

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ (МАМИ)"
/УНИВЕРСИТЕТ МАШИНОСТРОЕНИЯ/

Воронков В.И, Петров П.А., Потапенко К.Е.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
для выполнения практических работ по курсу
«Компьютерные технологии
в машиностроении» для студентов направления 150700.68
– «Машиностроение»

Одобрено методической комиссией по направлению:
150700.68 – Машиностроение

МОСКВА
2013

Разработано в соответствии с Федеральным Государственным образовательным стандартом ВПО 2009 г. для направления 150700.68 – «Машиностроение»

Рецензенты:

доцент кафедры «КиОД» Университета машиностроения С.А. Типалин

доцент кафедры «Сопротивление материалов» Университета

машиностроения В.В. Богданов

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ по выполнению лабораторных работ по курсу «Компьютерные технологии в машиностроении» для студентов направления 150700.68 – Машиностроение / Воронков В.И, Петров П.А., Потапенко К.Е. – М.: Университет машиностроения, 2013. – 44 с.

В методических указаниях сформулированы задачи для выполнения трёх практических работ. Представлены варианты для выполнения практических работ, краткий теоретический материал по теме каждой работы, контрольные вопросы и задания. При выполнении практических работ учащийся должен овладеть навыками работы с такими программами как Matlab и Qform применительно к обработке данных экспериментов и расчётов процессов горячей объёмной штамповки.

Выполнение практических работ формируют следующие компетенции учащегося: способность выбирать аналитические и численные методы при разработке математических моделей технологических процессов в машиностроении (ОК-6); умение применять прикладные программные средства при решении практических вопросов (ОК-8); способность разрабатывать физические и математические модели исследуемых процессов, организовывать проведение экспериментов с анализом их результатов (ПК-20).

© Воронков В.И, Петров П.А., Потапенко К.Е.

2013.

© Университет машиностроения, 2013.

Введение

Данные методические указания составлены для выполнения трёх практических работ по курсу "Компьютерные технологии в машиностроении". При последовательном выполнении данных работ учащийся должен научиться при помощи программы Matlab обрабатывать экспериментальные данные механических испытаний, направленных на построение, кривых текучести; осуществлять корректировку значений сопротивления деформации учитывающую контактное трение и тепловой эффект пластической деформации; определять по найденным кривым текучести неизвестные коэффициенты математических моделей сопротивления деформации. Полученные модели сопротивления деформации могут быть использованы при расчёте процессов горячей штамповки, в том числе и при моделировании механических испытаний в программе Qform, последнее является целью третьей практической работы. Таким образом, учащийся используя современные программные продукты, ставит задачу моделирования механических испытаний и имеет возможность оценить точность полученных расчётов относительно реального эксперимента, что позволит приобрести не только навыки по использованию указанных программ при расчётах процессов горячей объёмной штамповки, но и научиться анализировать полученный результат, делать оценку корректности моделирования и повышать точность расчётов за счёт изменения входных данных, неточность которых выявляется при анализе результатов моделирования.

При проведении механических испытаний, направленных на построение кривых текучести, экспериментальными данными являются диаграммы, построенные в координатах "перемещение-сила". По диаграммам силы определяются кривые текучести, представляющие собой зависимость напряжения текучести от накопленной деформации. Кривые текучести определяются для постоянной температуры и постоянной скорости деформации. Однако, при проведении испытаний методом сжатия из-за наличия контактного трения напряжённое состояние не линейное, а из-за теплового эффекта пластической деформации температура во время эксперимента повышается, это необходимо учитывать при расчёте напряжения текучести. Кривые текучести скорректированные с учётом контактного трения и теплового эффекта пластической деформации называются "изотермическими", т.е. определёнными для постоянной температуры. На определение "изотермических" кривых текучести направлена первая практическая работа.

Зависимость напряжения текучести от накопленной деформации можно определять множеством "изотермических" кривых текучести, а можно при помощи математической модели сопротивления деформации. Последний способ является более универсальным и удобным, как с точки зрения хранения и передачи справочной информации так и с точки зрения ввода данных по материалу при моделировании процессов горячей объёмной штамповки. Эмпирические модели сопротивления деформации представляют собой функцию нескольких переменных $\sigma_i = f(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}, T)$, содержащую некоторый набор коэффициентов, точные значения которых позволяют описать изменение напряжения текучести σ_i при изменении накопленной деформации ε_i , скорости деформации $\dot{\varepsilon}$ и температуры T для конкретного материала. Задача по определению неизвестных коэффициентов математических моделей сопротивления деформации решается при выполнении второй практической работы.

Проверить точность полученной математической модели сопротивления деформации можно при сравнении экспериментальных и расчётных диаграмм силы. Последние могут быть получены при воспроизведении механических испытаний (в данном случае методом сжатия), при которых были получены экспериментальные диаграммы силы, путём моделирования. Одним из сложных этапов постановки задачи моделирования механических испытаний является определение закона перемещения траверсы прессы, который будет обеспечивать постоянство скорости деформации при

осадке образца. Также важно задать трение на контактной поверхности образца, при котором расчётная образующая образца будет соответствовать геометрии образца после осадки при проведении реальных испытаний. Методика постановки задачи моделирования механических испытаний и анализ результатов расчёта изучаются при выполнении третьей практической работы.

Практическое занятие №1

Построение "изотермических" кривых текучести

Задание

По предложенным экспериментальным данным построить "изотермические" кривые текучести.

Цель

Ознакомиться с методикой построения "изотермической" кривой текучести. Построить "изотермические" кривые текучести средствами программы Matlab.

Дано

1) Экспериментальные диаграммы силы, построенные в координатах "перемещение-сила". Экспериментальные диаграммы представлены в табличной форме в файле формата txt.

2) Свойства алюминиевых сплавов:

$\alpha = -0,007$ температурный коэффициент;

$c = 900 ((H \cdot m) / (kg / C^{\circ}))$ теплоёмкость;

$\rho = 7550 (kg / m^3)$ плотность алюминиевых сплавов.

3) Параметры эксперимента:

Образец 10×10 мм, $d_0 = 10$ мм диаметр; $h_0 = 10$ мм высота;

$\mu = 0,4$ коэффициент трения или $m = 0,8$ фактор трения,

4) Варианты заданий:

Таблица 1.1 Варианты заданий

Номер варианта	Материал	Температура, °C
1	AW-6082	300
2	AW-6082	350
3	AW-6082	430
4	AW-6082	510
5	АД35	300
6	АД35	350
7	АД35	430
8	АД35	510
9	АД31	300
10	АД31	350
11	АД31	430
12	АД31	510

Краткий теоретический материал

"Изотермическая" кривая текучести представляет собой зависимость напряжения текучести σ_i от величины накопленной деформации ε_i (рисунок 1.1) и характеризует сопротивление исследуемого материала деформации только вследствие действия в нем процессов обусловленных внутризеренной либо межзеренной деформацией. "Изотермическая" кривая текучести строится для фиксированного значения температуры нагрева деформируемого материала и фиксированного значения скорости деформации. Применение "изотермических" кривых текучести является целесообразным при решении задач ОМД с применением коммерческих компьютерных систем моделирования, основанных на численных методах, например, методе конечных элементов (МКЭ). "Изотермические" кривые текучести определяются по экспериментальным диаграммам силы построенным в координатах "перемещение-сила".

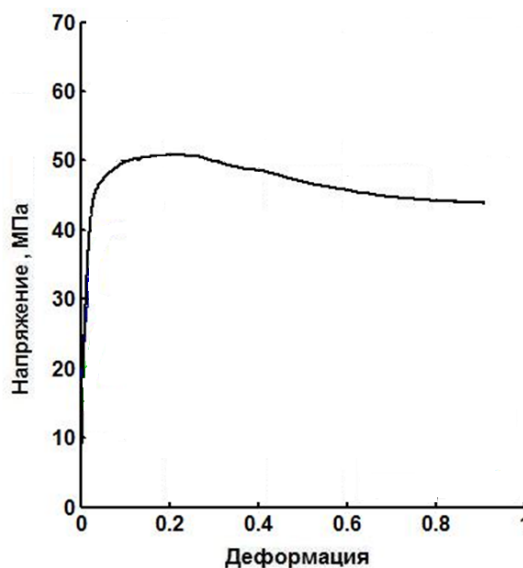


Рисунок 1.1 - Кривая текучести

Экспериментальные диаграммы силы можно получить при проведении испытаний по одному из трёх методов:

- метод испытаний на сжатие (ГОСТ 25.503-97);
- метод испытаний на растяжение (ГОСТ 1497-84);
- метод испытаний на кручение.

В данной работе используются диаграммы силы полученные при проведении механических испытаний методом сжатия цилиндрического образца. При проведении испытаний должны быть выдержаны следующие требования:

1) Деформирование образцов исследуемого материала выполняется при постоянной скорости деформации.

2) Деформирование образцов исследуемого сплава при постоянной скорости деформации выполняется в инструменте, нагретом до температуры испытания.

3) Рабочий инструмент (контейнер) нагревается с помощью нагревательного устройства. Нагрев инструмента без образца выполняется в течение 1-1,5 часа; с образцом – в течение 20 мин. Контроль температуры осуществляется с помощью термопары, введенной через стенку контейнера в его рабочее пространство. Точность измерения температуры $\pm 3^{\circ}\text{C}$.

4) Образцы для испытаний получают точением с последующим шлифованием торцевых поверхностей из прессованного прутка исследуемого сплава. Отклонение от номинального размера по высоте образцов не превышает $\pm 0,05\text{ мм}$.

5) После достижения требуемой температуры нагрева, контейнер с образцом исследуемого сплава извлекается из печи и устанавливается на неподвижный стол испытательной машины. Далее выполняется рабочий ход машины в соответствии с заранее заданной программой испытания.

При проведении механических испытаний методом сжатия цилиндрических образцов из сплавов АW-6082, АД35 и АД31 получены экспериментальные данные в виде зависимости силы деформации от перемещения инструмента. После первичной обработки экспериментальных данных, таких как устранение шумов, нахождение точки соответствующей началу осадки образца ("нулевой точки"), удаление данных при которых сила равна нулю, т.е. данных записанных контроллером испытательной машины до и после деформирования образца, обнуление всех показаний относительно найденной "нулевой точки", получают экспериментальную диаграмму силы, построенную в координатах "перемещение-сила". Сила - это сила деформирования образца. Перемещение - это перемещение траверсы машины (или величина на которую осажен образец от своей

начальной высоты). По полученным диаграммам силы можно построить "изотермические" кривые текучести, по методике, которая будет применяться в ходе выполнения данной практической работы.

Методика построения "изотермической" кривой текучести

1) Необходимо определить зависимость напряжения текучести от накопленной деформации.

Напряжение текучести σ_i определяется для каждого значения накопленной деформации ε_i по формуле:

$$\sigma_i = \frac{P_i}{F_i} \quad (1)$$

где P_i - сила деформации (определяется по диаграмме силы для каждого значения F_i), F_i - поперечная площадь образца (определяется под диаграмме силы для каждого значения накопленной деформации ε_i).

Значения поперечной площади образца F_i определяются по выражению:

$$F_i = \frac{\pi d_0^2 h_0}{4 h_i} \quad (2)$$

где d_0 - исходный диаметр образца; h_0 - исходная высота образца; h_i - высота образца (определяется для каждого значения перемещения траверсы s_m).

Значения накопленной деформации определяются по формуле:

$$\varepsilon_i = \ln \frac{h_0}{h_i} \quad (3)$$

Значения высоты образца определяются по выражению:

$$h_i = h_0 - s_m \quad (4)$$

где s_m - перемещение траверсы (определяются по диаграмме силы).

Определив для каждого значения перемещения траверсы s_m и силы деформирования P_i значения накопленной деформации ε_i и напряжения текучести σ_i нужно построить график полученной зависимости напряжения текучести σ_i от накопленной деформации ε_i .

2) Необходимо сделать корректировку значений напряжения текучести с учётом контактного трения.

При проведении испытаний смазка на контактные поверхности образца не наносилась. Поэтому, из-за наличия трения на контакте образца с инструментом, напряжённо деформированное состояние при осадке образца объёмное, и, следовательно на величину силы P_i , необходимой для деформации, оказывает влияние трение, возникающее на торцевых поверхностях образца. В результате сила, требуемая для деформации, получается завышенной, а, следовательно, при расчёте по формуле (1) завышается и величина рассчитанных напряжений σ_i . Чтобы получить "чистое" напряжение, на величину которого не влияет контактное трение, необходимо сделать корректировку по формуле:

$$\sigma_{mi} = \sigma_i / A \quad (5)$$

где σ_{mi} - напряжение текучести, скорректированное с учётом контактного трения; σ_i - значения напряжения текучести, полученные в первом пункте; A - поправочный коэффициент для учёта влияния трения.

Поправочный коэффициент A определяется по формуле:

$$A = 1 + \frac{m}{3\sqrt{3}} \frac{d_0}{h_0} \exp\left(-\frac{3\varepsilon_i}{2}\right) \quad (6)$$

где d_0 - исходный диаметр образца; h_0 - исходная высота образца; ε_i - текущее значение деформации; m - фактор трения.

Фактор трения принимаем $m=0,8$, т.к. данное значение фактора трения соответствует осадке без смазки (значение фактора трения также указано в разделе "Дано").

Определив значения напряжения текучести σ_{mi} для каждого значения накопленной деформации ε_i мы получаем кривую текучести скорректированную с учётом контактного трения.

3) Необходимо сделать корректировку значений напряжения текучести с учётом разогрева образца при пластической деформации и контактном трении.

В процессе осадки образец нагревается за счёт работы пластической деформации и трения торцов о поверхность инструмента. Т.к. с повышением температуры усиливается влияние разупрочняющих процессов, то напряжение текучести будет уменьшаться. Чтобы учесть разогрев образца в процессе деформации и построить "чистую" изотермическую кривую текучести нужно сделать корректировку напряжений σ_{mi} , посчитанных во втором пункте. Корректировка осуществляется по формуле Курнакова С.Н.:

$$\sigma_{ii} = \frac{\sigma_{mi}}{\exp(\alpha \Delta T_i)} \quad (7)$$

где σ_{ii} – напряжение текучести, скорректированное с учётом разогрева образца;
 σ_{mi} – напряжение текучести, скорректированное с учётом трения;
 α – температурный коэффициент;
 ΔT_i – значение приращения температуры образца относительно номинального значения температуры.

Значение ΔT_i определяется из уравнения теплового баланса:

$$Q_\varepsilon + Q_m = Q_n + Q_u + Q_a \quad (9)$$

где Q_ε – тепловая мощность пластической деформации; Q_m – тепловая мощность контактного трения; Q_n – тепловая мощность, затрачиваемая на нагрев образца; Q_u – тепловая мощность, отдаваемая торцевыми поверхностями образца штампу; Q_a – тепловая мощность, отдаваемая боковой поверхностью образца в окружающую среду.

Осадка образца осуществляется в изотермических условиях, поэтому можно принять допущение, что процесс является адиабатическим, и образец не отдаёт тепло в окружающую среду и штамп. Тогда уравнение теплового баланса принимает вид:

$$Q_\varepsilon + Q_m = Q_n \quad (10)$$

Тепловая мощность пластической деформации для цилиндрического образца определяется по выражению:

$$Q_\varepsilon = \pi r_i^2 h_i \sigma_i \dot{\varepsilon} \quad (11)$$

где r_i – радиус образца, соответствующий высоте h_i ;
 h_i – текущая высота образца;
 σ_i – напряжение текучести, определённое для соответствующего значения накопленной деформации ε_i , которое в свою очередь зависит от высоты образца h_i согласно выражению (3) (в нашем случае $\sigma_i = \sigma_{mi}$, которое уже скорректировано с учётом трения);

$\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации образца, т.к. при проведении механических испытаний скорость деформации постоянна, то данная величина является константой.

Тепловая мощность контактного трения может быть рассчитана по формуле:

$$Q_m = \frac{2}{3} \pi r_i^3 \mu \sigma_i \dot{\varepsilon} \quad (12)$$

где μ – коэффициент трения, для осадки без смазки принимаем $\mu=0,4$.

Тепловая мощность, затрачиваемая на нагрев образца, равна:

$$Q_a = \pi r_i^2 h_i c \rho \frac{dT_i}{dt} \quad (13)$$

где c - теплоёмкость материала образца; ρ - плотность материала образца; T_i - прирост температуры, ΔT_i в выражении (7), величина, которую необходимо определить из рассматриваемого уравнения баланса мощности; t - время.

