

Правительство Российской Федерации

Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики»

Факультет Прикладной Математики и Кибернетики  
Кафедра Механики и Математического Моделирования

## **ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

На тему

Имитационное моделирование механических испытаний по сложной программе  
нагружения.

---

---

---

---

Студент группы № М-93  
Пузино Юрий Алексеевич  
(Ф.И.О.)

Научный руководитель  
к.т.н., доцент, Аксёнов Сергей  
Алексеевич  
(должность, звание, Ф.И.О.)

Москва 2013

## **Аннотация**

Данная работа рассматривает процессы обработки металлов давлением и способы их моделирования в CAD\CAE системах. Достаточно подробно рассматривается эффект сверхпластичности и условия его возникновения. С учётом возможностей данного эффекта, моделирование сверхпластичности и определение условий его возникновения на данный момент является приоритетной задачей математического моделирования.

Мною были проанализированы различные экспериментальные работы, в которых рассматривались виды механических испытаний для нахождения определённых параметров эффекта сверхпластичности. В основном это скорость деформации, напряжение и температура.

Основной поставленной задачей данной работы является написание и тестирование компонентов системы математического моделирования ЕММА. В качестве тестового задания была выбрана осесимметричная задача: имитационное моделирование растяжения заготовки по сложной программе нагружения. Были вычислены необходимые параметры для проведения данного теста – это условие постоянства скорости деформации и скорость движения штампа. Имитационное моделирование было успешно проведено для различных геометрических конфигураций и были получены сведения о распределении различных физических величин (например, интенсивность скорости деформации).

## Оглавление

№ страницы

Введение.....	5
Глава 1. Математическое моделирование .....	7
1.1. Процессы обработки металлов давлением.....	7
1.2. Применение САПР (CAD/CAE).....	10
1.3. Граничные условия и уравнения состояния. ....	12
1.4. Описание свойств материалов.....	14
Глава 2. Сверхпластичная формовка .....	16
2.1. Структурное состояние. ....	16
2.2. Температурные условия.....	17
2.3. Скорости деформации и диапазоны скоростей. ....	18
Глава 3. Механические испытания.....	20
3.1. Задача определения скоростного диапазона.....	20
3.2. Виды механических испытаний металлов. ....	23
3.3. Результаты и интерпретация. ....	28
Глава 4. Обратный анализ .....	31
4.1. Анализ в задаче интерпретации результатов испытаний. ....	31
4.2. Моделирование испытаний как этап обратного анализа. ....	34
Глава 5. Моделирование испытаний на растяжение .....	35
5.1. Постановка задачи. ....	35
5.2. Необходимые этапы. ....	36
Глава 6. Реализация этапов моделирования .....	38
6.1. Описание чертежей .....	38
6.2. Загрузка чертежей.....	39
6.3. Редактирование чертежа. ....	40
6.4. Сетка конечных элементов. ....	42
6.5. Операции. ....	45
6.6. Инструмент.....	45
6.7. Траектория.....	47
6.8. Сборка.....	49

6.9. Ядро.....	51
6.10. Результаты.....	52
Заключение.....	56
Список используемой литературы.....	57
Приложение.....	61

## Введение

При проектировании технологических процессов обработки металлов давлением (ОМД) применяются современные компьютерные программы, позволяющие строить прогнозы изменения формы материала, рассчитывать важные термомеханические и энергетические характеристики процессов. При этом адекватность построенных прогнозов напрямую обусловлена корректностью и адекватностью задаваемых граничных условий (ГУ) и механических свойств материала.

Знание поведения механических свойств материала при горячей деформации позволяет разрабатывать технологические процессы формоизменения в диапазонах температур и скоростей деформации, обеспечивающих наилучшие условия для пластического или сверхпластического течения. Таким образом, использование особенностей поведения данного материала при горячем деформировании, позволяет разрабатывать технологии получения сложных изделий за меньшее число переходов, снижать энергозатраты, увеличивать коэффициент использования металла (КИМ) и, в конечном итоге, повышать рентабельность производства.

