau_{Rz}^2}$$

- 2) интенсивность деформаций

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{\varepsilon_R - \varepsilon_{\theta}}^2 + \varepsilon_{\theta} - \varepsilon_z^2 + \varepsilon_z - \varepsilon_R^2 + \frac{3}{2}\gamma_{Rz}^2}$$

Схема главных нормальных напряжений при осадке представляет собой схему всестороннего неравномерного сжатия. По схеме деформации осадка представляет собой сжатие – деформация в направлении активного усилия отрицательна, а две другие деформации положительны (рисунок 5).

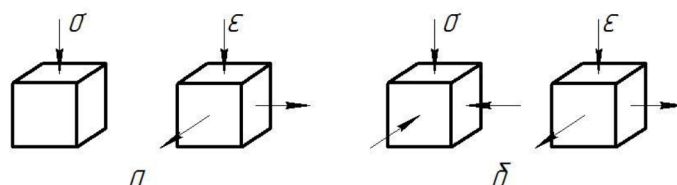


Рисунок 5 - Схемы главных напряжений и деформаций при осадке без контактного трения (а) и с контактным трением (б)

Об эпюрах распределения нормальных напряжений на контактных поверхностях можно судить по высоте гребешков, получаемых в процессе осадки цилиндрических образцов в бойках с вертикальной узкой щелью (рисунок 6).

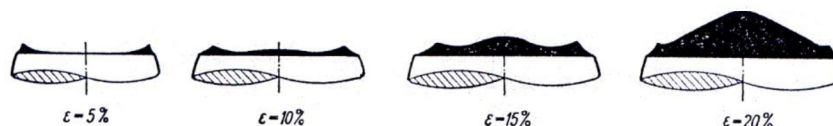


Рисунок 6 - Изменение высоты гребешка в зависимости от степени осадки

При малых степенях деформации и высоких заготовках эпюры распределения нормальных контактных напряжений могут иметь вогнутый характер, т.е. напряжения в периферийных областях контактной плоскости больше, чем в центре. При большой степени деформации и низких заготовках напряжения в центральной области превосходят напряжения на периферийных областях контактной плоскости.

Из изложенного следует, что процесс деформации металла при осадке цилиндрических заготовок плоскими параллельными бойками весьма сложен.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Описание программного комплекса *DEFORM-2D*

Программный комплекс *DEFORM-2D* предназначен для моделирования процессовковки, объемной штамповки, волочения, прокатки, прессования и содержит следующие особенности:

1. Условное деление на препроцессор, процессор (решатель) и постпроцессор, что позволяет сделать работу для пользователя наиболее удобной и наглядной.

2. Представление всей информации в файле базы данных с расширением «*bd*», который создаётся в препроцессоре и содержит необходимую для расчёта информацию, а после осуществления моделирования дополняется результатами расчета и может быть использован для работы в постпроцессоре.

3. Поскольку в файле базы данных информация представляется в виде, удобном для расчёта, т.е. таком виде, чтобы решатель мог быстро прочитывать этот файл и дописать в него полученную информацию, то файл базы данных имеет большой объём, поэтому перемещать и копировать файл базы данных в большинстве случаев неудобно. Поэтому в программе *DEFORM-2D* формируется небольшой файл с расширением «*key*», который в компактном виде содержит всю информацию, необходимую для создания базы данных.

Создание новой задачи

Запустите *DEFORM-2D*, указав левой кнопкой мыши (ЛКМ) последовательно **Пуск** → **Программы** → *DEFORM-2D*. Будет вызвано **Главное окно** *DEFORM-2D*, показанное на рисунке 7.

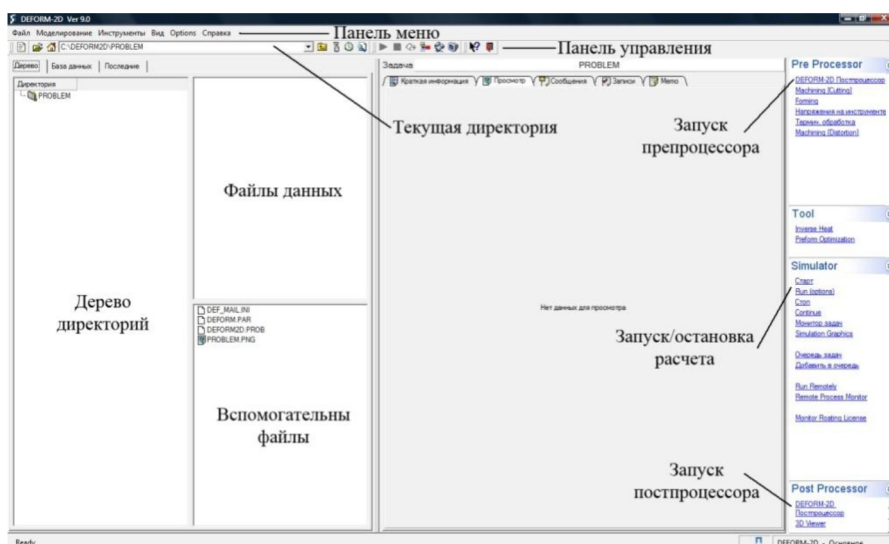


Рисунок 7 - Главное окно *DEFORM-2D*

Рассмотрите расположение панелей и кнопок. В верхней части окна находится **Панель меню**, содержащая меню: **Файл**, **Моделирование**, **Инструменты**, **Вид**, **Настройки**, **Справка**. Рассмотрим наиболее часто используемые команды меню – **Файл** и **Моделирование**.

Меню **Файл** содержит команды, используемые для создания новых задач, и перемещения между директориями каталога операционной системы. Команда **Новая задача**  позволяет создать новую задачу и запустить препроцессор, позволяющий задавать исходные данные. Команда **Выход**  позволяет выйти из программы.

Меню **Моделирование** необходимо для запуска задачи на расчет и управления задачами в ходе расчета. Для запуска задачи на расчет и аварийной остановки расчета используются команды **Старт**  и **Стоп** , вынесенные на **Панель управления**, расположенную непосредственно под **Панелью меню**.

В левой части экрана в **Главном окне** расположено **Дерево директорий**, которое отражает текущее расположение задачи по отношению к **Дереву каталогов**. В активной строке **Текущая директория** указана директория (папка) являющаяся корневой в окне **Дерево директорий**.

Создайте новую задачу, выбрав из меню **Файл** пункт **Новая задача** или нажав кнопку  на **Панели управления**.

Появится окно **Параметры задачи**, в котором необходимо определить особенности моделируемого процесса. Не указывая тип решаемой задачи, нажмите кнопку **Next**, для того чтобы запустить препроцессор (тип задачи можно определить в препроцессоре).