Таким образом, уравнение теплового баланса будет выглядеть:

$$\pi r_i^2 h_i \sigma_i \dot{\varepsilon} + \frac{2}{3} \pi r_i^3 \mu \sigma_i \dot{\varepsilon} = \pi r_i^2 h_i c \rho \frac{dT_i}{dt} \quad (14)$$

Выразим из выражения (14) приращение температуры по времени:

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{\sigma_i \dot{\varepsilon}}{c \rho} + \frac{2 r_i \mu \sigma_i \dot{\varepsilon}}{3 h_i c \rho} \quad (15)$$

Если в выражении (15) вместо функций $r_i(\varepsilon_i)$ и $h_i(\varepsilon_i)$ в выражение 15 подставить значения конечного радиуса образца r_k и конечной высоты образца h_k , то точность решения понизится незначительно, а вычисления существенно упростятся. Значения r_k и h_k определяются для конечного значения накопленной деформации ε_k :

$$h_k = \exp(\ln(h_0) - \varepsilon_k) \quad (16)$$

$$r_k = \sqrt{\frac{d^2 h}{4 h_k}} \quad (17)$$

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{\sigma_i \dot{\varepsilon}}{c \rho} \left[1 + \frac{2 r_k \mu}{3 h_k} \right] \quad (18)$$

Кривые текучести строятся в координатах "накопленная деформация ε_i - напряжение σ_i ", следовательно значения напряжения текучести σ_i определяются функцией $\sigma_i(\varepsilon_i)$, зависящей от ε_i . Но приращение температуры dT_i определено по переменной t . Сделаем замену переменной:

$$\varepsilon = \dot{\varepsilon} t, \quad dt = \frac{1}{\dot{\varepsilon}} d\varepsilon.$$

Тогда выражение (18) примет вид:

$$dT_i = \frac{\sigma_i}{c \rho} \left[1 + \frac{2 r_k \mu}{3 h_k} \right] d\varepsilon \quad (19)$$

Таким образом значение T_i можно найти как определённый интеграл от 0 до ε_k выражения (19) по $d\varepsilon$:

$$T_i = \frac{1}{c \rho} \left[1 + \frac{2 r_k \mu}{3 h_k} \right] \int_0^{\varepsilon_k} \sigma_i d\varepsilon \quad (20)$$

$$T_i = \frac{1}{c \rho} \left[1 + \frac{2 r_k \mu}{3 h_k} \right] \Phi(\varepsilon) \Big|_0^{\varepsilon_k} \quad (21)$$

Определив по выражению (21) значения ΔT_i для каждого значения ε_i (при этом каждое значение ε_i в выражении (21) будет являться ε_k) делаем корректировку значений σ_{mi} по формуле (7). В результате получаем зависимость напряжений текучести σ_{ii} от накопленной деформации ε_i которая и будет являться искомой "изотермической" кривой текучести.

Ход выполнения работы (расчёт в программе Matlab)

1) Подготовка данных для расчёта

В соответствии со своим вариантом каждый учащийся получает файлы расширения "txt" в которых записаны экспериментальные диаграммы силы. Каждый файл соответствует одному проведённому испытанию: для конкретного материала, температуры и скорости деформации. Например, "АД35_300_01.txt" - файл содержащий диаграмму силы полученную в ходе проведения испытаний образца из алюминиевого

сплава АД35, при температуре $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ и скорости деформации $0,1\text{ c}^{-1}$. Каждый файл содержит две колонки: первая - колонка значений перемещения траверсы (в мм), вторая - колонка с соответствующими значениями сил (в кН) для данных перемещений.

Все расчёты будем проводить в программе Matlab.

В окне "Editor" программы Matlab создаём файл функцию в которой будем производить все вычисления, для этого делаем следующую запись:

```
function lab1()  
end
```

Название функции "lab1" должно совпадать с названием файла, в котором эта функция содержится, для этого сохраняем функцию в файл "lab1.m". В дальнейшем все записи будем делать между строками "function lab1()" и "end", т.е. внутри функции.

Загружаем файлы с диаграммами силы, и присваиваем данному массиву имя "A01", для этого необходимо записать команду:

```
A01=load('<Полный путь>\<Название файла (с расширением)>');
```

При этом название файла должно содержать только латинские буквы. Путь может быть любым. Например:

```
A01=load('C:\Users\АД35_300_01.txt');
```

"A01" - имя массива чисел, содержащихся в загружаемом файле, внутри функции "lab1".

Запишем начальные, общие, данные по размеру образца и свойствам материала (значения $\alpha=-0,007$ температурный коэффициент; $c=900((H\cdot m)/(kz/C^{\circ}))$ теплоёмкость; $\rho=7550(kz/m^3)$ плотность алюминиевых сплавов; $m=0,8$ фактор трения; $d_0=10$ мм диаметр; $h_0=10$ мм высота), переведя их предварительно в систему СИ:

```
h0=0.01; d0=0.01; a=-0.007; c=900; p1=7550; m=0.8;
```

Знак ";" после каждого значения позволяет вести запись в одну строку, а также скрывает вывод данных значений на дисплей в окне "Command Window".

2) Построение кривой текучести

Рассчитаем деформацию по выражению (3). Для этого внутри функции "lab1" создадим функцию "Def (X)", которая будет содержать выражение для расчёта деформаций:

```
function y=Def(X)  
y=log(h0./(h0-X(:,1)./1000));  
end
```

Важным правилом при создании внутренних функций является то, что внутренняя функция должна быть записана в самом конце файла функции (но, конечно перед "end" функции "lab1"), т.е. после того, как будут записаны все константы, написаны команды либо вызваны какие-нибудь функции.

Стоит обратить внимание на знак "." перед знаком "/". Оператор "/" означает что операция производится с массивами, т.е. производится поэлементное деление. Также при умножении и возведении в степень массивов нужно писать ".*", ".^". Функция "Def" рассчитана на работу с массивами, содержащимися в файлах задания, которые имеют два столбца данных, поэтому запись $X(:,1)$ - означает выбор первого столбца из входного массива данных. Все значения первого столбца (столбца перемещений) делим на 1000, т.к. значения в нём даны в мм.

Рассчитаем деформацию на примере материала AW-6082, температуре испытаний $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ и скорости деформации при испытаниях равной $0,1\text{ c}^{-1}$. При этом будем считать, что файл с диаграммой силы называется "AW300_01.txt". Для этого вызовем функцию "Def" и рассчитаем с её помощью значения деформации для перемещений, содержащихся в массиве "A01" (внутреннее имя массиву данных дано по аналогии с именем в пункте 1):

```
E01=Def(A01);
```

Предварительно, конечно, нужно убедиться, что перед записью с вызовом функции есть запись с загрузкой файла с данными `"A01=load('<Полный путь>\AW300_01.txt');"`, а после записи с вызовом функции есть вызываемая внутренняя функция.

Рассчитаем напряжение по выражениям (1), (2) и (4). Для этого создадим новую внутреннюю функцию "Napr":

```
function y=Napr(X)
    y=(4.*(h0-X(:,1)./1000).*(X(:,2).*1000))./(pi*d0^2*h0);
end
```

Запись `X(:,2)` - означает выбор второго столбца из массива данных. Все значения второго столбца (столбца силы) умножаем на 1000, т.к. значения в нём даны в *кН*.

Затем вызовем созданную внутреннюю функцию и рассчитаем с её помощью значения напряжения текучести по значениям массива "A01":

```
G01=Napr(A01);
```

Построим график полученной кривой текучести:

```
plot(E01,G01,'k')
```

Для этого используем команду "plot". Запись `'k'` - задаёт цвет линии на графике (в данном случае чёрный).

На рисунке 1.2 показано графическое отображение рассчитанной кривой текучести, построенной благодаря использованию команды "plot". Как видно из рисунка 1.2 значения напряжений в *Па* имеют большой порядок. Переведём значения напряжений в *МПа*:

```
plot(E01,G01./1e6,'k')
```

На рисунке 1.3 показан получившийся график.

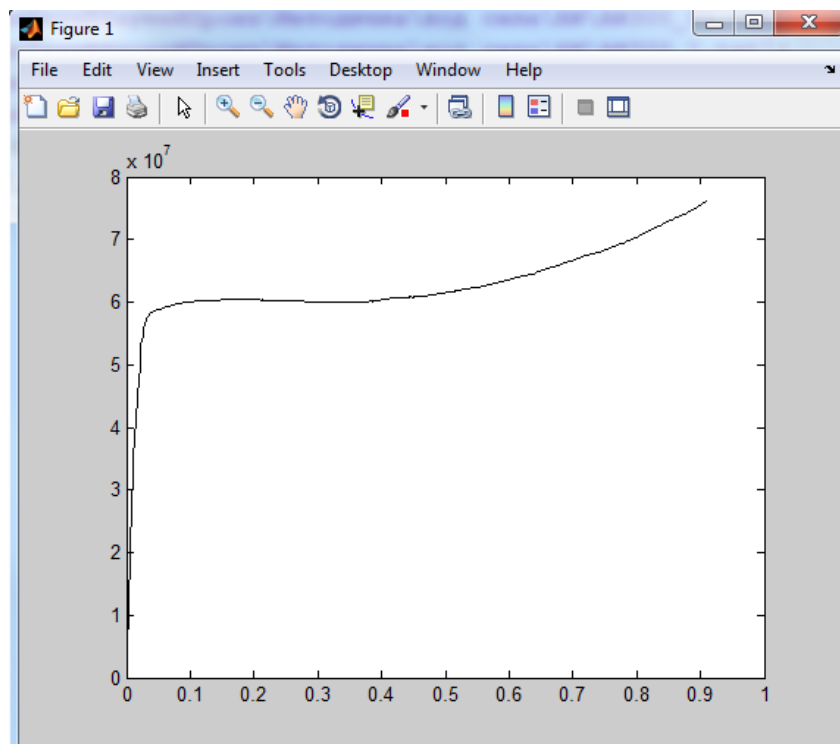


Рисунок 1.2 - Кривая текучести, построенная в Matlab

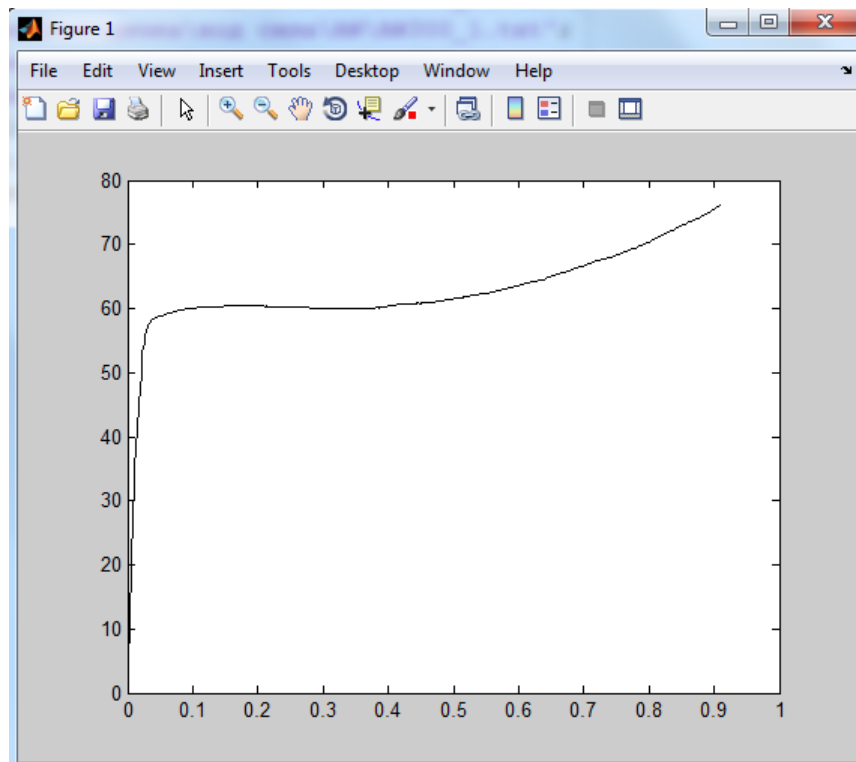


Рисунок 1.3 - Кривая текучести со значениями напряжений в МПа

3) *Корректировка кривой текучести с учётом контактного трения*

Корректировка значений напряжения будет осуществляться по выражениям (5) и (6). Для этого создадим новую внутреннюю функцию "K1", с помощью которой будем осуществлять первую корректировку:

```
function y=K1(X1,X2)
    y=X2./(1+((m*d0)/(3*sqrt(3)*h0)).*(exp(-(3/2).*X1))));
end
```

Функция "K1" является функцией двух переменных: переменная "X1" деформация, переменная "X2" напряжение. Входными переменными функции "K1" будут являться рассчитанные значения деформации "E01" и напряжения "G01". Данные массивы содержат только один столбец, т.е. являются векторами, поэтому номер столбца указывать не нужно.

Вызвав функцию "K1" осуществляем корректировку значений напряжения с учётом контактного трения:

```
Gm01=K1(E01,G01);
```

Построим полученную скорректированную кривую текучести и сравним её с исходной:

```
plot(E01,G01./1e06,'k',E01,Gm01./1e06,'b')
```

На рисунке 1.4 показан график сравнения полученный в Matlab. Как видно из графика скорректированная кривая текучести существенно ниже исходной. Это объясняется тем, что наличие трения увеличивает силу деформирования, а, следовательно, увеличивает и рассчитанные значения напряжения. Сделав корректировку по учёту контактного трения рассчитанные напряжения были уменьшены на величину, соответствующую влиянию контактного трения на процесс осадки образца.

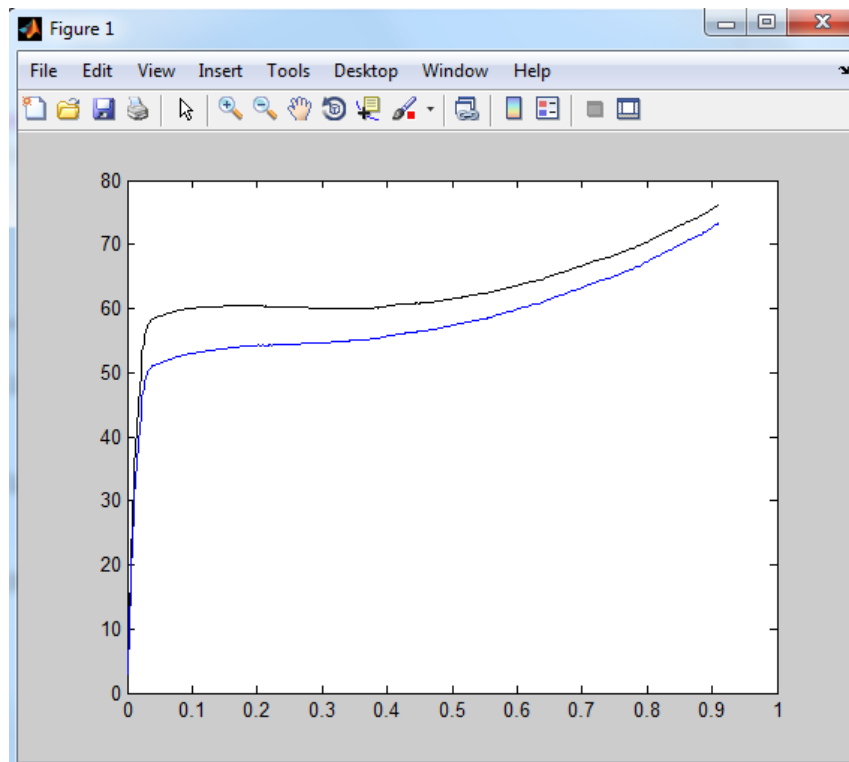


Рисунок 1.4 - Скорректированная (синяя) и исходная (чёрная) кривые текучести

4) *Корректировка кривой текучести с учётом теплового эффекта пластической деформации и контактного трения*

Корректировка значений напряжения текучести определённых на предыдущем этапе расчёта будет осуществляться по выражениям (7) и (20). Создадим функцию "K2" которая будет осуществлять корректировку значений напряжения текучести с учётом теплового эффекта пластической деформации и теплового эффекта контактного трения:

```
function y=K2(X1,X2)
    r=length(X1);
    for k=2:1:r
        A(k-1,1)=X2(k)./(exp(a.*koef(X1(k)).*...
            trapz(X1((1:k),1), X2((1:k),1))));
    end
    y=[X2(1); A];
end
```

В данной функции есть встроенный оператор цикла "for...end", при расчёте функция "K2" вызывает функцию "koef" и две встроенные функции "length" и "trapz". Начнём пояснение с функции "trapz".

Функция "trapz" является встроенной функцией в Matlab. Все встроенные функции имеют определённый синтаксис вызова и позволяют рассчитывать функции или массивы с помощью заранее заданных математических методов. Функция "trapz" позволяет вычислить интеграл методом трапеций. При этом функция должна быть задана таблично, т.е. представлять собой матрицу с двумя столбцами один из которых является столбцом со значениями аргумента, а другой со значениями функции. Значения функции (в нашем случае $X2((1:k),1)$) и переменной (в нашем случае $X1((1:k),1)$) представляют собой векторы одинакового размера. Размер векторов, по которым вычисляется интеграл, задаётся переменной "k". Переменная "k" определяет номер строки массивов "X1" и "X2" до которой рассчитывается интеграл. Переменная "k" изменяется от 2 до значения "r" с шагом 1:

```
k=2:1:r
```

Таким образом рассчитывается значение интеграла для каждого (кроме первого) значения накопленной деформации $\varepsilon_i (X1 ((1:k) , 1))$ и напряжения $\sigma_{mi} (X2 ((1:k) , 1))$ (выражение (7)), при этом в каждом случае значение $\varepsilon_i = \varepsilon_k$ (выражение (20)).

Значение "r" определяется размером (количеством строк) массивов "X1" и "X2". Функция "K2" написана с расчётом, что входными данными будут являться рассчитанные вектор-столбцы "E01" и "Gm01". Размер данных вектор-столбцов одинаковый, и определяется количеством строк в начальном файле с данными "AW300_01.txt". Поэтому определять размер векторов можно по одному из рассматриваемых, например по "E01", т.е. внутри функции по "X1":

```
r=length(X1);
```

Встроенная функция "length" определяет количество строк вектора-столбца (или количество столбцов для вектор-строки).