Под моделью механических свойств материала при горячей деформации понимается зависимость напряжения пластического течения металла от интенсивности деформации, скорости деформации и температуры:

$$\sigma_i = \sigma_i(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i, T) \quad (1)$$

При этом полагают, что зависимость  $\sigma_i(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i, T)$  не определяется напряжённо деформированным состоянием, то есть является характеристикой самого материала.

Определение данной зависимости для каждого конкретного сплава является отдельной сложной задачей, для решения которой материал подвергают специальным механическим испытаниям. Тип эксперимента, как правило, выбирают исходя из специфики моделируемого процесса. Для

корректной интерпретации результатов таких испытаний необходимо учитывать их специфику, принимая во внимание такие факторы, как неравномерность распределения интенсивностей и скоростей деформации в объёме образца, возможное изменение температуры образца в процессе деформирования, трение, и другие факторы. Аналитически учесть все особенности того или иного механического испытания при интерпретации его результатов, как правило, не получается. Именно поэтому для этих целей применяются методики, включающие имитационное моделирование экспериментов и основанные на процедуре обратного анализа [1]. Вопросам интерпретации результатов механических испытаний посвящён ряд научных работ, опубликованных в последнее время, как в России, так и за рубежом [2-8].

Компьютерное моделирование механических испытаний служит, в первую очередь, для корректной интерпретации их результатов, и особенно актуально в случаях, когда свойства материала при деформировании имеют существенно нелинейный характер. Например, при изучении механических свойств материалов с высокой скоростной чувствительностью. В первую очередь – это сверхпластичные титановые сплавы. Сверхпластичные материалы проявляют способность к интенсивной пластической деформации без нарушения сплошности, если формоизменение происходит в узком диапазоне скоростей деформации, специфичном для каждого сплава и зависящем от температуры [9, 10]. При исследовании сверхпластичности материалов, необходимо поддерживать постоянную скорость деформации в образце. Это достигается проведением эксперимента по сложной программе нагружения, при которой скорость траверсы контролируется и изменяется в процессе эксперимента.

## Глава 1. Математическое моделирование

### 1.1. Процессы обработки металлов давлением.

При обработке металлов давлением (ОМД) изделия изготавливаются с помощью пластического деформирования исходной заготовки. Этот процесс отличается экономичностью и высокой эффективностью. Обработка давлением металлов позволяет получить на выходе детали различных размеров (от пары миллиметров до нескольких десятков метров).

Процессы ОМД преследуют такие цели как:

1. создание продукции (сложной по форме) из заготовок относительно простой формы;
2. изменение кристаллической структуры исходного материала для изменения его свойств (например, увеличение запаса прочности).

К процессам ОМД относят прокатку, волочение, прессование, ковку, штамповку и т.д. В основе процессов ОМД лежит процесс деформации, суть которого состоит в том, что при отсутствии изменения массы происходит изменение формы исходной заготовки. Все расчёты размеров и форм тел при ОМД основаны на законе постоянства объёма. Смысл этого закона состоит в том, что объём тела до и после деформации остаётся постоянным:

$$V_1 = V_2 = const, \quad (2)$$

где  $V_1$  и  $V_2$  – объёмы исходной заготовки до и после деформации.

Вторым основным положением в теории ОМД является закон наименьшего сопротивления. Изменение исходной формы металла может происходить в направлении трёх основных осей. Каждая точка заготовки стремится переместиться в том направлении, где создаётся минимальное сопротивление её перемещению.

При свободном изменении формы тела от одной к другой, наибольшая деформация всегда происходит в том направлении деформации, в котором большинство сменивших положение точек встречает наименьшее сопротивление своему перемещению.

Данные выше законы распространяются на все способы ОМД. При этом первый закон используют для определения размеров исходных обрабатываемых деталей, а второй закон используют для определения размеров и форм поперечного сечения, которые получит заготовка с заданным сечением в процессе ОМД. Все процессы ОМД характеризуется очагом деформации и коэффициентом деформации.