В следующем окне снова нажмите на кнопку **Next**, приняв, что задача создается в "домашней" директории (по умолчанию это директория «*PROBLEM*», расположенная в папке «*DEFORM-2D*»).

В появившемся окне необходимо указать название задачи. Название задачи должно быть набрано английскими литерами без пробелов. Дайте название задачи, набрав *OSADKA*.

Нажмите кнопку **Finish**, произойдет запуск препроцессора *DEFORM-2D*. Его интерфейс состоит из нескольких частей (рисунок 8), а именно: **Окно-дисплей** (*Display window*), **Дерево Объекта** (*Object Tree*) и **Данные объекта** (*Object Data*). Также вверху экрана находится **Панель меню** и **Панель управления**, содержащие ряд кнопок. Наиболее часто используемые кнопки, расположенные на **Панели управления** представлены в приложении А.

Нажмите кнопку **Simulation controls**  (настройки задачи), появится окно **Simulation controls**, в котором по умолчанию будет активна закладка **Основное** (рисунок 9). Убедитесь в том, что в качестве системы измерения установлена система «СИ» (напротив надписи «СИ» должен стоять флажок) и выбран режим расчета деформаций (галочка напротив надписи «Деформирование»), а решаемая задача обладает геометрической осевой симметрией (флажок напротив «Осесимметричная»). Для завершения работы с окном **Настройки задачи** нажмите кнопку **ОК**.

Обратите внимание на то, что в **Дереве объектов** после создания задачи был создан всего один исходный объект, а именно *Workpiece* (заготовка). Этот объект выделен в **Дереве объектов**, а на **Панели инструментов** активен пункт **Общее** (рисунок 10).

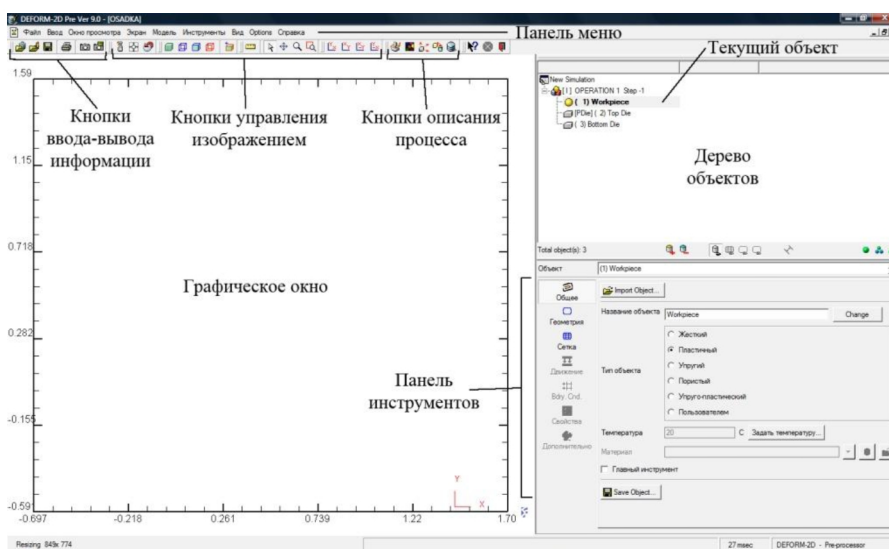


Рисунок 8 - Интерфейс препроцессора

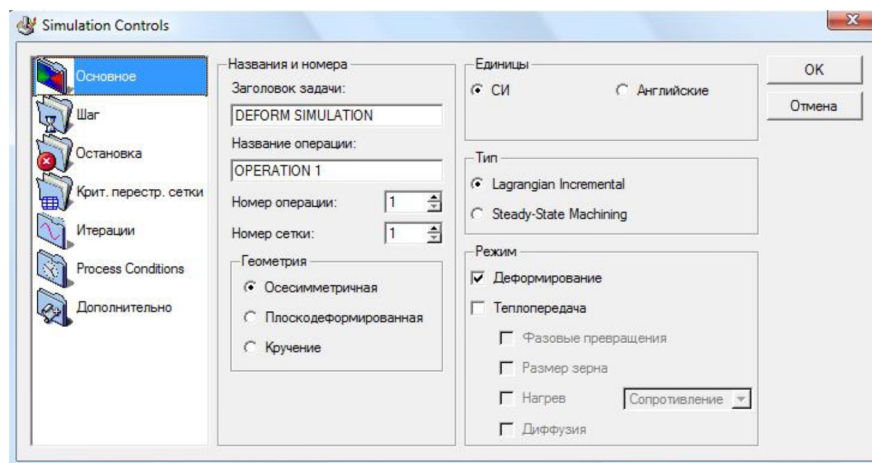


Рисунок 9 - Окно **Настройки задачи**

Пункт **Общее** позволяет:

- 1) выбрать тип объекта участвующего в расчете (жесткий, упругий, пластичный, пористый и упруго-пластичный);
- 2) выбрать марку материала из библиотеки;
- 3) указать исходную температуру объекта;

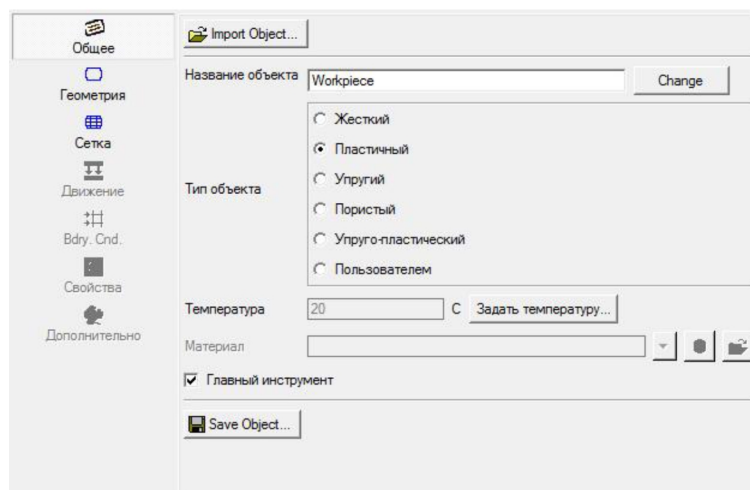
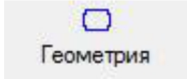


Рисунок 10 - Пункт **Общее** из **Панели инструментов**

4) сохранять в отдельном файле и импортировать объект из задач, которые решались ранее.

Все типы объектов используемые в *DEFORM-2D* кроме жесткого объекта, должны иметь сетку конечных элементов.

Непосредственно под пунктом **Общее** на **Панели инструментов** располагается пункт **Геометрия** , позволяющий работать с геометрией моделируемых объектов.