Для последовательного расчёта функции "K2" по каждому значению "k" в функции создан цикл "for...end". Оператор цикла "for...end" выполняет инструкцию определенное число раз, в данном случае количество расчётов определяется выражением "k=2:1:r". При выполнении цикла создаётся вектор-столбец "A(k-1,1)" который содержит все, кроме первого, скорректированные значения напряжения текучести. Первое значение не корректируется, т.к. интеграл, определяющий прирост температуры, возможно рассчитать только при изменении значений накопленной деформации и напряжения. Выходным значением функции "K2" будет вектор столбец напряжений текучести определяемый выражением "y=[X2(1); A]". Первое значение данного столбца берётся без изменений из входного вектора напряжений "X2(1)" (как уже говорилось первое значение не корректируется), а все последующие определяются рассчитанным вектором "A", который содержит скорректированные, с учётом разогрева образца, значения напряжения текучести.

В функции "K2" вызывается функция "koef":

```
function y=koef(X1)
    y=(1+(2.*sqrt(((d0^2*h0)./(4.*exp(log(h0)-X1)))))...
        .*(m/2))./(3.*exp(log(h0)-X1))./(c*p1);
end
```

Функция "koef" рассчитывает коэффициент перед интегралом в выражении (20):

$$\frac{1}{c\rho} \left[1 + \frac{2r_k \mu}{3h_k} \right] \quad (22)$$

Значения r_k и h_k в выражении (22) определялись по выражениям (17) и (16) соответственно. Функция "koef" должна быть записана ниже функции "K2".

Для корректировки значений напряжения текучести с учётом теплового эффекта трения и пластической деформации рассчитаем массив "Gm01" по функции "K2" от вектор-столбцов "E01" и "Gm01":

```
Gt01=K2(E01,Gm01);
```

Построим полученную скорректированную кривую текучести и сравним её с кривой полученной после первой корректировки и исходной кривой текучести:

```
plot(E01,G01./1e06,'k',...
     E01,Gm01./1e06,'b',...
     E01,Gt01./1e06,'r')
```

На рисунке 1.5 показан полученный график:

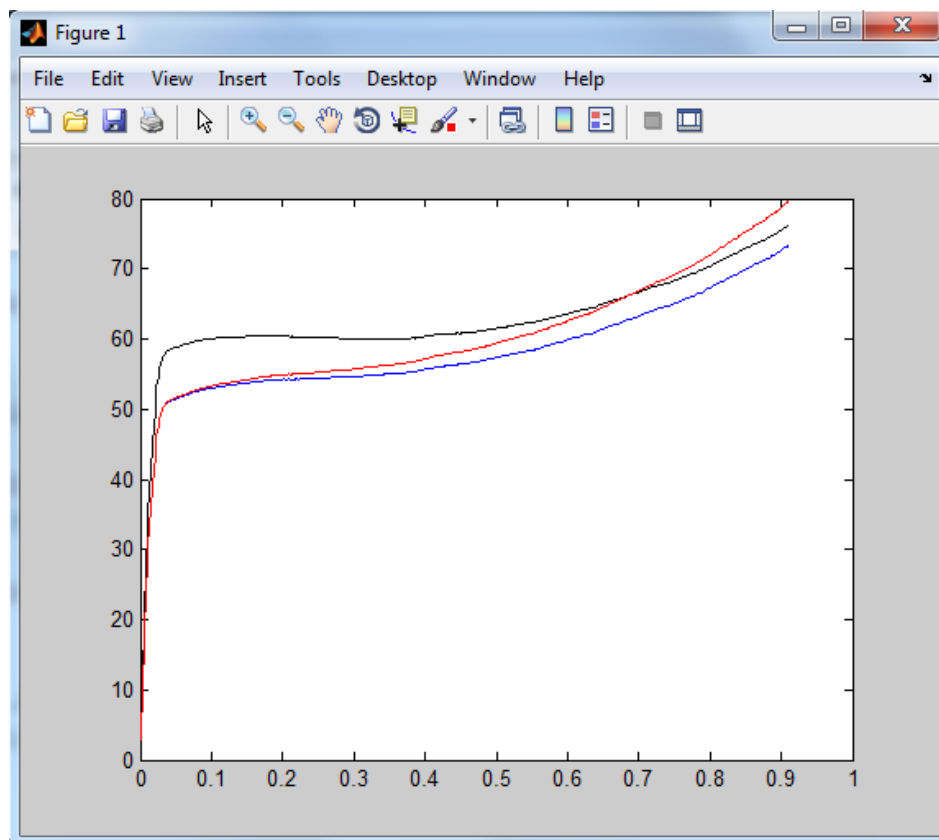


Рисунок 1.5 - Сравнение кривых текучести до и после корректировок

Как видно из графика скорректированные с учётом увеличения температуры образца значения напряжения текучести (красная кривая) больше значений напряжения текучести скорректированных на предыдущем этапе (синяя кривая), а при большой степени накопленной деформации значения напряжения превышают значения исходной кривой текучести (черная кривая). Это объясняется тем, что чем больше накопленная деформация, тем больше работа пластической деформации и, следовательно, больше прирост температуры, что в свою очередь означает, что экспериментальный график силы был занижен и, в результате, рассчитанные значения напряжения текучести были также занижены.

Создадим матрицу со значениями напряжений полученной "изотермической" кривой текучести и соответствующими им значениями накопленной деформации:

```
RES01=[E01 Gt01./1e6];
```

Для сохранения всех результатов расчёта напомним команды:

```
cd ('<Полный путь>');
```

```
save ('<Название файла с результатами расчётов>');
```

В результате в указанной папке будет сохранён файл формата ".mat". Файлы данного расширения можно просмотреть в окне "Workspace" программы Matlab.

По аналогии строятся и корректируются кривые текучести по остальным диаграммам сил, полученным при проведении испытаний с другими скоростями деформации. При этом все необходимые расчётные функции уже созданы, поэтому необходимо только загрузить следующие исходные файлы и вызвать существующие функции для новых данных.

Контрольные вопросы и задания

1) Почему необходима корректировка значений напряжения текучести с учётом контактного трения?

2) Как влияет корректировка с учётом разогрева образца при деформировании на значения напряжения текучести и почему?

3) Как и почему изменяется величина корректировки значений напряжения с учётом разогрева образца в зависимости от скорости деформации? Ответ проиллюстрируйте графиком сравнения изменения напряжения в результате корректировки для каждой скорости деформации.

4) Какая функция позволяет рассчитать интеграл от таблично-заданной функции в Matlab?

5) Какой синтаксис имеет оператор цикла с заданным количеством операций в Matlab?

Практическое занятие №2
Определение неизвестных коэффициентов в математических моделях
сопротивления пластической деформации

Задание

Определить неизвестные коэффициенты предложенных моделей сопротивления деформации для исследуемого материала.

Цель

Ознакомиться с методом определения неизвестных коэффициентов математических моделей. Научиться определять неизвестные коэффициенты моделей сопротивления деформации средствами Matlab.

Дано

- 1) "Изотермические" кривые текучести определённые в практическом занятии №1.
- 2) Математическая модель сопротивления деформации использующаяся в программе QForm:

$$\sigma_i = A e^{-m_1 T} \varepsilon_i^{m_2} e^{(-m_4 \varepsilon_i)} \dot{\varepsilon}_i^{m_3} \quad (1)$$

σ_i - напряжение текучести;

ε_i - накопленная деформация (логарифмическая);

$\dot{\varepsilon}_i$ - скорость деформации;

T - температура;

A, m_1, m_2, m_3, m_4 - коэффициенты модели.

- 3) Модель сопротивления деформации соответствующая варианту задания:

Варианты заданий:

Таблица 2.1 Варианты заданий

Номер варианта	Математическая модель сопротивления деформации
1	$\sigma_i = C \varepsilon_i^n \dot{\varepsilon}_i^m$ σ_i - напряжение текучести; ε_i - накопленная деформация (логарифмическая); $\dot{\varepsilon}_i$ - скорость деформации; C, n, m - коэффициенты модели.
2	$\sigma_i = \sigma_0 \varepsilon_i^n \left(\frac{\dot{\varepsilon}_i}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^m$ σ_i - напряжение текучести; ε_i - накопленная деформация (логарифмическая); $\dot{\varepsilon}_i$ - скорость деформации; $\sigma_0, \dot{\varepsilon}_0, n, m$ - коэффициенты модели.
3	$\sigma_i = \sigma_0 (\varepsilon_i + \varepsilon_0)^n \left(\frac{\dot{\varepsilon}_i}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^m$ σ_i - напряжение текучести; ε_i - накопленная деформация (логарифмическая); $\dot{\varepsilon}_i$ - скорость деформации; $\sigma_0, \dot{\varepsilon}_0, \varepsilon_0, n, m$ - коэффициенты модели.
4	$\sigma_i = C \varepsilon_i^n \exp(k \varepsilon_i) \dot{\varepsilon}_i^m$ σ_i - напряжение текучести; ε_i - накопленная деформация (логарифмическая); $\dot{\varepsilon}_i$ - скорость деформации; C, k, n, m - коэффициенты модели.
5	$\sigma_i = C \varepsilon_i^n \exp\left(\frac{n_1 \varepsilon_i}{\varepsilon_m}\right) \dot{\varepsilon}_i^{m+b/T} \exp(a_1 T)$ σ_i - напряжение текучести; ε_i -

	накопленная деформация (логарифмическая); T - температура $\dot{\epsilon}_i$ - скорость деформации; $C, n, n_1, \epsilon_m, m, b, a_1$ - коэффициенты модели.
6	$\sigma_i = A(\epsilon_i + \epsilon_0)^{m_1} \dot{\epsilon}_i^{m_2} \exp(m_3 \epsilon_i)$ σ_i - напряжение текучести; ϵ_i - накопленная деформация (логарифмическая); $\dot{\epsilon}_i$ - скорость деформации; $A, \epsilon_0, m_1, m_2, m_3$, - коэффициенты модели.

Краткий теоретический материал

Наиболее распространенными программами для моделирования технологических процессовковки и объемной штамповки являются QFORM, DEFORM и FORGE. Перечисленные системы основаны на методе конечных элементов. При постановке задачи моделирования в данных программах наиболее важными входными данными, характеризующими деформируемый материал, является зависимость напряжения текучести от накопленной деформации, температуры и скорости деформации, представляющие собой ряд кривых текучести или модель сопротивления деформации. Последний способ задания зависимости напряжения текучести является более универсальным и удобным при вычислениях.

Модели сопротивления деформации можно разделить на три типа:

- 1) Эмпирические
- 2) Феноменологические
- 3) Физические

Физические модели основаны на количественных параметрах, характеризующих микроструктуру деформированного материала при заданных температурно-скоростных условиях формоизменения. Феноменологические модели, или описательные, определяют взаимосвязь между различными наблюдаемыми явлениями в соответствии с фундаментальной теорией, но непосредственно из этой теории не следующих. Эмпирические модели представляют собой функцию аппроксимирующую экспериментальные данные. В отличие от физических моделей эмпирические не обладают предсказательной возможностью, т.е. из них нельзя сделать заключения о необходимости какого-либо ещё не наблюдаемого и неизвестного явления. В отличие от феноменологических моделей эмпирические не позволяют определить степень влияния процесса, характер изменения которого известен из эксперимента, на другой процесс характер изменения которого непосредственно из эксперимента не определяется. Эмпирические модели позволяют математически описать зависимость какого либо известного из эксперимента параметра от другого, также известного из эксперимента параметра (или группы параметров) и, поэтому, представляют собой математические функции вид которых соответствует экспериментально определённым зависимостям.

Несмотря на существенный недостаток эмпирических моделей, выражающийся в том, что они пригодны только для аппроксимации экспериментальных данных, как правило именно эмпирические модели используются для задания материала в программах моделирования процессов ОМД. Это объясняется тем, что при расчётах, в большинстве случаев, достаточно определить зависимость напряжения текучести от накопленной деформации, температуры и скорости деформации. Все указанные зависимости возможно узнать из эксперимента, после чего они аппроксимируются, благодаря чему определяется эмпирическая модель сопротивления деформации. Кроме того нужно отметить, что эмпирическая модель сопротивления деформации является существенно более удобным способом передачи и хранения информации чем графическое или табличное отображение зависимости напряжения текучести от указанных переменных.

В данной практической работе будут рассматриваться только эмпирические модели сопротивления деформации в общем виде представляющие собой зависимость $\sigma_i = f(\epsilon_i, \dot{\epsilon}_i)$

или $\sigma_i = f(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}, T)$, где σ_i - напряжение текучести; ε_i - накопленная деформация; $\dot{\varepsilon}$ - скорость деформации; T - температура.

Все функции, представляющие собой эмпирические модели сопротивления деформации, содержат некоторое количество коэффициентов, позволяющих видоизменять функцию в определённом диапазоне, благодаря чему можно подобрать такие значения коэффициентов при которых модель, будет с максимально возможной точностью описывать данные эксперимента. Неизвестные коэффициенты выбранной модели сопротивления деформации определяются каким-либо методом оптимизации (например, методом наименьших квадратов) по кривым текучести (представляющим собой данные эксперимента) определённым для рассматриваемого материала. При этом точность модели будет зависеть от точности кривых текучести по которым она определяется.

Как уже говорилось, одним из методов нахождения неизвестных коэффициентов модели сопротивления деформации является метод наименьших квадратов. Суть метода наименьших квадратов заключается в том, что при решении системы уравнений находятся такие коэффициенты аппроксимирующей функции при которой квадрат суммы невязок значений функции и данных эксперимента будет наименьшим. Рассмотрим на примере определения коэффициентов модели (1) порядок составления системы уравнений при решении задачи методом наименьших квадратов.

Пусть при некоторых начальных значениях искомых коэффициентов модель сопротивления деформации имеет вид показанный на рисунке 2.1. При этом стоит задача подобрать такие коэффициенты модели, при которых расхождение между данными эксперимента и модели δ_i будут минимальными (рисунок 2.1)

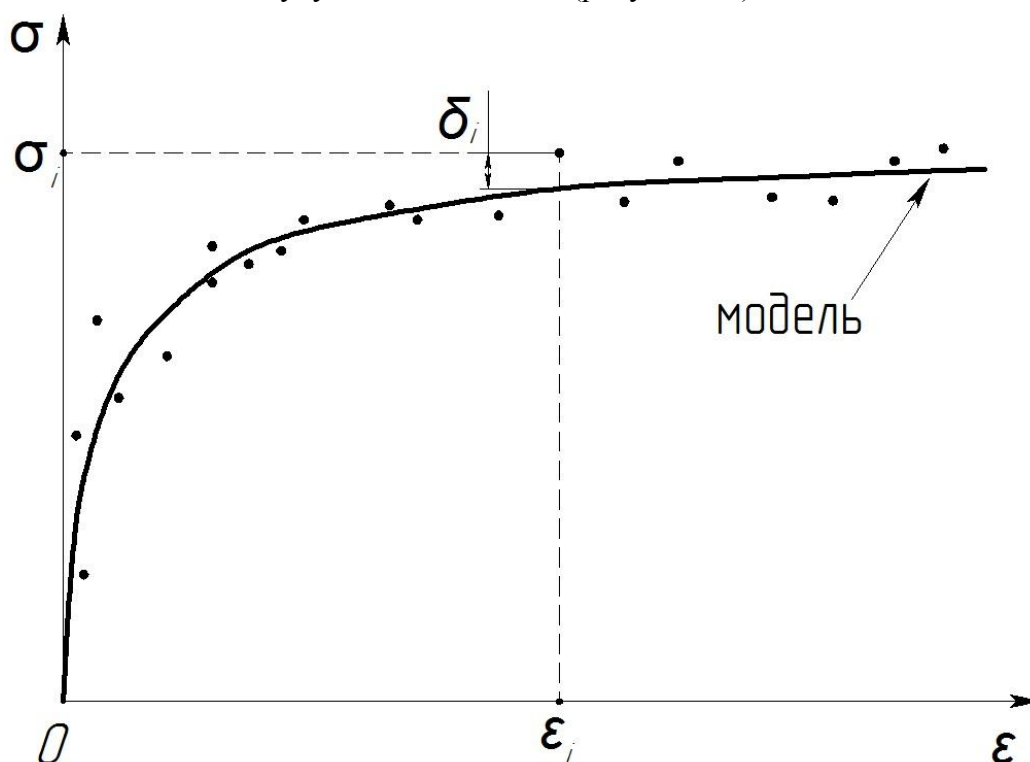


Рисунок 2.1 - Аппроксимация экспериментальных данных

Из рисунка 2.1 видно, что δ_i находится из выражения:

$$\delta_i = \sigma_i - A e^{-m_1 T} \varepsilon_i^{m_2} e^{(-m_4 \varepsilon_i)} \dot{\varepsilon}^{m_3} \quad (2)$$

Очевидно, что чем меньше значение невязки δ определённое для каждой точки, тем лучше подобраны коэффициенты модели. При решении методом наименьших квадратов за параметр, определяющий точность аппроксимации принимается сумма квадратов отклонений:

$$S = \sum_{i=1}^n (\sigma_i - A e^{-m_1 T} \varepsilon_i^{m_2} e^{(-m_4 \varepsilon_i)} \dot{\varepsilon}^{m_3})^2 \quad (3)$$

где n - количество экспериментальных точек.

Условием минимума выражения 3 будет система:

$$\begin{cases} \partial S / \partial A = 0 \\ \partial S / \partial m_1 = 0 \\ \partial S / \partial m_2 = 0 \\ \partial S / \partial m_3 = 0 \\ \partial S / \partial m_4 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

В рассматриваемом случае скорость деформации была постоянной. Если скорость деформации принимает различные значения, т.е. существует несколько массивов точек, то выражение (3) будет изменено:

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\sigma_{i,j} - A e^{-m_1 T} \varepsilon_{i,j}^{m_2} e^{(-m_4 \varepsilon_{i,j})} \dot{\varepsilon}_{i,j}^{m_3})^2 \quad (5)$$

где n - количество экспериментальных точек для каждого m , m - количество значений скорости деформации для которой определены массивы экспериментальных точек. Система уравнений (4), для определения оптимальных коэффициентов не изменится.

Ход выполнения работы (расчёт в программе Matlab)

При выполнении практического занятия №1 каждый учащийся построил "изотермические" кривые текучести для предложенного материала при постоянной температуре и для определённых значений скорости деформации. В данной практической работе необходимо для рассчитанных "изотермическим" кривых текучести определить неизвестные коэффициенты эмпирической модели сопротивления деформации использующейся в программе QForm, а также коэффициенты модели сопротивления деформации предложенной в соответствии с вариантом задания. Т.е. массивами экспериментальных данных, по которым будут определяться коэффициенты моделей, будут являться точки, по которым построены найденные "изотермические" кривые текучести. Поэтому наиболее рационально будет осуществлять решение практической работы №2 в уже существующем файле-функции, созданном при решении практической работы №1.

В Matlab для задач оптимизации методом наименьших квадратов используется встроенная функция:

```
lsqcurvefit(@mod_e, x0, All_x, G, ngr, wgr);
```

где "@mod_e" - функция, представляющая собой модель сопротивления деформации, коэффициенты которой необходимо определить; "x0" - вектор-строка начальных коэффициентов модели; "All_x" - матрица содержащая значения аргументов (значения накопленной деформации ε_i , значения скоростей деформации $\dot{\varepsilon}_i$ и значения температуры); "G" - вектор-столбец значений функции (напряжение текучести σ_i); "ngr" - вектор-строка нижних пределов области определения искомых коэффициентов; "wgr" - вектор-строка верхних пределов области определения искомых коэффициентов.

Начнём последовательно определять все входные данные.

Создадим функцию которая будет представлять собой модель сопротивления деформации использующуюся в программе Qform (1):

```
function y=mod_e(a,All)
```

```

y=a(1).*exp(-a(2).*All(:,3)).*(All(:,1).^a(3))....
.*exp(-a(5).*All(:,1)).*(All(:,2).^a(4));
end

```

Функция имеет две переменные. Первая из них "a" – должна представлять собой вектор-строку со значениями коэффициентов, вторая "All" должна являться матрицей, содержащей три столбца. Первый столбец должен содержать значения накопленной деформации ε_i , второй – значения скорости деформации $\dot{\varepsilon}_i$, третий – значения температуры T .

Для создания матрицы "All_x", которая при вызове встроенной функции "lsqcurvefit" будет определять переменную "All" созданной функции "mod_e" воспользуемся данными рассчитанными при выполнении задания №1. При этом будем считать, что значения накопленной деформации полученных "изотермических" кривых текучести содержатся в вектор-столбцах "E01", "E1", "E10" и "E50" для значений скоростей деформации $0,1 \text{ с}^{-1}$, 1 с^{-1} , 10 с^{-1} и 50 с^{-1} соответственно, а температура, для которой определены четыре рассматриваемые "изотермические" кривые текучести равна $T=300 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Тогда нужно записать:

```

r01=length(E01); - для определения количества строк в столбце деформаций;
SE01(1:r01,1)=0.1; - для создания столбца со значениями скорости
деформации  $\dot{\varepsilon}_i=0,1 \text{ с}^{-1}$  количество строк которого будет равно количеству строк столбца
"E01";

```

```

T01(1:r01,1)=300; - для создания столбца со значениями температуры.

```

Теперь можно создать матрицу, содержащую значения аргументов "изотермической" кривой текучести построенной для скорости деформации $0,1 \text{ с}^{-1}$:

```

All01=[E01 SE01 T01];

```

По аналогии нужно создать матрицы аргументов для "изотермических" кривых текучести определённых для скоростей деформации 1 с^{-1} , 10 с^{-1} и 50 с^{-1} . После чего можно создать общую матрицу аргументов "All_x":

```

All_x=[All01; All1; All10; All50];

```

Будем считать, что значения напряжений текучести полученных "изотермических" кривых содержатся в вектор-столбцах "Gt01", "Gt1", "Gt10" и "Gt50" для значений скоростей деформации $0,1 \text{ с}^{-1}$, 1 с^{-1} , 10 с^{-1} и 50 с^{-1} соответственно, при этом значения напряжений в указанных столбцах определены в МПа. Как правило, при построении кривых текучести и при определении модели сопротивления деформации, значения напряжений измеряются в МПа, тогда запишем:

```

G=[Gt01./1e06; Gt1./1e06; Gt10./1e06; Gt50./1e06];

```

Созданная матрица "G" является вектор-столбцом значений функции (напряжения текучести σ_i) для четырёх рассматриваемых "изотермических" кривых текучести.

Значения вектор-строки "x0" (вектора начальных значений коэффициентов, относительно которых начинается решение задачи оптимизации) подбираются таким образом, чтобы вид функции "mod_e" был схож с видом аппроксимируемых "изотермических" кривых текучести. В противном случае решение может быть некорректным. Для того, чтобы оценить вид функции "mod_e" при заданном векторе "x0" относительно "изотермических" кривых текучести построим график:

```

figure(1)
set(figure(1), 'name', 'Начальное приближение', ...
'Position',[10 300 600 500])
plot(E01,Gt01./1e06,'k',...
E1,Gt1./1e06,'b',...
E10,Gt10./1e06,'r',...
E50,Gt50./1e06,'g',...
E01,mod_e(x0,All01),'m',...

```

```
E1,mod_e(x0,A111),'m',...
E10,mod_e(x0,A1110),'m',...
E50,mod_e(x0,A1150),'m')
```

Стоит обратить внимание, что для построения графика функции "mod_e" для каждой из рассматриваемых скоростей деформации и для значений коэффициентов, определённых вектором "x0" вызов функции будет выглядеть следующим образом:

```
mod_e(x0,A1110)
```

где "A1110" – имя матрицы содержащей значения аргументов "изотермической" кривой текучести определённой для соответствующей скорости деформации, в данном случае для скорости деформации 10 c^{-1} .

Определим значения вектора "x0" и посмотрим график (рисунок 2.2):

```
x0=[80 0.001 0.1 -0.15 0.1];
```

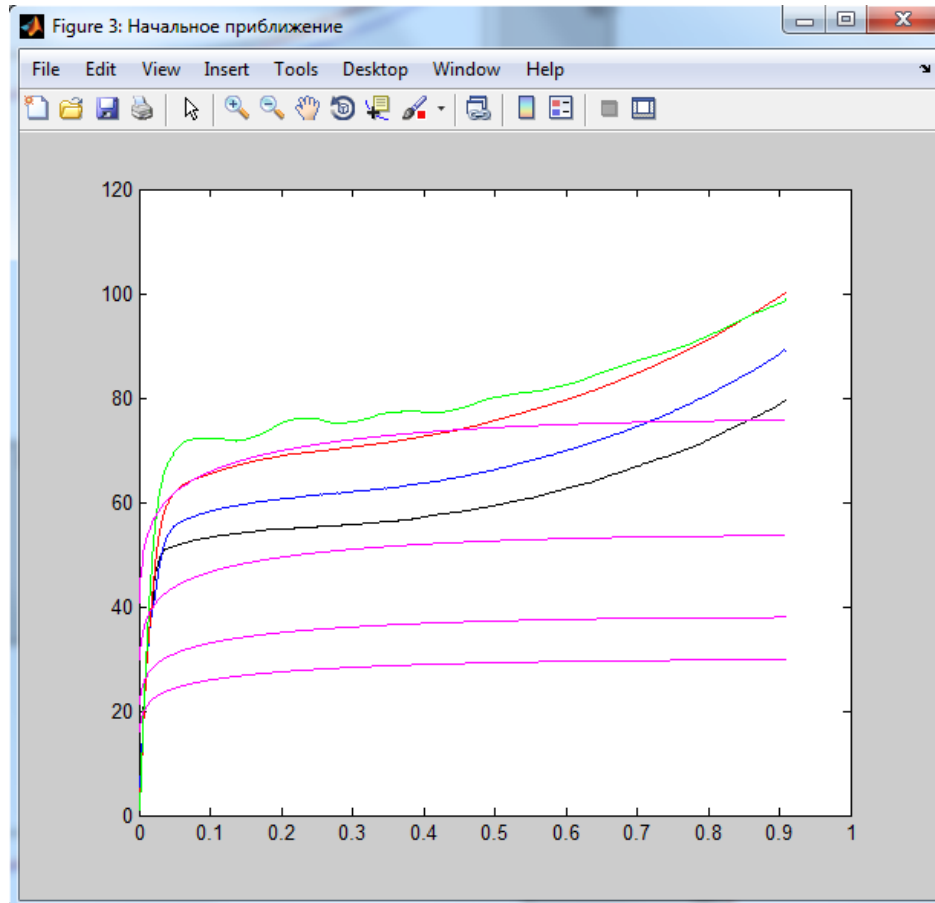


Рисунок 2.2 – Сравнение модели сопротивления деформации при начальных значениях коэффициентов с аппроксимируемыми кривыми текучести

Схождение модели при начальных значениях коэффициентов с "изотермическими" кривыми текучести, показанное на рисунке 2.2, является более чем достаточным для получения корректного результата решения. Забегая вперёд можно поэкспериментировать и задать вектор начальных значений следующим образом:

```
x0=[1 1 1 1 1];
```

При таких значениях "x0" задача оптимизации решена не будет, т.к. функция "mod_e" имеет некорректный вид относительно аппроксимируемых кривых.

Как уже говорилось "ngr" и "wgr" – это векторы нижнего и верхнего пределов области определения искомых коэффициентов. В данном случае не будем накладывать на поиск коэффициентов никаких ограничений:

```
ngr=[-inf -inf -inf -inf -inf ];
wgr=[inf inf inf inf inf];
```

Однако в некоторых случаях для корректного решения необходимо наложить ограничения, например, в случае, когда какой-либо коэффициент не может принимать отрицательные значения, или когда искомые коэффициенты должны укладываться в некоторый диапазон, определяемый требуемым видом функции. Кроме того, задание узкой области определения позволит сократить количество расчётов и число итераций, что ускорит процесс решения.

Стоит также обратить внимание, что размер векторов "ngr" и "wgr" равен размеру вектора "x0" и соответствует количеству коэффициентов функции "mod_e".

Вызовем встроенную функцию оптимизации:

```
K=lsqcurvefit(@mod_e, x0, All_x, G, ngr, wgr);
```

Данная запись означает, что результат решения будет содержаться в вектор-строке "K", состоящей из пяти найденных коэффициентов. Также построим график сравнения полученной модели с аппроксимируемыми "изотермическими" кривыми текучести. Запись для построения графика аналогична записи для построения графика начальных приближений, только в данном случае функция "mod_e" вызывается для вектора "K", например:

```
mod_e(K, All150)
```

где "K" – вектор найденных коэффициентов, "All150" – имя матрицы содержащей значения аргументов кривой текучести определённой для скорости деформации 50 c^{-1} .

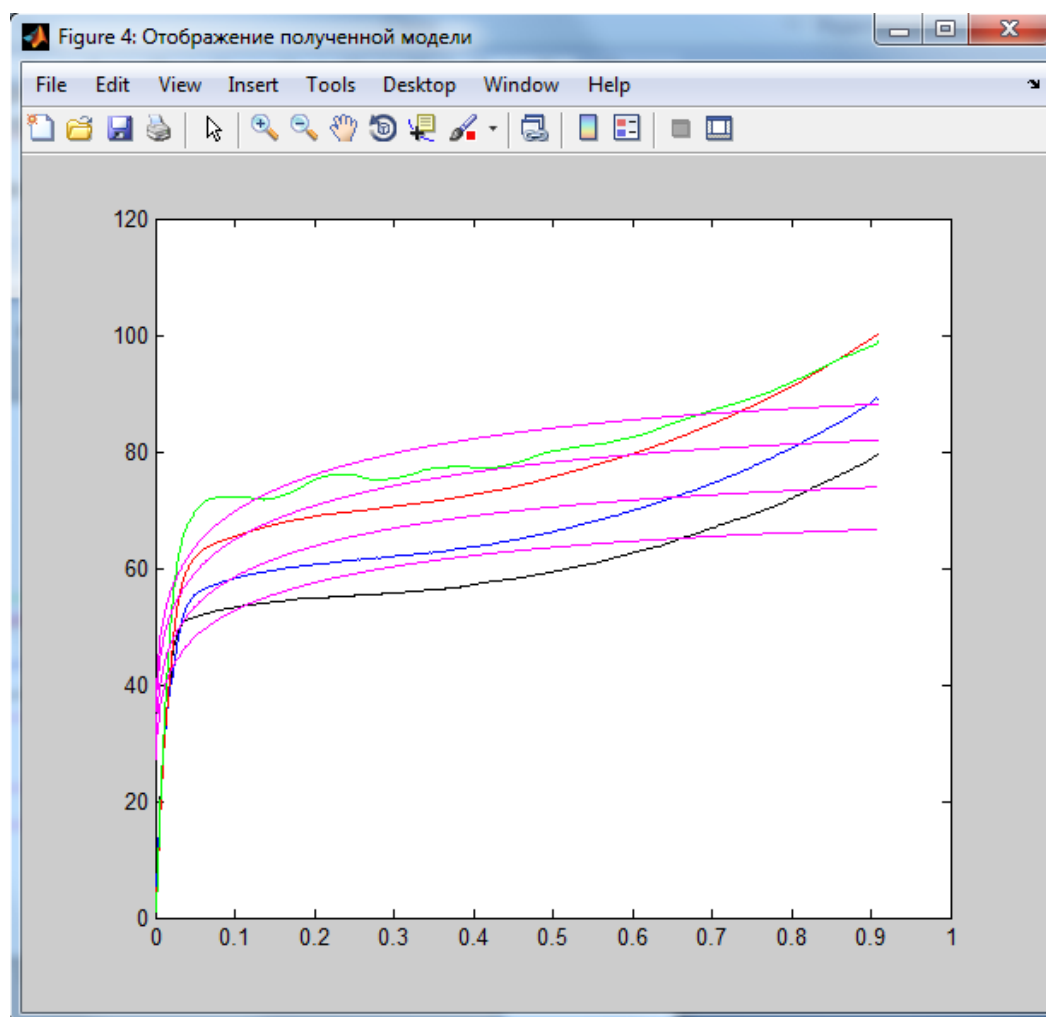


Рисунок 2.3 – Сравнение полученной модели сопротивления деформации с аппроксимируемыми кривыми текучести

Как видно из рисунка 2.3 точность полученной модели сравнительно невысокая. Это объясняется тем, что используемая модель сопротивления деформации не позволяет описать кривые текучести, форма которых при малых степенях деформации близка к горизонтальной прямой, а с увеличением деформации представляет собой загнутую вверх дугу.

Для отображения в окне "Command Window" полученных коэффициентов запишем:

```
disp('*****Найденные коэффициенты*****')
disp(K)
disp('*****')
```

При вызове функции "lsqcurvefit" в окне "Command Window" может появиться сообщение: "lsqcurvefit stopped because it exceeded the function evaluation limit, options.MaxFunEvals", которое означает, что расчёт остановлен, т.к. достигнуто максимальное число допустимых расчётов функции, при этом предлагается увеличить число допустимых расчётов функции, т.е. воспользоваться опцией "MaxFunEvals". По умолчанию минимизируемая функция вычисляется не более 600 раз, после чего алгоритм останавливается. Это сделано для предотвращения заикливания. При этом указанное сообщение не означает, что искомые коэффициенты не найдены, оно означает только, что при решении не достигнута требуемая точность (по умолчанию 10^{-6}). Для увеличения количества вычислений нужно записать:

```
opt=optimset;
opt.MaxFunEvals=10000;
K=lsqcurvefit(@mod_e, x0, All_x, G, ngr, wgr, opt);
```

Запись "opt=optimset" определяет имя параметра оптимизационных опций. Запись "opt.MaxFunEvals=10000" означает, что число допустимых расчетов функции увеличено до 10000. Стоит также обратить внимание, что изменилась форма записи вызова функции "lsqcurvefit":

```
K=lsqcurvefit(@mod_e, x0, All_x, G, ngr, wgr, opt);
```

где на последнем месте стоит имя параметра оптимизационных опций "opt".

При решении задачи оптимизации можно воспользоваться и другими опциями, которые повысят точность вычислений:

```
opt=optimset;
opt.MaxFunEvals=10000;
opt.TolFun=10e-10;
opt.MaxIter=5000;
K=lsqcurvefit(@mod_e, x0, All_x, G, ngr, wgr, opt);
```

Запись "opt.TolFun=10e-10" означает, что точность решения повышена со значения 10^{-6} до значения 10^{-10} . Запись "opt.MaxIter=5000" означает, что максимальное количество итераций увеличено с 400 до 5000.