Построение модели заготовки

По умолчанию при создании новой задачи программа сама создает в **Дереве объектов** один объект – заготовку. Геометрия объектов может быть получена построением по точкам, с помощью геометрических примитивов или импортирована из «*dxf*» и «*igs*» файлов.

Пункт **Геометрия** содержит четыре закладки (рисунок 11). Наиболее часто используемые кнопки пункта **Геометрия** представлены в приложении Б. По умолчанию осуществляется переход на закладку **Инструмент**, которая позволяет импортировать геометрию объекта из других программ, создавать геометрию с помощью примитивов, сохранять уже имеющуюся геометрию и т.д. Для создания и редактирования геометрии с помощью средств *DEFORM-*

2D служит закладка **Edit** (редактирование), содержащая **Поле ввода геометрии** (пустая табличка) и вспомогательные кнопки. Построение геометрии может осуществляться по точкам (*XYR*) или с помощью отрезков-дуг (*Line-Arc*).

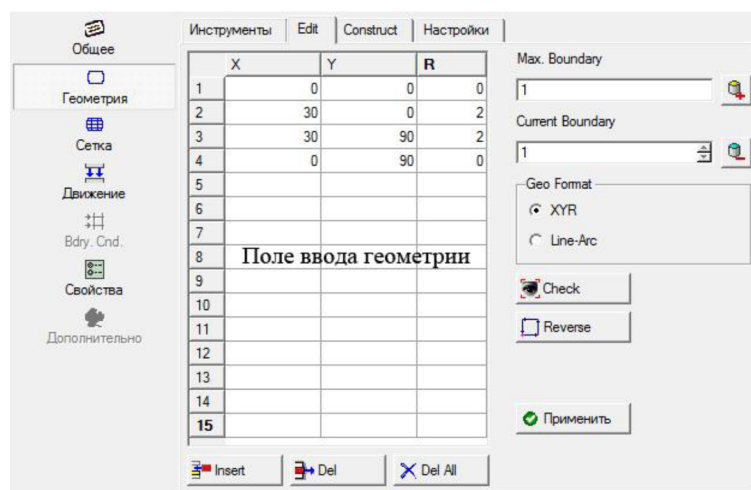


Рисунок 11 - Пункт **Геометрия** из **Панели инструментов**

Так как исходная заготовка диаметром 60 мм и высотой 90 мм осесимметричная (рисунок 12, а), то для моделирования достаточно рассмотреть ее правую часть.

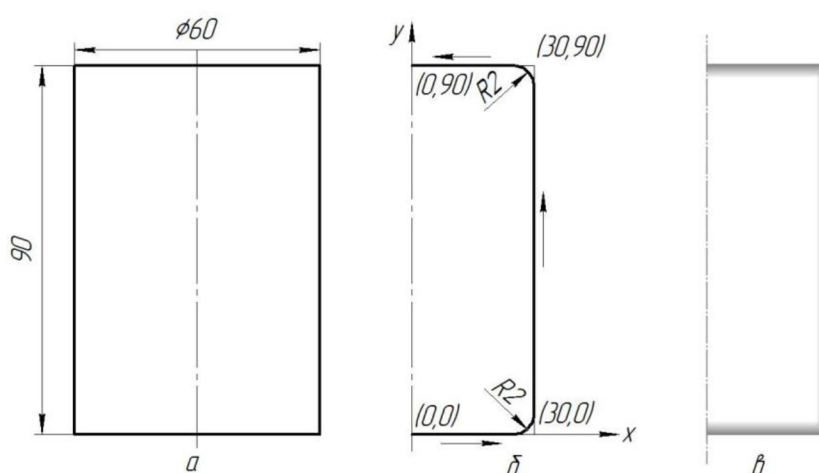
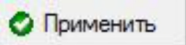


Рисунок 12 - Геометрия заготовки

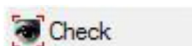
Перейдите к закладке **Edit** (рисунок 11). Нажмите ЛКМ на верхнюю левую ячейку **Поля ввода геометрии**, после чего последовательно введите значения, представленные на рисунке 12, б. После ввода очередного

значения, соответствующего данной ячейке, нажимайте на клавишу *Enter*, для перехода к следующей ячейке. После окончания ввода данных нажмите ЛКМ на кнопку **Применить** .

Разделение десятых долей осуществляется с помощью точки. При правильном вводе информации, введенные ранее значения должны выравниваться по правому краю ячейки.

Нажмите кнопку **Во весь экран**  на **Панели управления** для автоматического масштабирования изображения (функция этой команды будет объяснена ниже).

Рассмотрите полученную геометрию цилиндрической заготовки на рисунке 12, в. Обратите внимание на то, что с внутренней стороны поверхности располагается серая полоса, которая показывает направление обхода от начальной точки к конечной против часовой стрелки (определяет внутреннюю область объекта). Если серая полоса располагается с внешней стороны, то необходимо изменить направление обхода, нажав на кнопку **Reverse**  (разворот). Если серую полосу не видно, то необходимо выбрать ЛКМ пункт **Общее** затем выбрать ЛКМ пункт **Геометрия**.

После того как геометрия построена, ее желательно проверить. Нажмите кнопку **Check**  (проверить), а затем в появившемся окне (рисунок 13) нажмите на кнопку **Check & Correct Geometry** (проверить и исправить геометрию). Должно появиться сообщение «*Geometry is legal*», которое сообщает о том, что геометрия была построена верно. Для возвращения к пункту **Геометрия** нажмите ЛКМ клавишу **ОК** и еще раз **ОК**.

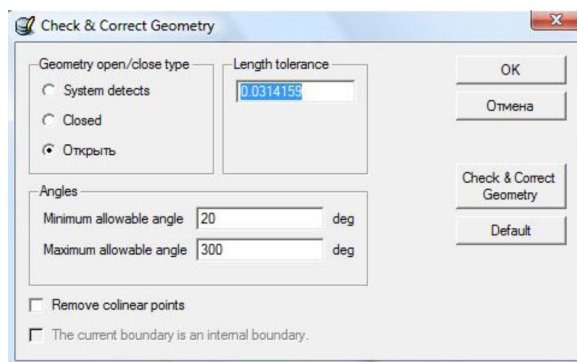
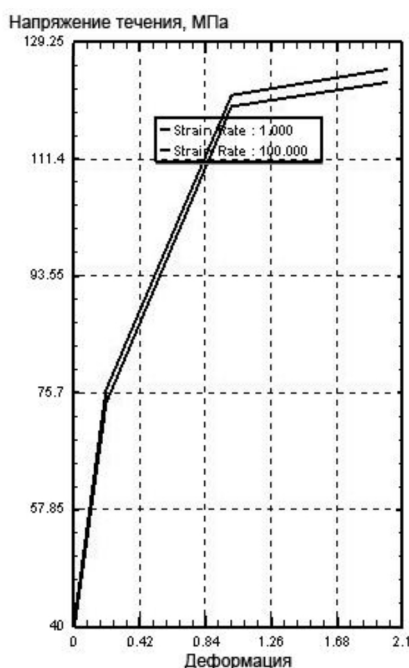
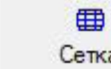


Рисунок 13 - Окно **Check & Correct Geometry**

Вызовите для редактирования заготовку (укажите ЛКМ в **Дереве объектов** заготовку *Workpiece*) и убедитесь в том, что в пункте **Общее** стоит тип объекта «Пластичный», температура 20°C.