Контрольные вопросы и задания

1) По минимуму какой величины производится оптимизация модели сопротивления деформации при решении методом наименьших квадратов?

2) Какая функция позволяет произвести оптимизацию коэффициентов математической модели в Matlab?

3) Какая из двух моделей сопротивления деформации позволила лучше описать "изотермические" кривые текучести? А также чем можно объяснить разную точность сходимости функции аппроксимации и кривых текучести при использовании различных моделей сопротивления деформации?

4) Как правильно подобрать вектор начальных значений коэффициентов?

5) Как сильно изменились значения искомых коэффициентов при увеличении числа допустимых расчётов; при увеличении количества итераций; при увеличении точности решения?

6) При составлении системы уравнений (4) необходимо найти частные производные функции (3) по каждому из коэффициентов. Найдите данные производные средствами Matlab.

Для выполнения задания (6) нужно воспользоваться функцией "diff" и командой "syms", которая объявляет указанные переменные символьными, например:

```
syms x y  
diff(5*x^3+10/y-3, 'x')
```

где "5*x^3+10/y-3" - функция, "'x'" - переменная по которой вычисляется производная.

Также нужно обратить внимание, что т.к. при решении нет поэлементного перемножения или деления массивов, то перед операторами "*", "/" и "^" точку ставить не надо.

Практическое занятие №3

Моделирование механических испытаний методом осадки цилиндрического образца

Задание

Сравнить расчётные и экспериментальные диаграммы силы.

Цель

Научиться правильно задавать условия задачи для моделирования механических испытаний в программе Qform. Научиться анализировать полученные данные расчёта.

Дано

1) Коэффициенты математической модели сопротивления деформации используемой в программе Qform, определённые при выполнении работы №2.

2) Экспериментальные диаграммы силы, соответствующие варианту задания в работе №1.

3) Свойства алюминиевых сплавов:

$c=900((H^*M)/(kJ/°C))$ теплоёмкость;

$\rho=7550(kg/m^3)$ плотность алюминиевых сплавов;

$k=150 Bm/(m^*K)$ коэффициент теплопроводности;

$T_{пл}=650 °C$ температура плавления;

Температурный диапазон штамповки алюминиевых сплавов: 250 °C - 520 °C.

4) Параметры эксперимента:

Образец 10x10 мм, $d_0=10$ мм диаметр; $h_0=10$ мм высота; $m=0,8$ фактор трения.

Краткий теоретический материал

При проведении механических испытаний, направленных на построение кривых текучести материала необходимо выдержать следующие требования:

1. Деформирование образцов исследуемого материала выполняется при постоянной скорости деформации.

2. Деформирование образцов исследуемого материала выполняется в инструменте, нагретом до температуры испытания.

4. Образцы для испытаний получают точением с последующим шлифованием торцевых поверхностей из прессованного прутка исследуемого сплава. Размеры образцов выполняются в соответствии с ГОСТ 25.503-97. Отклонение от номинального размера по высоте образцов не превышает $\pm 0,05$ мм.

Более подробно процесс проведения испытаний описан в практической работе №1. В теоретическом материале этой работы рассмотрим наиболее сложные этапы постановки задачи моделирования механических испытаний в программе Qform.

Инструмент испытательной машины должен перемещаться по закону, который обеспечит постоянство скорости деформации во время всего процесса осадки. Накопленная деформация ε_i определяется выражением:

$$\varepsilon_i = \ln \frac{h_0}{h_i} \quad (1)$$

где h_0 - исходная высота образца; h_i - текущая высота образца.

Из выражения (1) выразим текущую высоту образца:

$$h_i = \exp(\ln(h_0) - \varepsilon_i) \quad (2)$$

Перемещение инструмента определяется выражением:

$$s_i = h_0 - h_i \quad (3)$$

При постоянной скорости деформации:

$$\varepsilon = \dot{\varepsilon} t \quad (4)$$

где $\dot{\varepsilon}$ - скорость деформации; t - время.

Тогда перемещение инструмента при постоянной скорости деформации будет определяться выражением:

$$s_i = h_0 - \exp(\ln(h_0) - \dot{\varepsilon} t) \\ \text{или} \\ s_i = h_0 - \exp(-\dot{\varepsilon} t) h_0 \quad (5)$$

В программе Qform нельзя задать закон перемещения инструмента в виде некоторой функции от времени. Для определения закона перемещения инструмента в Qform создаётся специальный механический пресс (КГШП) перемещение ползуна которого можно задавать при помощи таблицы. При этом значения перемещения задаются не от времени, а в зависимости от угла поворота главного вала, скорость вращения которого в свою очередь определяется количеством оборотов в минуту. Значение количества оборотов в минуту рассчитывается исходя из требуемой скорости деформации и конечного значения накопленной деформации, которое определяет длительность процесса осадки. Для определения времени деформации используем выражение:

$$t_k = \varepsilon_k / \dot{\varepsilon} \quad (6)$$

где t_k - время при котором достигается конечная накопленная деформация; ε_k - конечная накопленная деформация.

Как уже говорилось время в Q-FORM задаётся через скорость вращения главного вала и угол его поворота. Скорость вращения определяется как количество оборотов в минуту, при этом за половину оборота (за 180°) ползун должен совершить полное перемещение, необходимое для достижения конечной степени накопленной деформации ε_k . Тогда можно составить соотношение:

$$\frac{180}{t_k} = \frac{360w}{60} \quad (7)$$

где w - количество оборотов в минуту.

Из соотношения (7) получаем выражение для определения скорости вращения главного вала:

$$w = 30 / t_k \quad (8)$$

Разбивая углы поворота вала (время t_k) на равные промежутки, по выражению (5) составляется таблица зависимости перемещения ползуна (инструмента) от угла поворота главного вала. Максимальное количество точек, которыми можно задать профиль перемещения траверсы, составляет 50. Но, для корректного задания закона перемещения инструмента достаточно определить 20 - 30 точек.

При этом созданный профиль (таблица) не будет универсальным, т.е. если мы хотим осадить образец при той же скорости деформации, но до другой высоты (до другого значения накопленной деформации ε_k), то столбец значений перемещения и скорость вращения главного вала необходимо рассчитывать заново. Т.к. в противном случае, при использовании одной таблицы перемещений инструмента для моделирования осадки до различных конечных высот образца, либо не будет хватать хода ползуна пресса для достижения требуемой деформации, либо, в случае, если требуемая конечная высота образца достигается при меньшем перемещении ползуна пресса, чем это задано по таблице, то профиль нагружения будет воспроизведён некорректно, т.к. перемещение ползуна начнётся не с начальной точки заданного профиля а с точки, которая соответствует разнице между требуемым перемещением и полным перемещением ползуна пресса по таблице. Такой принцип работы программы обусловлен тем, что оборудование задаётся как механический кривошипно-шатунный пресс, при работе которого крайнее нижнее положение ползуна соответствует конечной высоте образца.

При проведении механических испытаний в изотермических условиях смазка, как правило не применяется. Отсутствие смазки упрощает проведение эксперимента и

упрощает дальнейшую обработку результатов, т.к. нет необходимости определять значение фактора трения используемой смазки при различных температурах. Отсутствие смазки означает, что на контактной поверхности образца возникают максимально возможные, при соответствующих нормальных напряжениях σ_n , касательные напряжения τ_k . Таким образом очевидно, что фактор трения m должен быть принят максимально возможным, т.е. равным 1. Однако, результаты моделирования показывают, что для более низких температур проведения экспериментов целесообразно принять фактор трения несколько меньше единицы. Это можно объяснить тем, что при осадке при больших температурах происходит прилипание контактных поверхностей образца к инструменту, а при более низких температурах прилипания не происходит и металл проскальзывает по поверхности бойка. В данном практическом задании будем считать, что фактор трения $m=0,8$.

Оптимальное значение фактора трения, определяется из сопоставления геометрии образца полученной при моделировании с геометрией образца полученной в ходе проведения эксперимента. Сравнение геометрии расчётных и экспериментальных образцов проводится по сопоставлению радиуса кривизны образующей поверхности бочкообразного образца. При изготовлении опытных образцов допускаются небольшие отклонения по диаметру и высоте образца ($\pm 0,05$ мм, пункт 4), поэтому объём экспериментального образца может отличаться от номинального, тогда как при моделировании объём образца чётко определён. Вследствие указанной погрешности эксперимента нельзя сравнивать геометрию расчётного и экспериментального образцов по замеру верхнего, нижнего и среднего диаметров, т.к. из-за отклонения объёма экспериментального образца от номинального значения замеры по диаметрам могут дать расхождение даже в случае верно определённого фактора трения. Тогда как радиус кривизны образующей поверхности будет чётко отражать характер трения при осадке. Таким образом, адекватность значения фактора трения проверяется для всех выполненных расчётов и, в случае расхождения радиуса кривизны образующей поверхности экспериментального образца и образца полученного при моделировании, значение фактора трения изменяется до достижения корректного результата моделирования.

На результат моделирования влияет также и закон трения, который используется в программе. В Qform по умолчанию используется модель трения предложенная А.Н. Левановым:

$$\tau_k = m \left(1 - \exp \left(-a \frac{\sigma_n}{\sigma_s} \right) \right) \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}, \quad (9)$$

где τ_k - контактное касательное напряжение; m - фактор трения; σ_n - нормальное напряжение на контактной поверхности; σ_s - предел текучести приконтактного слоя; a - коэффициент определяющий форму переходного участка модели Леванова (рисунок 1.2), по умолчанию $a=1,25$.

При расчёте задач обработки металлов давлением используются также другие законы трения, например, закон трения Кулона-Амантона, либо закон трения Зибеля (Треска). Данные законы трения можно использовать, например, при моделировании в программе Forge.

Закон Кулона-Амантона справедлив при малых значениях нормального напряжения:

$$\tau_k = \mu \sigma_n, \quad (10)$$

где τ_k - контактное касательное напряжение; μ - коэффициент трения; σ_n - нормальное напряжение на контактной поверхности.

Закон Зибеля:

$$\tau_k = m \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}, \quad (11)$$

где σ_s - предел текучести приконтактного слоя; m - фактор трения.

Как правило, при расчётах процессов горячей объёмной штамповки, характеризующихся достаточно большими нормальными напряжениями, используют закон Зибеля.

Диапазон нормальных напряжений, возникающий на контактной поверхности при осадке алюминиевого цилиндрического образца 10×10 мм, находится в пределах 50 - 200 МПа. Из сравнения рассматриваемых законов трения в данном диапазоне (рисунок 3.1) видно, что модель трения Леванова более универсальная, т.к. "совмещает" и закон трения Кулона и закон трения Зибеля. Однако при расчётах, направленных на исследование свойств материалов, лучше пользоваться более гибкой программой, которая позволяет выбирать закон трения для различного типа задач, т.к. при расчёте задачи осадки образца при невысоких температурах (когда нормальные напряжения попадают на середину переходного участка модели Леванова) более корректный результат получается при использовании закона трения Зибеля.

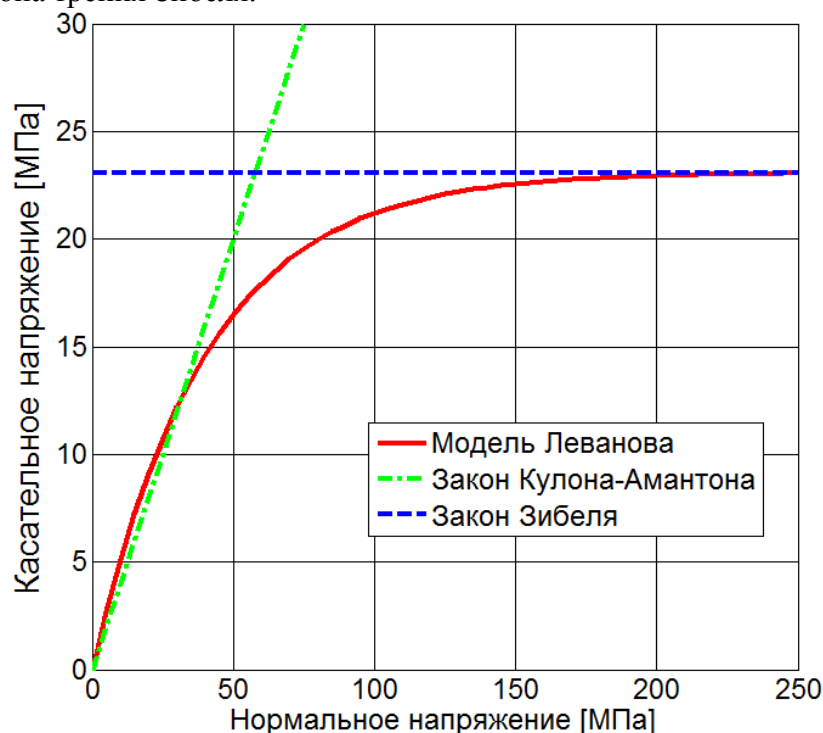


Рисунок 3.1 - Сравнение законов трения (при $a=1,25$ в модели Леванова)

В программе Qform есть возможность приблизить модель трения Леванова к закону трения Зибеля, для этого нужно указать достаточно большое значение коэффициента a , например $a=100$ (рисунок 3.2).

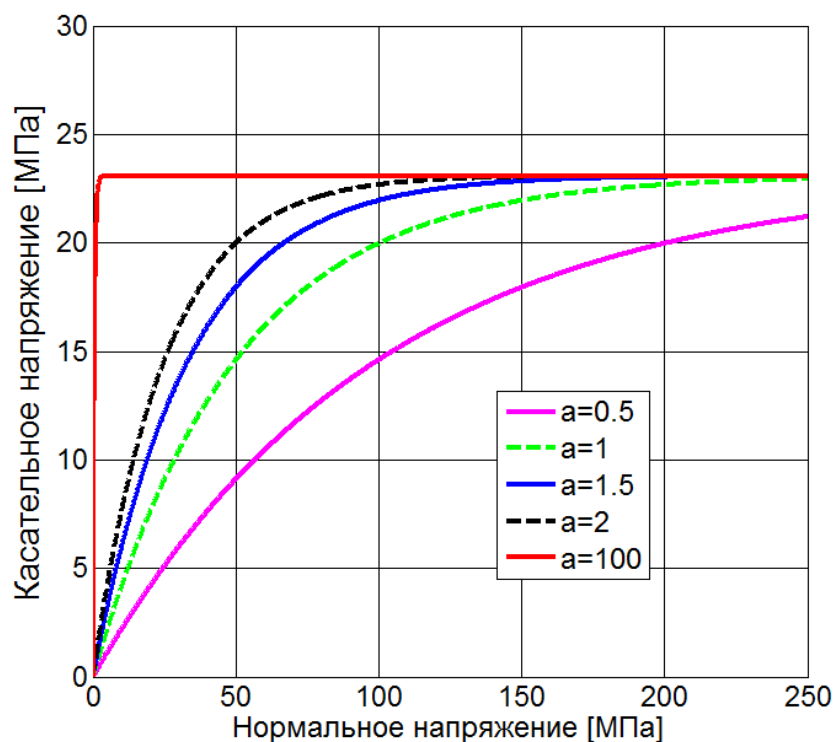


Рисунок 3.2 - Модель трения Леванова при различных значениях коэффициента a

При постановке задачи по моделированию материал деформируемой детали характеризуется, помимо кривых текучести (или модели сопротивления деформации), ещё такими величинами как плотность, теплопроводность, теплоёмкость и температура плавления. Для решения классической краевой задачи, которой является рассматриваемая задача об осадке цилиндрического образца, указанных параметров материала достаточно. Крайне важно верно задать значение теплоёмкости, т.к. от данной величины зависит степень разогрева материала при пластической деформации, а, следовательно, теплоёмкость влияет на величину напряжения текучести в очаге деформации, т.к. напряжение зависит от температуры. Если точных данных по теплоёмкости нет, то корректность расчёта можно проверить рассчитав по выражению (12) прирост температуры при различных степенях накопленной деформации и сравнить полученные значения с расчётными. Вывод выражения (12) дан в практической работе №1.

$$T_k = \frac{1}{c\rho} \left[1 + \frac{2r_k\mu}{3h_k} \right] \int_0^{\varepsilon_k} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (12)$$

где c - теплоёмкость материала образца; ρ - плотность материала образца; конечного значения накопленной деформации ε_k - конечное значение накопленной деформации; h_k - конечная высота образца (соответствующая ε_k); r_k - конечный радиус образца (соответствующий ε_k); μ - коэффициент трения; $\sigma(\varepsilon)$ - функция определяющая кривую текучести для рассматриваемой скорости и температуры деформации.

По результатам моделирования определяется расчетная диаграмма силы, которая сравнивается с экспериментальной диаграммой, которая была получена при проведении испытаний которые воспроизводились путём моделирования. Если погрешность расчётной диаграммы (выражение (13)) не укладывается в доверительный интервал, составляющий $\pm 2,5\%$, то это может говорить о том, что модель сопротивления деформации или сами "изотермические" кривые текучести определены не достаточно точно.

$$\delta = \left| \frac{P_{расч} - P_{эксп}}{P_{эксп}} \times 100\% \right| \leq 2,5\%, \quad (13)$$

где δ – относительная погрешность измерений; $P_{расч}$ – сила деформирования по результатам моделирования; $P_{эсп}$ – сила деформирования, полученная по результатам испытаний.