Чтобы разбить модель заготовки на конечные элементы, выберите пункт **Сетка** , задайте количество конечных элементов 1000 и нажмите на кнопку **Генерировать сетку**. Обратите внимание на то, что после редактирования сетки конечных элементов напротив надписи *Workpiece* в **Дереве объектов** появилась надпись «undefined». Значок  (undefined) означает, что необходимо присвоить материал заготовке (определить свойства материала заготовки).

Перейдите в пункт **Общее** и нажмите на кнопку **Load material from library**  (загрузить материал из библиотеки), расположенную в строке **Материал**. Появится окно **Material Library** (библиотека материалов), в котором выберите группу материалов «*Aluminum*» (алюминиевые сплавы) и марку сплава «*Al-1100, COLD[70F(20C)]*», после этого нажмите ЛКМ на кнопку **Загрузить**. Обратите внимание на то, что вместо надписи «*undefined*» в **Дереве объектов** появилось название марки материала.

Просмотреть и отредактировать свойства выбранного материала можно, нажав на кнопку **Материал**  на **Панели управления**. Появится окно **Материал**, в котором на соответствующих закладках заданы все свойства материала. Например, нажав на кнопку  в строке **Flow Stress** (напряжение течения) на закладке **Пластичный**, можно просмотреть и отредактировать диаграмму «напряжение-деформация» (рисунок 14).

Построение модели инструмента

Для добавления в решаемую задачу дополнительного объекта (инструмента) воспользуйтесь кнопкой **Добавить объект** , которая находится под **Деревом объектов**. После добавления объекта в **Дереве объектов** появиться объект *Top Die* (верхний инструмент). Добавьте по аналогии с предыдущим пунктом объект *Bottom Die* (нижний инструмент). Инструмент (бойки) моделируют недеформируемым (тип объекта «Жесткий» в пункте **Общее**).

Каждый из объектов, созданных в программе, обладает набором индивидуальных свойств. В рассматриваемой нами задаче геометрия верхнего и нижнего объекта будет различной. Для задания геометрии тому или иному объекту необходимо выделить его щелчком ЛКМ в **Дереве объектов**, после чего система будет присваивать свойства (геометрию) именно этому объекту.

Сделайте активным верхний инструмент *Top Die* (укажите ЛКМ *Top Die* в **Дереве объектов**). С помощью геометрических примитивов, доступ к которым осуществляется через пункт **Геометрия** на **Панели инструментов** (закладка **Инструменты**, кнопка **Primitive**), постройте нижний инструмент с размерами по высоте 10 мм и радиусом 60 мм (рисунок 15). Для этого в окне **Geometry Primitive** (геометрические примитивы) необходимо выбрать тип объекта «*Cylinder*» и ввести при помощи клавиатуры в области **Размер** в строках **Width** (ширина) и **Height** (высота) значения, соответственно, 60 и 10 мм (рисунок 16). Нажать ЛКМ на кнопку **Create** (создать), а затем **Заккрыть**. Изображение в окне **Display** после задания геометрии верхнего инструмента приведено на рисунке 17, а.

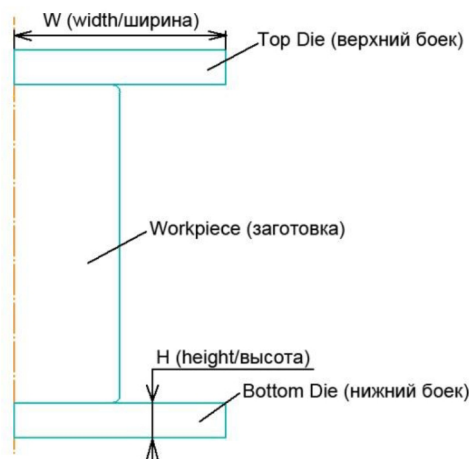


Рисунок 15 - Модель осадки

Для расположения объектов по отношению друг к другу необходимо воспользоваться пунктом **Object positioning**  (позиционирование объектов), который располагается на **Панели управления**. Описание команд данного пункта приведено в приложении В.

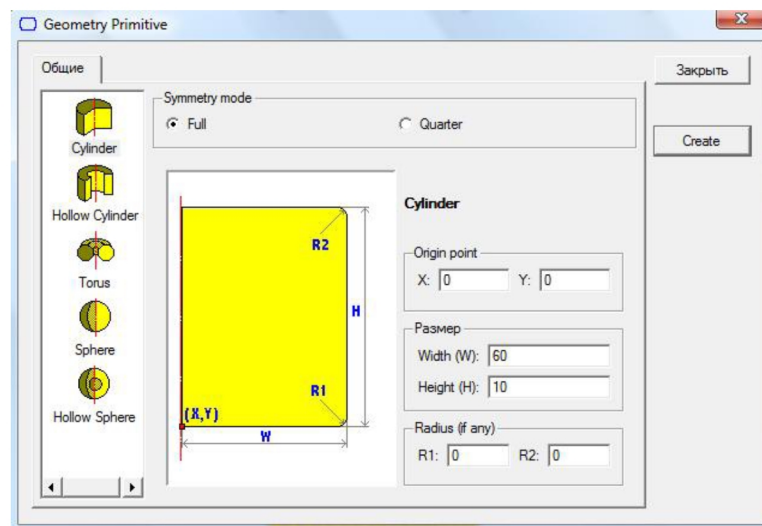


Рисунок 16 - Окно **Geometry Primitive**

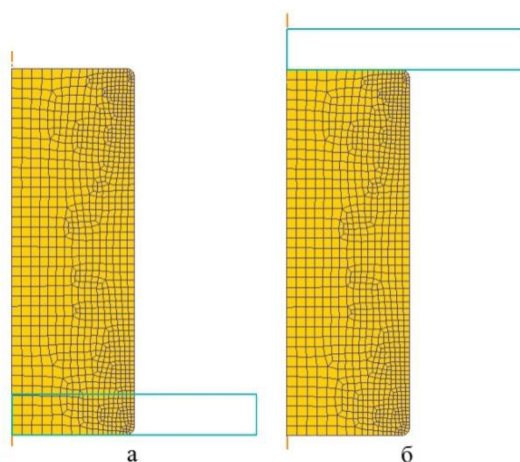


Рисунок 17 - Изображение в окне **Display** после задания геометрии (а)

и позиционирования (б) верхнего инструмента

Для наиболее точного и быстрого расположения объектов так, как это показано на рисунке 17, б, воспользуйтесь командой **Интерференция** окна **Позиционирование объектов**. Для использования команды необходимо установить флажок напротив надписи «Интерференция».