Ход выполнения работы (расчёт в программе Matlab)

При выполнении практического занятия №2 каждый учащийся определил неизвестные коэффициенты модели сопротивления деформации, использующейся в программе Qform, для материала и температурно-скоростных условий испытаний соответствующих варианту задания. В данной практической работе необходимо воспроизвести путём моделирования механические испытания выполняемые методом осадки цилиндрического образца для температурно-скоростных условий эксперимента соответствующих варианту задания.

Рассмотрим по пунктам последовательность постановки задачи моделирования и анализ полученных результатов.

1) Создание материала

Для создания нового материала через закладку "Утилиты" заходим в редактор базы данных материалов, где выбираем "деформируемые материалы". Создаём новый материал (назовём его "AW6086") и в окне его свойств (рисунок 3.3) выбираем способ задания данных о зависимости напряжения текучести материала от накопленной деформации, скорости деформации и температуры. Для этого нажимаем кнопку "Изменить тип" и выбираем поле "Функция", т.к. в данной работе данные по напряжению текучести будем задавать при помощи модели сопротивления деформации.

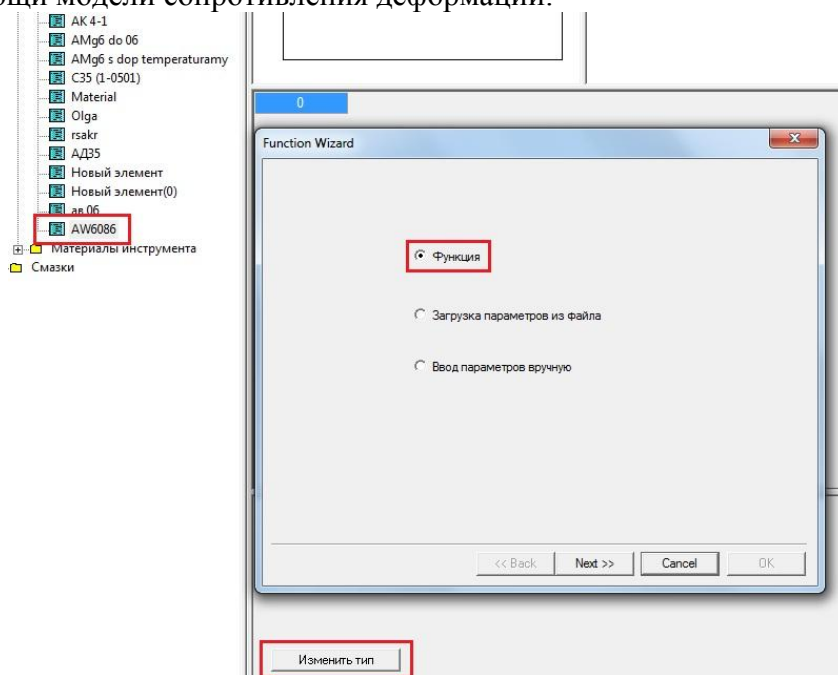


Рисунок 3.3 - Выбор способа задания данных о напряжении текучести

В появившемся окне (рисунок 3.4) вводим коэффициенты модели сопротивления деформации, определённые при выполнении работы №2. Также необходимо ввести диапазон значений накопленной деформации и диапазон температур для которых определена модель. Для определения диапазона накопленной деформации необходимо узнать последнее значение вектор-столбца деформаций из работы №1. Для этого в соответствующем файле запишем:

```
disp(E01(end,1))
```

где "E01" - имя вектор-столбца деформаций.

Начальное значение накопленной деформации нужно указать отличное от 0, например, 0,002.

"Изотермические" кривые текучести построенные в работе №1 и модель сопротивления деформации определённая в работе №2 находились для постоянного значения температуры. Поэтому, строго говоря, температурный диапазон полученной модели очень узкий. Однако, укажем общий штамповочный диапазон для алюминиевых сплавов (диапазон указан в разделе "Дано"), а при моделировании механических испытаний в соответствующих полях (которые будут рассмотрены ниже) укажем ту температуру, при которой были получены диаграммы силы, обрабатываемые в работе №1.

Значения аргументов		
	Min	Max
Деформация	0.002	0.91
Скорость деф-ии	0.001	1000
Температура	250	520

Рисунок 3.4 - Ввод коэффициентов модели сопротивления деформации, диапазона деформаций и температур, для которых определена модель

После того как были указаны все необходимые коэффициенты, диапазоны деформации и температуры в окне редактора материалов можно увидеть графическое отображение введённой модели сопротивления деформации (рисунок 3.5).

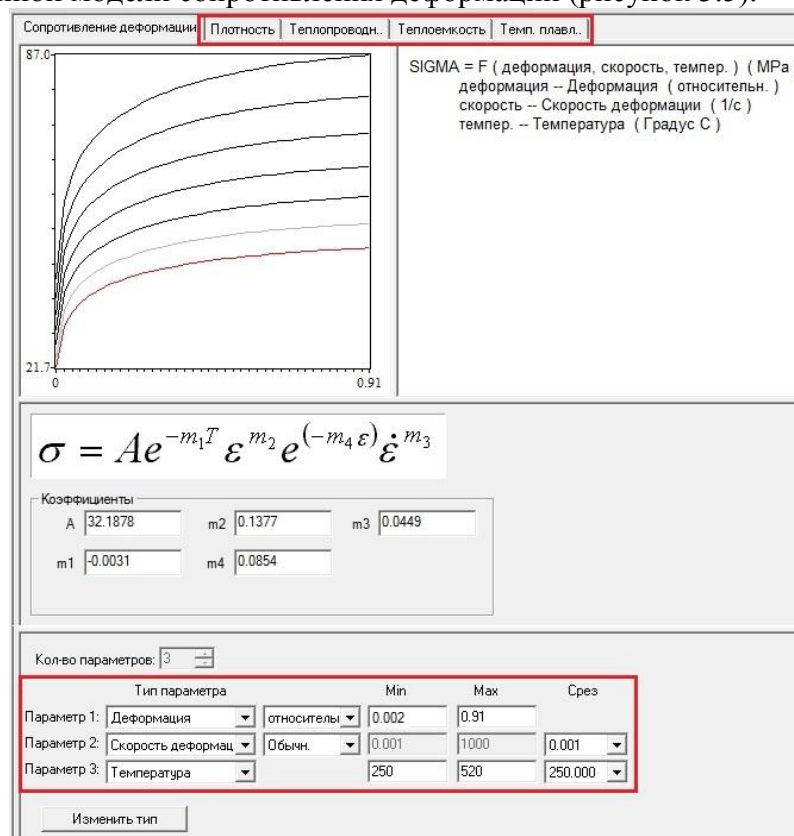


Рисунок 3.5 - Окно редактора базы данных материалов

Далее необходимо указать плотность, коэффициент теплопроводности, теплоёмкость и температуру плавления материала в соответствующих закладках (рисунок 3.5), значения всех перечисленных величин указаны в разделе "Дано".

2) Создание оборудования

Создадим оборудование, которое обеспечит перемещение верхнего инструмента согласно закону (5). Через закладку "Утилиты" заходим в редактор базы данных оборудования, где выбираем "Механические прессы" и в них "нестандартный 2 инструмента". Создаём новый нестандартный пресс (рисунок 3.6) и указываем количество инструментов (в данном случае 2). Назовём оборудование "скорость 0,1 деф 0,91".

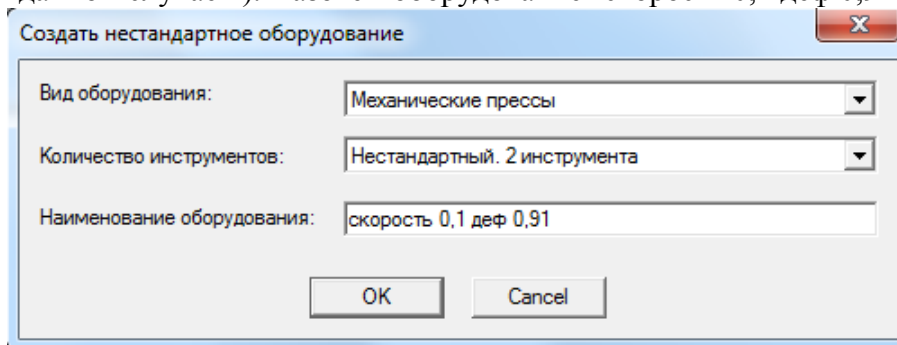


Рисунок 3.6 - Создание нового нестандартного оборудования

Далее в свойствах инструмента 1 указываем тип привод "Кривошипный" (рисунок 3.7). Указываем что верхний инструмент (инструмент 1) движется вниз, т.е. против оси OZ. По выражениям (6) и (8) определяем количество оборотов минуту и вводим полученное значение в соответствующее поле. Для выполнения данных расчётов используйте программу Matlab. Далее указываем, что закон перемещения инструмента задаётся таблично (табличное описание циклограммы). Т.к. перемещение инструмента определяется именно циклограммой, то таблицу, задающую закон перемещения инструмента, нужно заполнять от 180° до 0° , в соответствии с правилами построения циклограмм. Как уже говорилось ранее, для корректного задания закона перемещения инструмента необходимо определить 20 - 30 точек. Разделим рабочий ход главного вала (180°) на 24 участка, т.е. опишем 25 точек, первая из которых определяет перемещение инструмента при угле 180° (в момент времени $t=0$) а последняя при угле 0° (в момент времени $t=t_k$). Рассчитаем по выражению (5) значения перемещений для всех значений угла поворота (для всех значений времени, при этом общее время t_k как и общий угол поворота равный 180° делим на 24 участка). Для расчёта значений перемещений используйте программу Matlab, создав функцию для расчёта массива значений по выражению (5). Для создания массивов значений времени и углов запишем:

```
t01=0:tk01/24:tk01;
```

```
ugol=180-(0:180/24:180);
```

где "tk01" общее время осадки t_k определённое по выражению (6) для скорости деформации $0,1 \text{ c}^{-1}$.

Для расчёта перемещений вызовем функцию "Perem", которая рассчитывает значения перемещений по выражению (5).

```
s01=Perem(t01,0.1);
```

Перед тем как вызывать функцию "Perem" необходимо, конечно, её определить, т.е. создать функцию которая будет производить расчёт по выражению (5). В данном примере функция "Perem" рассчитывает значения перемещений инструмента по вектору значений времени "t01" и значению скорости деформации "0.1".

Для вывода в "Command Window" таблицы зависимости перемещения от угла поворота запишем:

```
disp([угол' (s01.*1000)'])
```

Векторы "t01" и "угол" являются вектор-строками, также, как и рассчитанный от вектора "t01" вектор "s01". Удобнее, чтобы результат был выведен в виде таблицы, т.е. в виде матрицы из двух вектор-столбцов. Для этого после имени рассматриваемых векторов-строк ставится знак "'" оператора транспонирования. Полученную таблицу вводим в окне редактора базы данных оборудования программы Qform (рисунок 3.7). Также нужно обратить внимание, что значения перемещений в окне редактора базы данных оборудования нужно вводить в миллиметрах, поэтому значения столбца перемещений умножаем на 1000: "(s01.*1000)'" (но только в том случае, если в Matlab значения начальной высоты и диаметра указывались в метрах).

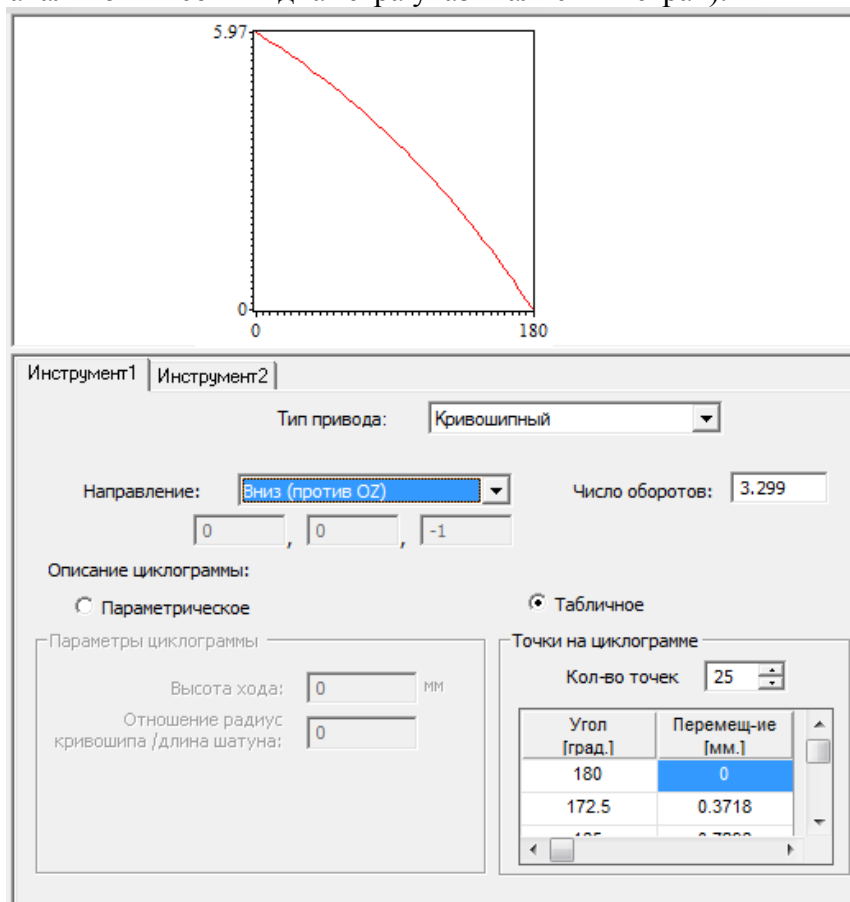


Рисунок 3.7 - Параметры подвижного инструмента 1

Для инструмента 2 указываем тип привода "Неподвижный", направление "Заданное", все координаты, указывающие направления равны 0.

3) Подготовка геометрии

Задача осадки цилиндрического образца является осесимметричной. Поэтому в любой CAD системе необходимо начертить только правую часть (относительно оси симметрии) цилиндрического образца 10×10 мм и правую часть рабочих инструментов (верхнего и нижнего), которые также будут представлять собой цилиндры. Построенную геометрию образца с инструментами необходимо перевести в формат "dxf". Кратко рассмотрим построение расчётной геометрии на примере использования программы T-Flex.

Вертикальная ось симметрии должна проходить через нулевую точку (0, 0). Осевые линии не нужно обозначать как осевые, т.е. они также должны быть выполнены основной линией чертежа и являться частью создаваемых контуров (рисунок 3.8). Между нижним инструментом и образцом, а также между верхним инструментом и образцом должен быть некоторый, произвольный, промежуток (это упростит обработку геометрии в редакторе

программы Qform). Толщина и радиус верхнего и нижнего инструментов произвольные, но нужно учесть, чтобы при осадке материала образца не вытекал за границы инструментов.

При экспорте геометрии в формат "dxf" необходимо указать версию AutoCAD 2000 и конвертирование линий в линии (рисунок 3.9), все остальные параметры остаются по умолчанию.

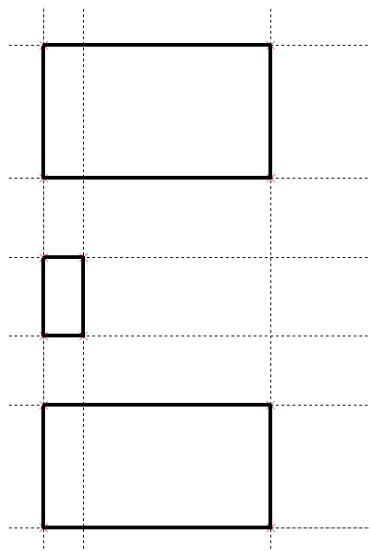


Рисунок 3.8 - Создание расчётной геометрии в программе T-Flex

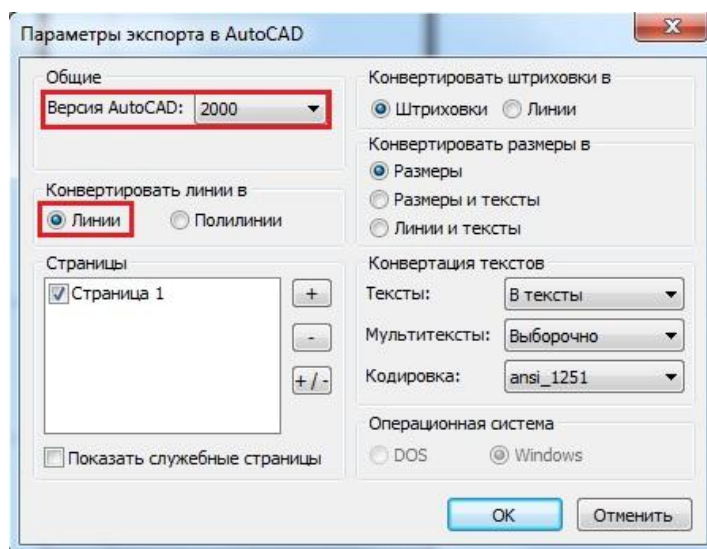


Рисунок 3.9 - Экспорт геометрии в формат "dxf" в программе T-Flex

Далее в программе Qform заходим через закладку "Утилиты" в редактор 2D геометрии QDraft. Открываем файл геометрии формата "dxf". Выбираем "Контуры" и "Выделение" (рисунок 3.10), после чего выделяем один из трёх контуров, например, верхний инструмент, как это показано на рисунке 3.10. "Кликаем" правой кнопкой мыши на выделенный контур и определяем его как верхний инструмент "TOOL1" (рисунок 3.10). По аналогии определяем образец (который является заготовкой), для этого указываем "WPIECE", и нижний инструмент, для этого указываем "TOOL2". Далее необходимо сохранить геометрию в формате "crs". Назовём файл "геометрия.crs".