Затем нужно выбрать позиционируемый объект (в нашем случае *Top Die*) и объект, относительно которого будут размещены другие объекты (удобно использовать *Workpiece*). Определите объект, который будет размещаться или позиционироваться, нажатием ЛКМ на треугольник ▼ в строке **Позиционируемый объект** и выберите *Top Die*. В строке **Относительно, с**

помощью меню вызываемого нажатием ЛКМ на треугольнике ▾, выберите объект *Workpiece*.

Далее необходимо определить часть позиционируемого объекта, которая касается объекта, относительно которого осуществляется позиционирование (часть *Top Die*, которая касается *Workpiece*). Поскольку верхний инструмент (*Top Die*) касается заготовки (*Workpiece*) своей нижней частью, то необходимо поставить флажок напротив надписи «-Y» в блоке **Approach direction** (направление сближения). Нажмите ЛКМ кнопку **Применить**. Произошло расположение объектов так, как это показано на рисунке 17, б. Нажмите ЛКМ на кнопку **ОК**.

Сделайте активным нижний инструмент *Bottom Die* (укажите ЛКМ *Bottom Die* в **Дереве объектов**). По аналогии с верхним инструментом постройте с помощью геометрических примитивов нижний инструмент, приняв значения в строках **Width** и **Height**, соответственно, 60 и 10 мм.

По аналогии с верхним инструментом осуществите позиционирование нижнего инструмента. Только за направление сближения выберите «Y» в блоке **Approach direction**, а в качестве позиционируемого объекта *Bottom Die*. Изображение на экране должно принять вид, показанный на рисунке 18.

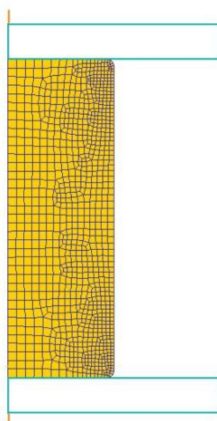


Рисунок 18 - Расположение заготовки и бойков на начальном этапе осадки

Сохраните полученную модель нажав на кнопку **Сохранить** , которая располагается на **Панели управления**.

Назначение контактных поверхностей при взаимодействии объектов

Нажмите на кнопку **Inter-object**  (взаимодействие объектов), расположенную на **Панели управления**, и на запрос системы о необходимости создания контактных пар, в появившемся окне ответьте положительно (нажмите кнопку **Yes**).

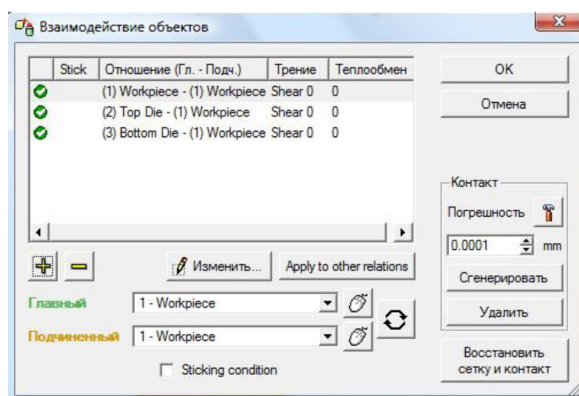


Рисунок 19 - Окно **Взаимодействие объектов** до задания исходных данных

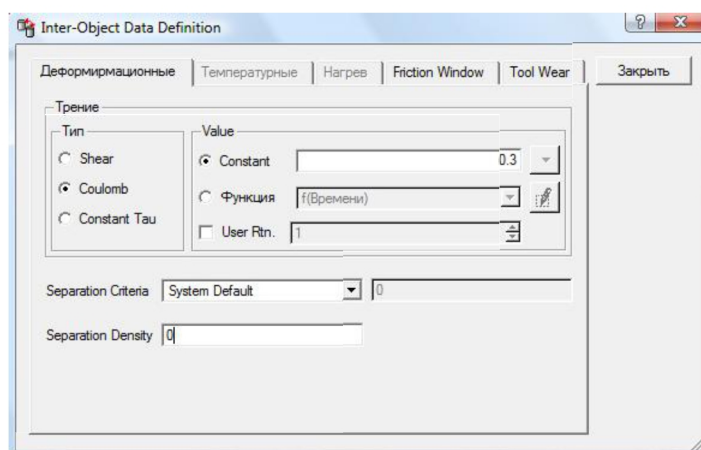


Рисунок 20 - Окно **Inter-Object Data Definition**

В окне **Взаимодействие объектов** (рисунок 19) нажмите кнопку **Изменить**  **Изменить...**, в появившемся окне поставьте флажок напротив надписи «*Coulomb*» (закон трения по Кулону) и укажите коэффициент трения равный 0,3 (рисунок 20). Нажмите кнопку **Закреть** в окне **Inter-Object Data**

Definition (определение свойств взаимодействия объектов). Нажмите на кнопку **Apply to other relations** (применить к другим парам) для того, чтобы присвоить значения коэффициента трения (условия взаимодействия объектов) всем контактными парам.

Для генерации величины точности, с которой компьютер может создать контактные пары, нажмите на кнопку **Погрешность** , после этого нажмите кнопку **Сгенерировать** для создания поверхностей контакта, при этом в окне **Display** появится изображение мест контакта (разноцветные точки в местах взаимодействия объектов). Нажмите кнопку **ОК** для выхода из окна **Взаимодействие объектов**.

Задание движения верхнего инструмента

В программе *DEFORM-2D* двигаться может любой объект, причём нет ограничений по количествудвигающихся объектов. Двигаться объекты могут как под действием приложенного усилия (т.е. двигаться с определённым усилием), так и с заданной скоростью.

По умолчанию все объекты являются неподвижными, т.к. приложенные к ним усилие и скорость равны нулю. Однако, если рассматривается процесс деформирования, то обязательно необходимо определить перемещение главного инструмента. Главным инструментом называется инструмент, под непосредственным перемещением которого осуществляется деформация заготовки.

В рассматриваемой нами задаче главным инструментом является *Top Die*, о чём свидетельствует значок «*PDie*», расположенный перед значком *Top Die* в **Дереве объектов**. При необходимости сделать главным инструментом можно любой объект с помощью постановки галочки в пункте **Главный инструмент** на закладке **Общее**.

Сделайте активным верхний инструмент *Top Die* для задания характеристики приложенного к верхнему инструменту движения (укажите *Top Die* в **Дереве объектов**).

Нажмите кнопку **Движение**  на **Панели инструментов**. Убедитесь, что напротив надписи **Скорость** стоит флажок, введите в активное окно, расположенное в самом низу, 1 мм/с (рисунок 21).

В соответствии с заданными условиями нагружения верхний инструмент будет перемещаться вниз с постоянной скоростью 1 мм/с.

Задание числа шагов расчета

Задание шага решения задачи может быть ограничено по времени и по перемещению главного инструмента. Для определения величины шага по перемещению необходимо произвести замер наименьшего размера сетки ко-

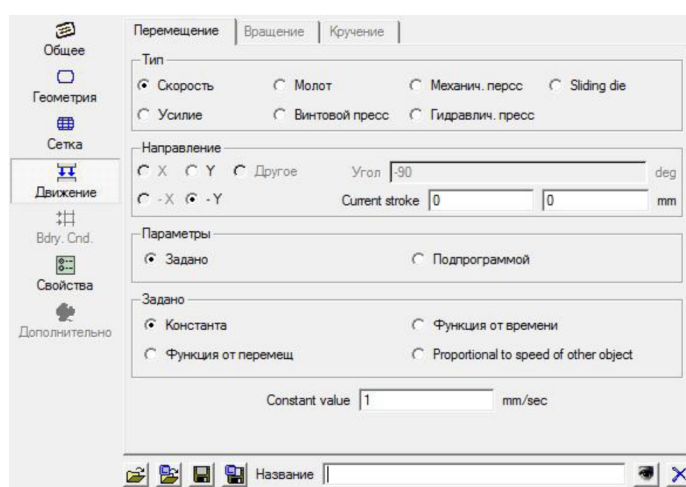


Рисунок 21 - Пункт **Движение** из **Панели инструментов**

нечных элементов заготовки при помощи кнопок **Увеличить**  и **Измерить** , расположенных на **Панели управления**, и данное значение разделить на три.

Нажмите на кнопку **Simulation controls**  на **Панели управления** и в появившемся окне **Simulation controls** перейдите на закладку **Шаг**. Затем

введите величину шага (результат деления) в ячейку расположенную в строке **With Equal Die Displacement** (рисунок 22).

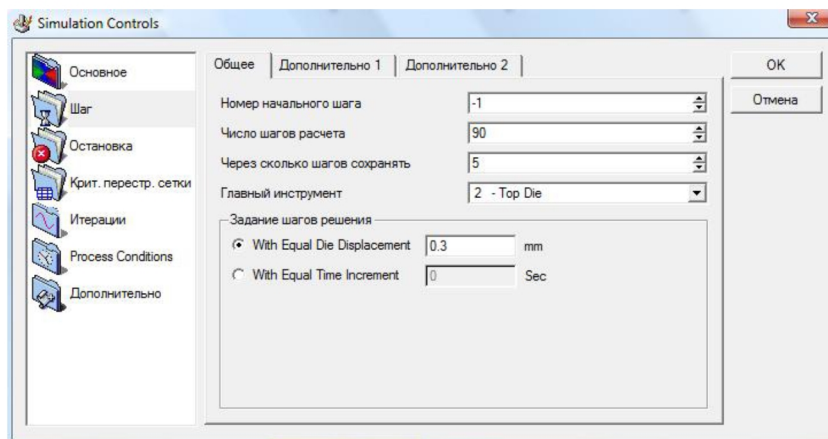


Рисунок 22 - Окно **Simulation controls** на закладке **Шаг**

Для того, что бы задать число шагов расчета необходимо перемещение главного инструмента разделить на размер шага по перемещению и полученное значение внести в ячейку в строке **Число шагов расчета** (рисунок 22). Перемещение главного инструмента определяется величиной степени деформации $\varepsilon = 30\%$ при осадке.

В строку **Через сколько шагов сохранять** введите 5 – интервал сохранения шагов в базу данных, а в строке **Главный инструмент** установите *Top Die*. Нажмите кнопку **ОК**.

Запись базы данных

Нажмите кнопку **Database generation**  (генерация базы данных), расположенную на **Панели управления**. В появившемся окне **Генерация базы данных** нажмите на кнопку **Проверить**. В случае если постановка задачи произведена корректно, то после проверки заданных данных появится сообщение «База данных может быть сгенерирована» (рисунок 23, а). Нажмите ЛКМ кнопку **Заккрыть** для выхода из окна **Генерация базы данных**.

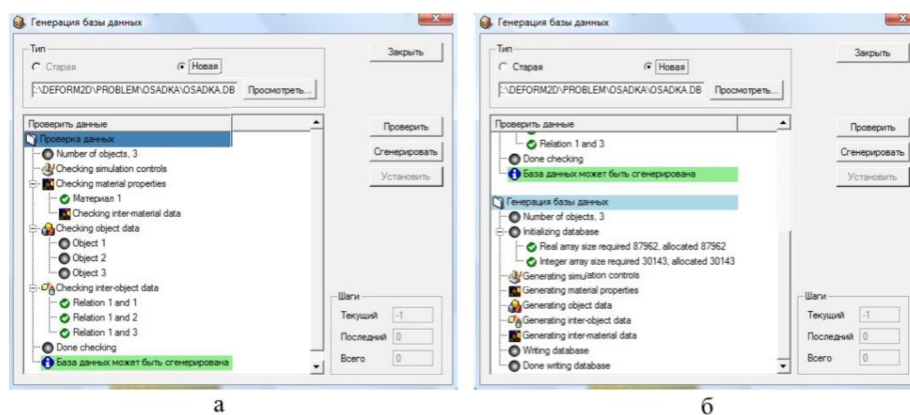


Рисунок 23 - Окно Генерация базы данных

после проверки исходных данных (а) и создания базы данных (б)

Сохраните данные нажав на кнопку **Сохранить** , расположенную в верхней левой части экрана на **Панели управления**. Выйдите из препроцессора, нажав ЛКМ на кнопку **Выход** .

Обратите внимание на то, что работа осуществлялась только с файлом с расширением «*key*». Название файла будет соответствовать тому названию, которое Вы давали задаче при ее создании. В нашем случае файл назван «*OSADKA.KEY*».

Откройте в препроцессоре решаемую ранее задачу. Для этого нужно в правой верхней части экрана в пункте **Pre Processor** нажать на надпись «*DEFORM-2D Постпроцессор*» (при локализации программного комплекса допущена ошибка в переводе). Произойдет запуск препроцессора.

Нажмите кнопку **Database generation** . В появившемся окне **Генерация базы данных** нажмите на кнопку **Сгенерировать**, в поле создания базы данных появится сообщение «Запись базы данных завершена», свидетельствующее о том, что база данных была успешно создана (рисунок 23, б).