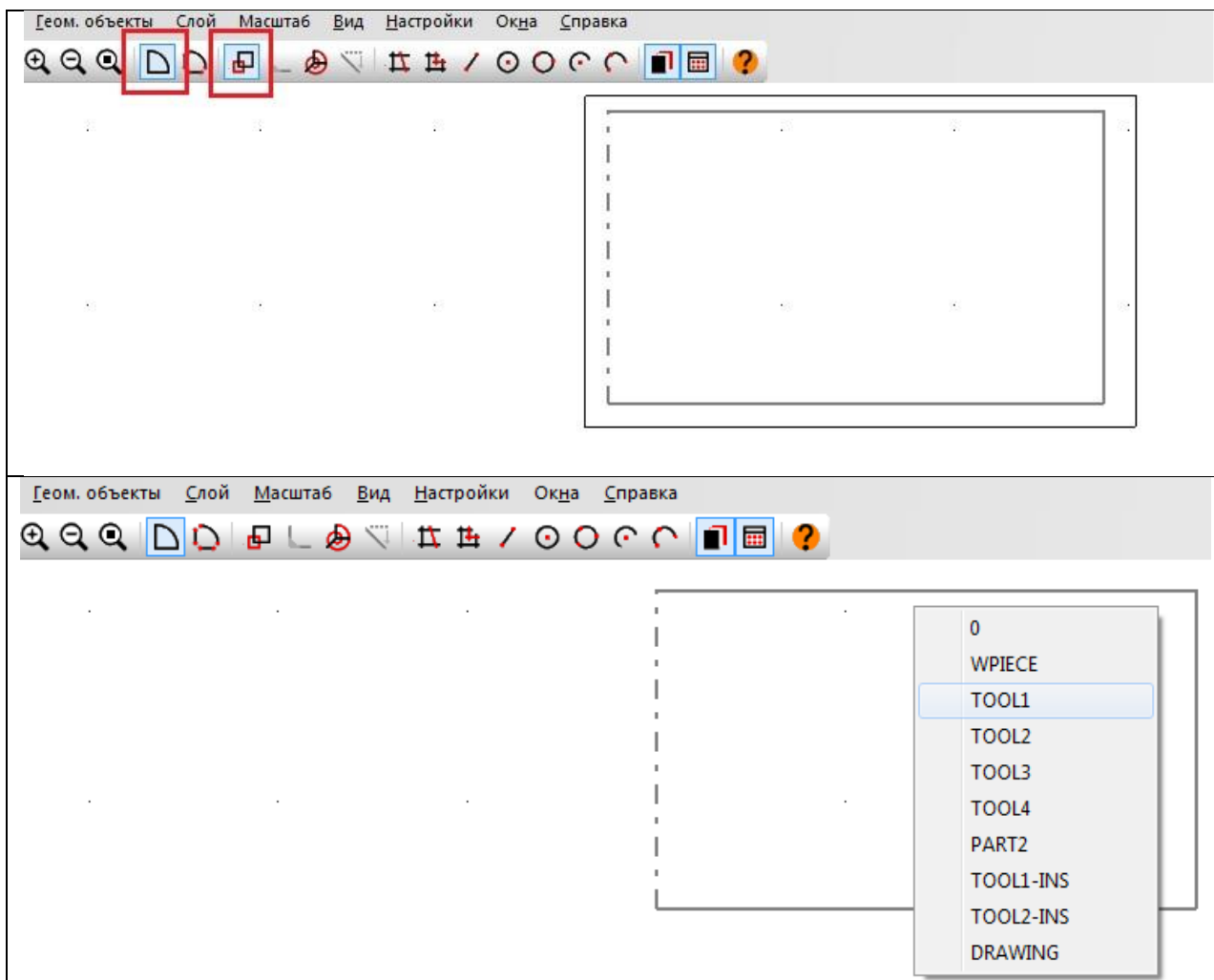


Рисунок 3.10 - Работа в геометрическом редакторе QDraft

4) Создание технологической смазки (определение условий трения)

Как уже говорилось ранее, диаграммы силы, определённые при проведении экспериментов, были получены при осадке цилиндрического образца без использования смазки. Наиболее близкий к реальному результат моделирования получается тогда, когда значение фактора трения $m=0,8$. Фактор трения в программе Qform задаётся в свойствах технологической смазки. Для создания смазки с фактором трения $m=0,8$ нужно через закладку "Утилиты" зайти в редактор базы данных материалов, где выбираем "Смазки". В окне редактора смазок создаём новую смазку (назовём её "lab3") и указываем значение фактора трения $0,8$ (рисунок 3.11).

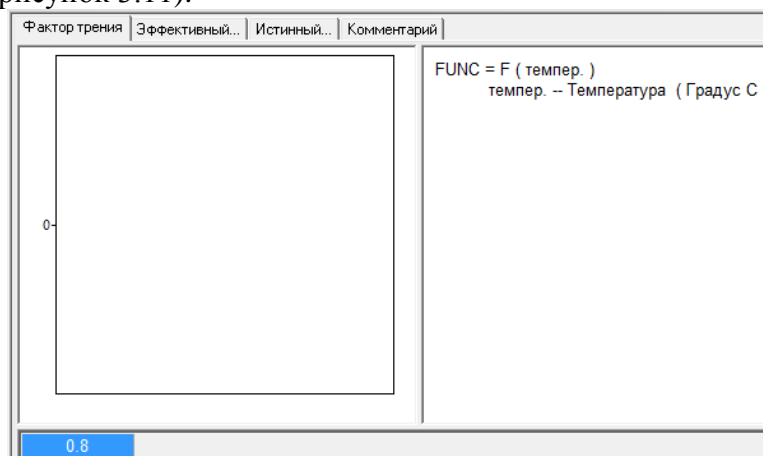


Рисунок 3.11 - Редактор базы данных смазок

5) Определение параметров расчёта в программе Qform

Нажимаем кнопку "Новая операция". Выбираем на закладке "Процесс" "Деформация в механическом прессе", т.к. оборудование, которое создавалось в пункте (2) представляет собой механический пресс. На закладке "Задача" указываем тип формы заготовки "Круглая в плане (осесимметричная деформация)", т.к. осадка цилиндрического образца является осесимметричной задачей, и геометрия, созданная в пункте (3), также описывает осесимметричную заготовку и инструмент. Указываем расчёт тепловых процессов, упругие деформации и инструмент не рассчитываем. На закладке "Геометрия" выбираем созданный в пункте (3) файл с расширением "crs". В дополнительных операциях ничего не указываем. На закладке "Оборудование" выбираем любой стандартный механический пресс, т.е. оборудование созданное в пункте (2) пока не указываем. На закладке "Параметры процесса" нужно указать конечное положение между инструментами, которое равно конечной высоте образца:

$$h_k = h_0 - s_k \quad (14)$$

где s_k - конечное перемещение инструмента соответствующее углу поворота вала θ° (по таблице определённой в пункте (2)) и времени t_k . Значение s_k удобнее всего будет посмотреть в таблице рассчитанной в программе Matlab (пункт 2). Значение конечного расстояния между инструментами необходимо указать в миллиметрах с точностью до сотых долей, поэтому найденное в программе Matlab значение h_k необходимо округлить до сотых долей большую сторону.

В параметрах заготовки нужно указать температуру нагрева образца при испытаниях. Температура нагрева образца указывается в соответствии с вариантом задания в работе №1. Далее указываем материал заготовки (образца), который создавался в пункте (1). Испытания проводятся в изотермических условиях, поэтому температуру инструмента на закладке "Параметры инструмента" указываем равную температуре заготовки. Также на закладке "Параметры инструмента" необходимо указать смазку, указываем смазку созданную в пункте (4). Параметры инструмента 2 аналогичны инструменту 1. Нажимаем кнопку "Дополнительно" и указываем температуру окружающей среды (рисунок 3.12), т.к. испытания производятся в изотермических условиях.

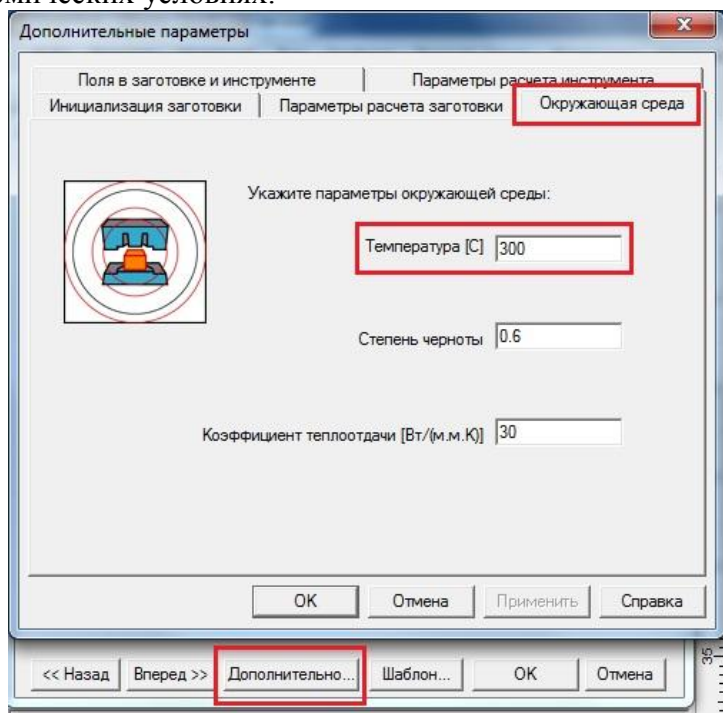


Рисунок 3.12 - Задание температуры окружающей среды

Далее нажимаем кнопку "ОК", указываем название файла в котором будут сохранены все исходные параметры задачи (файл с расширением "qfm").

Далее через закладку "Операция" заходим в "Параметры", т.е. возвращаемся в меню постановки задачи. Переходим на закладку "Оборудование" и указываем вместо выбранного в начале произвольного стандартного пресса оборудование, созданное в пункте (2). Далее переходим на закладку "Конечное положение" (рисунок 3.13), выделяем сначала инструмент 1 (синий контур), затем инструмент 2 (красный контур) и указываем расстояние между выделенными инструментами равное h_k , которое также указывается в миллиметрах и округляется до сотых долей большую сторону, иными словами указываем то же значение, что и при задании конечного расстояния между инструментами.

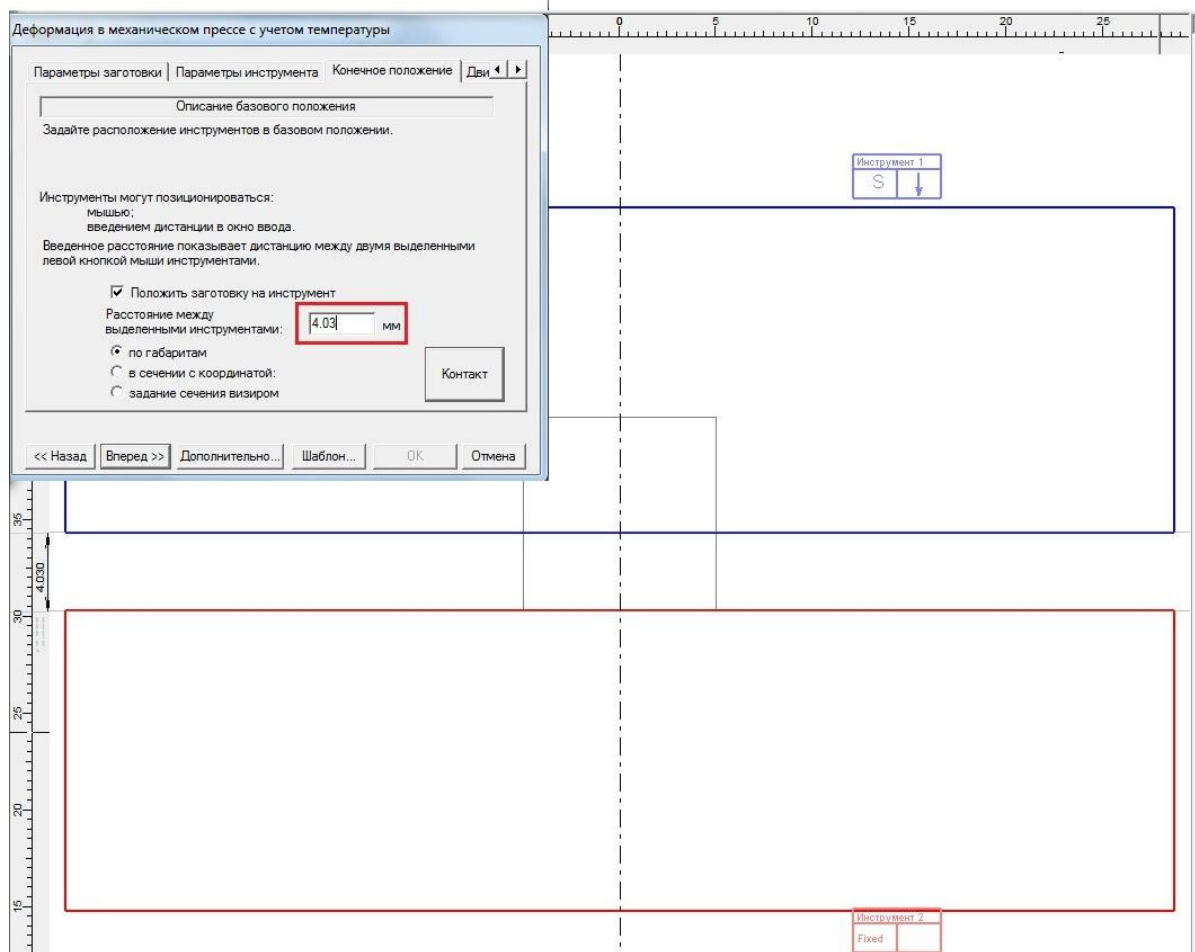


Рисунок 3.13 - Определение конечного положения между инструментами для нестандартного пресса

На закладке "Движение инструментов" можно проверить корректность перемещения верхнего инструмента. Далее нажимаем "ОК", отвечаем утвердительно на вопросы о внесённых изменениях и о рабочем угле пресса, и запускаем расчёт.

б) Сравнение расчётной и экспериментальной диаграммы силы

После завершения расчёта "кликаем" правой кнопкой на нижний инструмент и указываем "графики на инструменте", выбираем построение графика зависимости силы от времени. Переводим шкалу ординат из MH в kH (т.к. значения силы в исходных экспериментальных диаграммах даны в kH). Для этого используем кнопки изменения масштаба шкалы, которые выделены на рисунке 3.14. Далее нажимаем кнопку "В файл..." и сохраняем расчётную диаграмму силы в формате "txt". В полученном файле удаляем "шапку" и оставляем только колонки со значением времени и силы, а также заменяем разделительные запятые в дробных числах на точки.

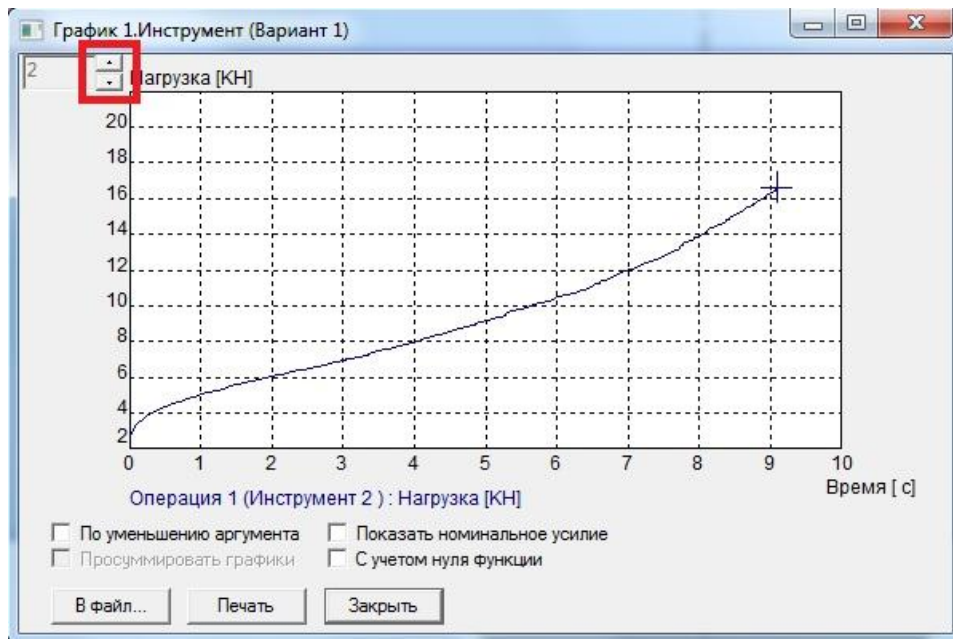


Рисунок 3.14 - Кнопки изменения масштаба шкалы по оси ординат

Далее загрузим полученный массив данных в Matlab:

```
D01=load('<Полный путь>\<Название файла (с расширением)>');
```

Переведём значения времени в массиве "D01" по выражению (4) в значения накопленной деформации.

```
ED01=D01(:,1).*0.1;
```

Построим график сравнения экспериментальной и расчётной диаграмм силы:

```
figure(1)
set(figure(1), 'Position', [20 545 750 420], 'Color', 'w')
plot(E01, A01(:,2), 'b--', 'LineWidth', 2), hold on, ...
    plot(ED01, D01(:,2), 'r-', 'LineWidth', 3)
axis([0 0.92 0 18])
grid on
title('Сравнение расчётной и экспериментальной диаграмм'...
    , 'fontsize', 12)
xlabel('Деформация', 'fontsize', 12)
ylabel('Сила (кН)', 'fontsize', 12)
legend('Эксперимент', 'Расчёт');
set(legend, 'Position', [0.2 0.6 0.2 0.2], 'fontsize', 18);
```

Команда "set(figure(1),...)" даёт возможность определить общие параметры графика, например:

"'Position', [20 545 750 420]" - определяет позицию (первые два числа) и размер (вторые два числа);

"'Color', 'w'" - определяет цвет фона, в данном случае белый.