Выйдете из препроцессора, нажав ЛКМ на кнопку **Выход** , и убедитесь в том, что рядом с файлом с расширением «*key*» появился файл с расширением «*db*».

Проведение моделирования

В пункте **Simulator** в **Главном окне** нажмите кнопку **Старт** или кнопку  на **Панели управления**. В появившемся окне с сообщением «*The simulation has been submitted*» нажмите ЛКМ на кнопку **ОК**.

Нажмите на закладку **Сообщения** для вывода информации о том, какой шаг рассчитывается в настоящий момент. Обратите внимание на то, что файл базы данных (файл с расширением «*db*») скрыт зелёной полосой с красной надписью **Running**, которая означает, что в данный момент задача рассчитывается. Прежде чем перейти к следующему пункту работы, дождитесь, пока расчет закончится, т.е. исчезнет зелёная полоска и надпись **Running**.

Анализ результатов моделирования

Для вывода информации полученной в ходе моделирования используется постпроцессор. Что бы открыть решаемую задачу в постпроцессоре нажмите ЛКМ в пункте **Post Processor** на надпись «*DEFORM-2D* Постпроцессор».

После загрузки задачи в постпроцессоре с помощью кнопок, представленных в приложении Г и Д, проведите анализ полученных результатов моделирования. Перейдите на последний шаг расчета, нажав на кнопку **Last step**  (последний шаг) на **Панели управления**.

Посмотрите картину течения металла по искажению координатной сетки (рисунок 24) и векторному полю перемещений (рисунок 25). Для построения координатной сетки (рисунок 24) нажмите кнопку **Flow Net**  (динамическая сетка) на **Панели управления** и в появившемся окне **Flow Net** в строках **Starting step** и **Ending step** введите соответственно номер

первого (-1) и последнего шага. Нажмите кнопку **Next**, выберите тип сетки *Rectangular* (прямоугольная) и снова нажмите **Next**. В новом окне укажите параметры сетки – введите в поле **Number of grids** количество разбиений по оси X и Y – 4 и 9. Нажмите ЛКМ кнопку **Next**, а затем **Finish**.

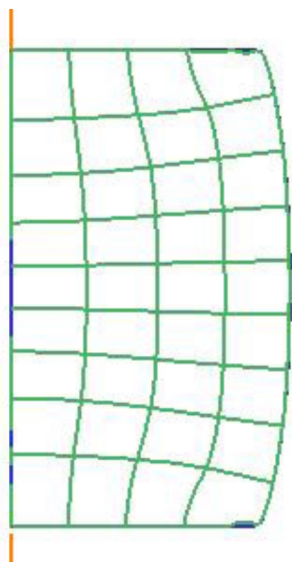


Рисунок 24 -
Координатная сетка

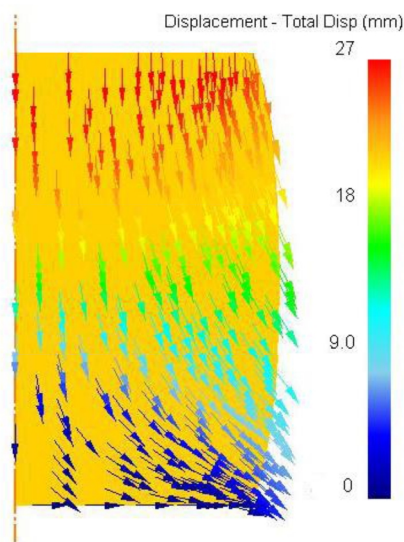


Рисунок 25 - Векторное
поле перемещений

Для отображения векторного поля перемещений (рисунок 25) нажмите кнопку **Параметры**  на **Панели управления**, затем в окне **Параметры** в дереве переменных выберите тип переменной «*Displacement*» (перемещение) и подтип «*Total Disp*» (суммарное перемещение). В разделе **Экран** установите флажок напротив надписи «*Vector plot*» (векторное поле). Нажмите **Apply**, а затем **Close** для закрытия окна.

Опишите характер изменения усилия осадки (рисунок 26) и нормальных напряжений на контактной поверхности (рисунок 27). Для построения графика усилия нажмите кнопку **График (Усилия-Перемещения)** , а затем в разделе **X-axis** (ось X) установите флажок напротив надписи «Перемещ». Нажмите **OK**.

Перед построением графика изменения нормальных напряжений на контактной поверхности (рисунок 27) необходимо отобразить распределение этих напряжений в деформируемой заготовке. Для этого нажмите кнопку **Параметры** , затем выберите тип переменной «*Stress*» (напряжение) и подтип «*Z*» (осевое). В разделе **Scaling** (масштаб) установите флажок напротив надписи «*Local*» (локальный масштаб для текущего шага). Нажмите **Apply**, а затем **Close**. Нажмите ЛКМ на кнопку **Параметры между двумя точками** , в появившемся окне перейдите на закладку **Following Boundary** (по границе) и

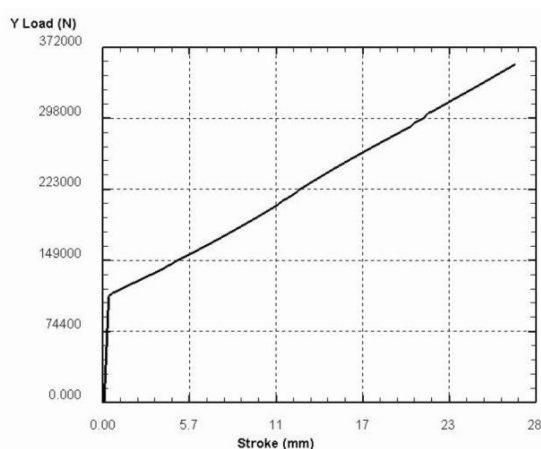


Рисунок 26 - График усилия осадки в зависимости от перемещения верхнего бойка

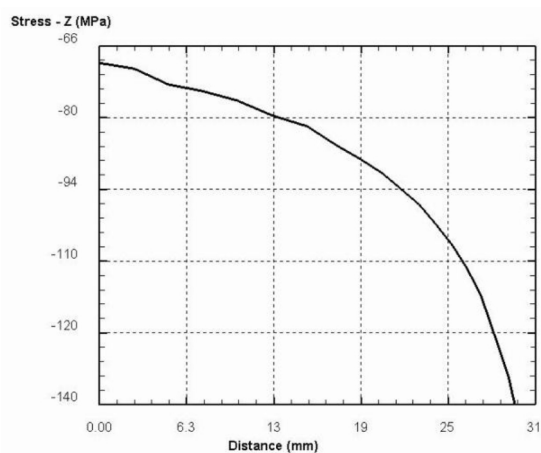
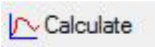


Рисунок 27 - График распределения нормальных напряжений на контактной поверхности заготовка-боек

в разделе **Sampling Points** (ключевые точки) передвиньте ползунок на значение 1000. В окне **Display** щелчком ЛКМ укажите крайние точки контактной поверхности заготовка-боек (верхний или нижний). Нажмите на кнопку **Calculate**  (расчет), а затем **Заккрыть**.