Команда "plot" уже рассматривалась в работе №1. Запись "'b--'" является сокращённой формой записи определяющей цвет и тип линии, но можно записать "'Color', 'b', 'LineStyle', '--'". "'LineWidth', 2" - определяет толщину линий.

Команда "hold on" позволяет добавить в уже созданное графическое окно новый график при этом свойства осей и сетки сохраняются.

"axis([0 0.92 0 18])" - определяет диапазон отображения осей, первые два числа определяют диапазон оси абсцисс, вторые два числа - диапазон оси ординат.

"grid on" - включает сетку. "title('Сравнение...')" - определяет имя графика, "fontsize", 12" определяет размер шрифта надписи. "xlabel" и "ylabel" - определяют названия осей абсцисс и ординат соответственно. "legend('Эксперимент...')" - определяет названия графиков в легенде, очередность наименований соответствует очередности определения графиков в команде "plot". При определении положения и размера легенды "'Position', [0.2 0.6 0.2 0.2]" указанные значения определяют относительное положение и относительный размер.

7) Анализ результатов

Построим график сравнения экспериментальной и расчётной диаграмм силы на котором отображён доверительный интервал ($\pm 2,5$ % от значений силы экспериментальной диаграммы). Если расчётная диаграмма силы не укладывается в доверительный интервал, то это может говорить о том, что модель сопротивления деформации или сами "изотермические" кривые текучести определены не достаточно точно. Однако, необходимо убедиться, что при постановке задачи не совершены ошибки.

Проверим соответствие перемещения верхнего инструмента закону (5). Для этого построим график скорости верхнего инструмента (рисунок 3.15). Как видно из рисунка 3.15 скорость имеет отрицательные значения, т.к. перемещение инструмента направлено против оси OZ (пункт 2).

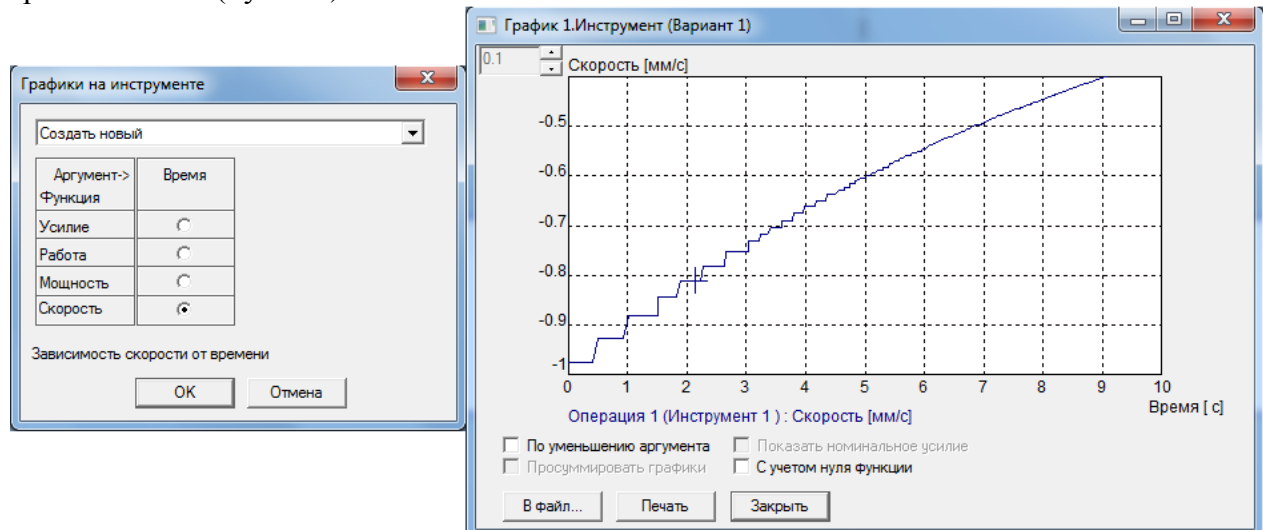


Рисунок 3.15 - Диаграмма скорости верхнего инструмента

Сохраним график в формате "txt", и, по аналогии с диаграммой силы в пункте 6, загрузим массив данных в Matlab. Выражение (5) определяет закон перемещения верхнего инструмента, рассчитаем производную данной функции по переменной t , и получим таким образом функцию определяющую скорость верхнего инструмента:

$$V_i = \frac{h_0 \dot{\epsilon}}{\exp(\dot{\epsilon} t)}, \quad (15)$$

где V_i - скорость верхнего инструмента; t - время, $\dot{\epsilon}$ - скорость деформации; h_0 - начальная высота образца.

Построим график функции (15) и сравним его с расчётной диаграммой скорости. При этом нужно обратить внимание, что значения скорости в расчётной диаграмме (рисунок 3.15) отрицательные и даны в мм/с, поэтому при построении графика переведем значения скорости в м/с и возьмём их по модулю.

Если закон перемещения верхнего инструмента в программе Qform задан верно, то расчётный и теоретический график скорости должны совпасть (рисунок 3.16).

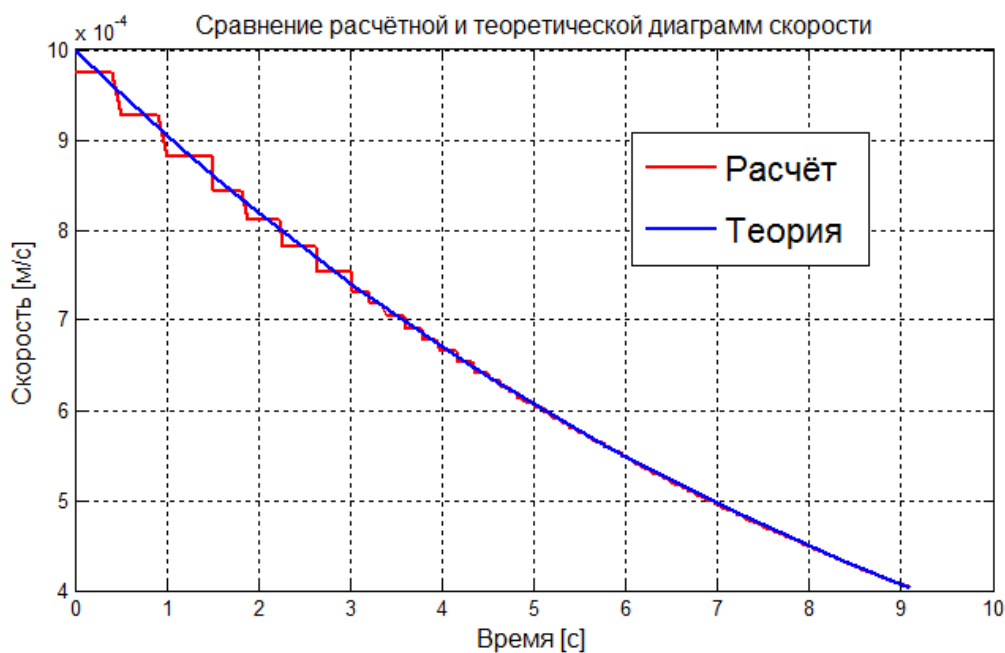


Рисунок 3.16 - Сравнение расчётной и теоретической диаграмм скорости

Проверим расчёт теплового эффекта пластической деформации. Для этого в программе Qform выберем область на сечении образца, где накопленная пластическая деформация равна какому-либо определённом значению, например, $\varepsilon=0,9$ (рисунок 3.17).

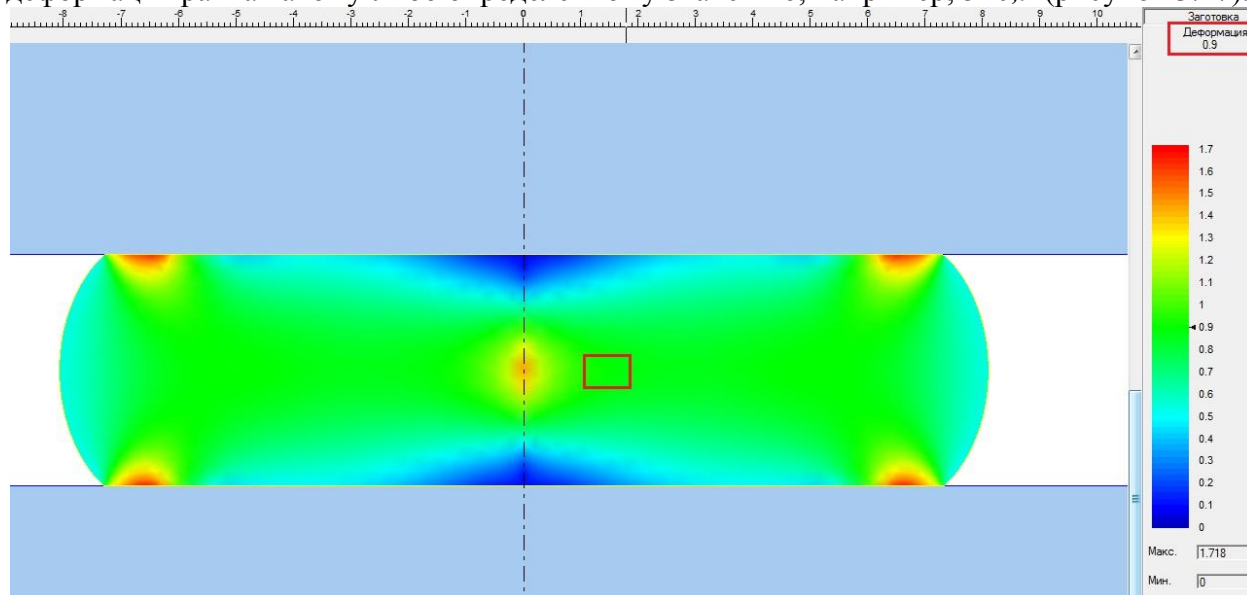


Рисунок 3.17 - Выбор области на сечении образца где накопленная деформация $\varepsilon=0,9$

Далее средствами программы Qform определим температуру в данной области (рисунок 3.18). При этом прирост температуры в результате теплового эффекта пластической деформации будет равен разнице между измеренной температурой в рассматриваемой области и начальной температурой образца, в данном случае $305,6-300=5,6$ (рисунок 3.18).

По выражению (12) рассчитаем теоретический прирост температуры образца при накопленной деформации $\varepsilon=0,9$. Для вычисления теоретической температуры образца можно воспользоваться частью программного кода, написанного в программе Matlab при выполнении первой работы, но несколько видоизменить его и доработать, чтобы при помощи некоторой функции можно было определять температуру образца при различных степенях накопленной деформации.

Если теоретический прирост температуры образца (при определённом значении накопленной деформации) совпадает с приростом температурой образца при моделировании (для того же значения накопленной деформации) или отличается от него не более чем на $\pm 10\%$, то данные по теплоёмкости материала введены верно.

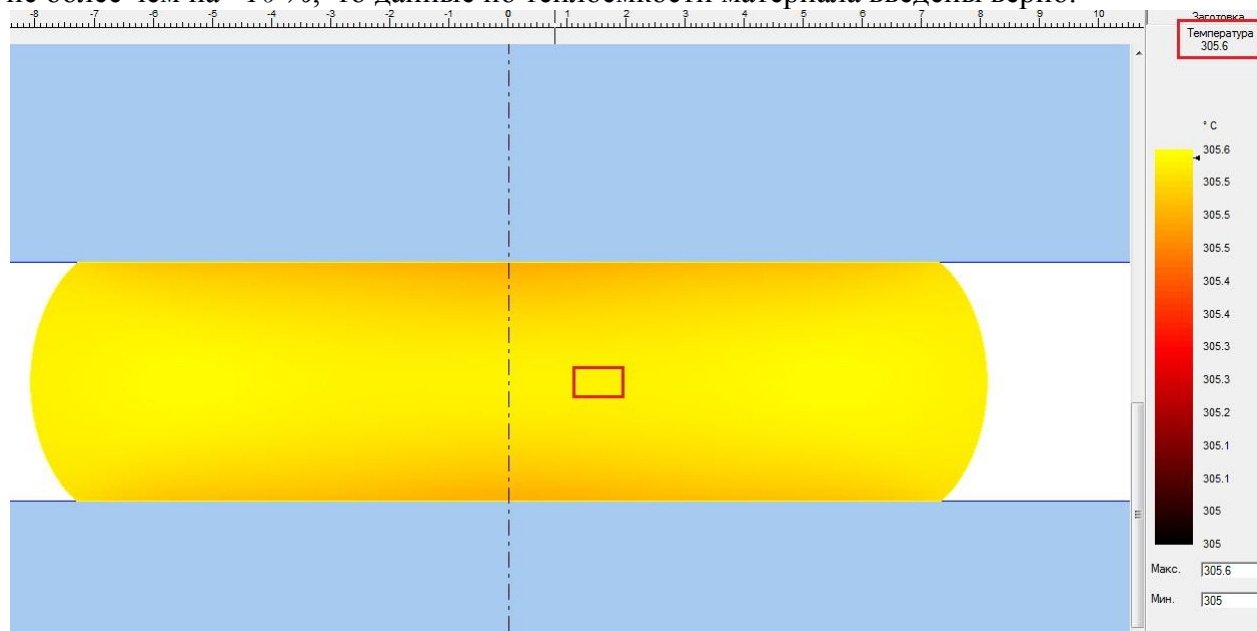


Рисунок 3.18 - Определение температуры в выбранной области

По аналогии сделайте сравнение расчётной и экспериментальной диаграмм сил для других значений скоростей деформации в соответствии с вариантом задания (варианты заданий определяются в работе №1).

Контрольные вопросы и задания

- 1) Чем отличаются понятия постоянной скорости деформации и постоянной скорости деформирования?
- 2) В каких случаях целесообразнее применять закон трения Кулона-Аматона, а в каких закон трения Зибеля.
- 3) Попадает ли расчётная диаграмма силы в доверительный интервал? Если нет, то чем это можно объяснить?
- 4) Совпадает ли теоретический и расчётный прирост температуры вызванный тепловым эффектом пластической деформации? Если нет, то как это можно объяснить?
- 5) Сделайте сравнение теоретического и расчётного прироста температуры при деформации образца для значений накопленной деформации $\epsilon=0,15$, $\epsilon=0,4$ и $\epsilon=0,55$ для каждого значения скорости деформации в соответствии со своим вариантом задания.
- 6) Рассчитайте любой из вариантов моделирования механических испытаний с значением фактора трения $m=0,4$. Как изменилась диаграмма силы? Чем это можно объяснить?
- 7) Рассчитайте любой из вариантов моделирования механических испытаний с значением теплоёмкости материала $c=1300((H^*_{\text{м}})/(kJ/^{\circ}C))$. Как изменилась диаграмма силы? Чем это можно объяснить?

Список литературы

1) Калпин Ю.Г. «Разработка обобщенной теории и технологии объемной изотермической штамповки». Дисс. докт. техн. наук. - М.: МАМИ, 1986.

2) Воронков В.И., Потапенко К.Е., Определение кривых текучести материалов с применением компьютерного моделирования. // Материалы 77-й Международной научно-технической конференции ААИ 2012 г. - М.: ©Московский государственный технический университет «МАМИ», 2012 – стр. 115-124. -ISBN 978-5-94099-062-8.

3) Петров П.А., Перфилов В.И. Исследование упрочнения алюминиевого сплава АМг6 на начальном участке кривой текучести при повышенных температурах. // Моделирование, программное обеспечение и наукоемкие технологии в металлургии. Труды 2-й Всероссийской научно-практической конференции. / Под общей редакцией С.П.Мочалова. – Новокузнецк: СибГИУ, 2006 – стр. 205-212.

Учебное издание

Воронков Виктор Иванович
Петров Павел Александрович, к.т.н., доц.
Потапенко Константин Евгеньевич

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к выполнению практических работ
по курсу «Компьютерные технологии
в машиностроении»

Под редакцией авторов
Оригинал-макет подготовлен редакционно-издательским отделом
Университета машиностроения

По тематическому плану внутривузовских изданий учебной литературы на 2013 г.

Подписано в печать 19.02.13. Формат 60х90 1/16. Бумага 80г/м²
Гарнитура «Таймс». Ризография. Усл. печ. л. 5,0.
Тираж 20 экз. Заказ № 31-13.

Университет машиностроения
107023, г. Москва, Б. Семеновская ул., 38.