Дайте анализ напряженно-деформированного состояния по рисункам 28 и 29. Как и в предыдущем случае для отображения распределения интенсивности напряжений и деформаций (рис) нажмите на кнопку **Параметры** , затем выберите тип переменной «*Stress*» («*Strain_Total*») и подтип «*Effective*» («*von Mises*»). В разделе **Экран** установите флажок напротив надписи «*Solid*» (сплошной), а в разделе **Scaling** установите флажок напротив надписи «*Local*». Нажмите **Apply**, а затем **Close**.

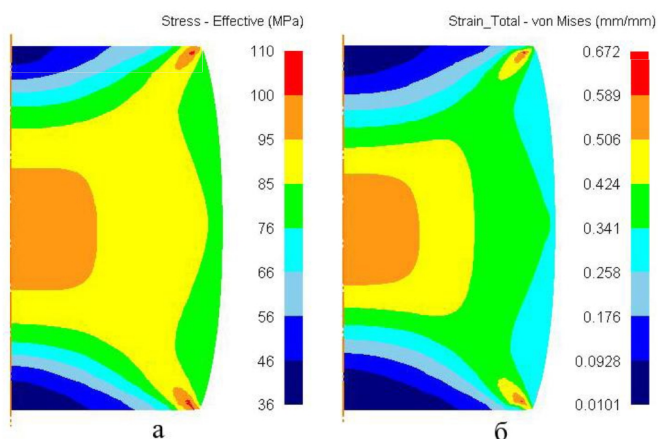


Рисунок 28 - Распределение интенсивности напряжений (а) и деформаций (б)

Для того чтобы узнать напряженное состояние в точке (рисунок 29, а), нажмите на кнопку **Элементы объекта**  и в появившемся окне перейдите на закладку **Stress** (напряжение). Затем щелчком ЛКМ в окне **Display** укажите анализируемую точку заготовки, при этом выбранный элемент изменит цвет на зеленый. В окне **Element Data** в строках **X/R**, **Y/Z**, **Z/Theta** и **XY/RZ** отображаются текущие значения соответственно радиального, осевого, тангенциального и касательного напряжений в МПа.

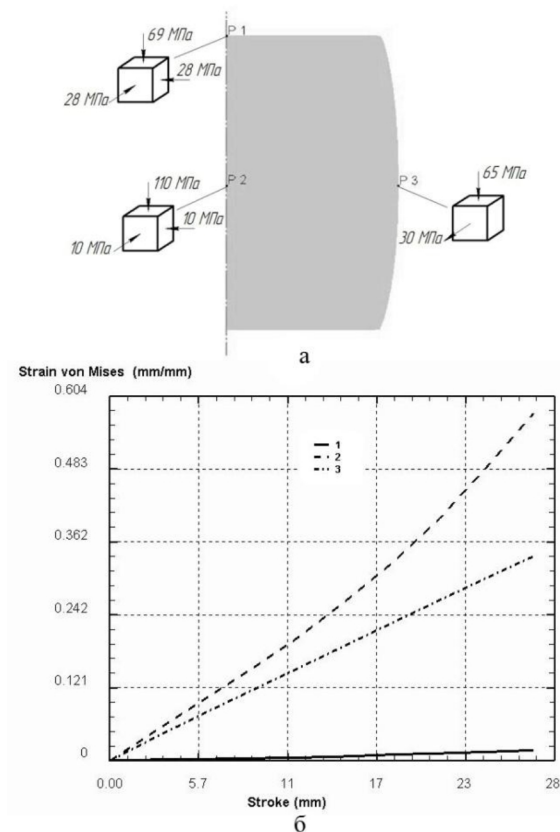


Рисунок 29 - Напряженное состояние (а) и характер изменения ε_i в зависимости от перемещения (б)

Перед построением графика изменения интенсивности деформаций (рисунок 29, б) необходимо отобразить распределение этих деформаций в деформируемой заготовке, используя кнопку **Параметры** . Затем нажать на кнопку **Отслеживание точек** , щелчком ЛКМ в окне **Display** указать нужные точки на заготовки и в окне **Отслеживание точек** нажать **Next**, а потом **Finish**.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе оформляется в текстовом редакторе *MS Word* и должен состоять из следующих структурных элементов:

1. Титульный лист (образец оформления приведен в приложении Е).
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения:

- сущность процесса осадки;
 - схема осадки цилиндрической заготовки плоскими бойками.
4. Результаты моделирования осадки:
- компьютерная модель осадки;
 - искажение координатной сетки и векторное поле перемещений при осадке;
 - график усилия осадки в зависимости от перемещения;
 - распределение интенсивности напряжений и деформаций;
 - схемы главных нормальных напряжений в центре осаженной заготовки и в области наибольшей бочкообразности;
 - график распределения нормальных напряжений на контактной поверхности заготовка-боек.
5. Анализ полученных результатов моделирования.
6. Выводы по проведенным исследованиям.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение процесса осадки заготовок между плоскими параллельными бойками.
2. Перечислите области использования осадки.
3. Перечислите основные зоны деформации при осадке.
4. Что можно наблюдать при осадке высоких заготовок?
5. Как влияют силы трения на течение металла при осадке?
6. Опишите схемы главных нормальных напряжений и деформаций при осадке.
7. В каких областях при осадке могут возникнуть трещины?
8. Как распределяются нормальные напряжения на контактной поверхности?
9. Для моделирования каких процессов ОМД используется программ *DEFORM-2D*?
10. Перечислите способы построения геометрии заготовок и

деформирующего инструмента в *DEFORM-2D*.

11. За что отвечает окно **Simulation controls** (настройки задачи)?
12. Как расположить объекты по отношению друг к другу?
13. Как задают условия трения на контактных поверхностях заготовка-инструмент?
14. Как подсчитать число шагов по перемещению главного инструмента?
15. Зачем нужно создавать базу данных?
16. Какой инструмент называют главным?

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Брюханов, А.Н. Ковка и объемная штамповка [Текст]/А.Н. Брюханов – М.: Машиностроение, 1975. – 408 с.
2. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением [Текст]/М.В. Сторожев, Е.А. Попов – М.: Машиностроение, 1971. – 424 с.
3. Харламов, А.А. DEFORM-2D: лабораторные работы [Текст]/А.А. Харламов – М.: Артех, 2000. – 93 с.