Существуют два основных способа исследования и анализа краевых задач и процессов, связанных с обработкой металлов давлением (ОМД):

- физическое моделирование;
- математическое моделирование.

Физическое моделирование всегда очень сложно провести и дорого обходится. Поэтому, несмотря на очевидную необходимость и полезность данного вида исследований, их стараются проводить лишь в крайних случаях – когда требуется либо окончательное подтверждение результатов математического моделирования, либо когда математическую модель в принципе невозможно построить.

Понятие математической модели трактуется очень широко. Под понятием математической модели процесса пластического изотермического течения при обработке металлов давлением понимают приблизительное описание данного процесса, позволяющее вычислить распределение скоростей, деформаций, напряжений, вероятность разрушения металла и определить оптимальные условия деформирования [11].

При решении сложных технологических задач ОМД, учитывающих неоднородности напряжённо-деформированного состояния, накопленные деформации и другие факторы, обычно используют приближённые численные методы решения, позволяющие построить последовательность решений, в пределе сходящихся к точному решению. По способу построения последовательных приближений данные методы разделяются на итерационные и прямые, сводящие решение задачи к конечным системам алгебраических уравнений.



Численные методы позволяют решить любую краевую задачу математической физики. С их помощью находятся числовые значения параметров в любых дискретных точках объёма деформируемого тела. При использовании данных методов простота при формулировке определяющих уравнений не имеет принципиального значения. При корректно поставленной задаче можно описать достаточно сложные модели сред. Численные методы облегчают анализ нестационарных процессов, позволяя определять локальные характеристики процессов. Знание данных характеристик необходимо при анализе образования дефектов в процессе деформирования. В данной работе в качестве численного метода выбран один из проекционно-сеточных методов, а именно метод конечных элементов (МКЭ).

Метод конечных элементов, с помощью которого получены различные решения множества задач прикладной механики и ОМД [12, 13], состоит в дискретно-непрерывном подходе, который достаточно часто используется в механике и физике. При данном подходе непрерывная среда представляется как совокупность элементарных конечных элементов. Основные этапы МКЭ таковы:

- 1) Вся рассматриваемая область разбивается на относительно простые элементы. В плоской задаче – треугольники или четырёхугольники, в объёмной задаче – параллелепипеды или тетраэдры.

- 2) Искомую непрерывную функцию аппроксимируют функцией специального вида через узловые параметры на каждом конечном элементе  $a$ , следовательно, и во всей области.

- 3) Формируется матрица жёсткости (сначала для отдельных элементов, а потом для всего тела).

- 4) Определяются узловые параметры сетки конечных элементов путём решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Таким образом, интегрирование заменяется суммированием, а

дифференциальные уравнения в частных производных заменяются системой обыкновенных дифференциальных уравнений.

В данном методе при увеличении числа элементов и уменьшении их размеров поведение нашей системы приближается к поведению сплошной среды. Главное преимущество МКЭ состоит в том, что разделяя область на малые элементы можно аппроксимировать поля перемещений и скоростей для очага деформации сколь угодно сложной формы. Область даже может содержать «дыры» различных типов, что при применении других методов создаст трудности для решения (например, для метода Ритца). Ещё одним несомненным плюсом данного метода является то, что можно получать историю нагружения данного тела с учётом реальных граничных условий (ГУ) процесса и свойств материала. Получаемая матрица жёсткости имеет ленточную форму, что ведёт к снижению количества потребляемой памяти, а также к слабой чувствительности к погрешности округления решения системы.

К основным недостаткам МКЭ можно отнести резкий рост потребностей ресурсов вычислительной техники с ростом размерности задачи и количества элементов в разбиении.

### *1.2. Применение САПР (CAD/CAE).*

Наиболее эффективные технологии, которые реализуют данный метод, представляют собой, так называемые CAD/CAE-системы (т.е. системы автоматизированного проектирования, или САПР). Как известно, процесс проектирования любого технического изделия принято разделять на несколько этапов:

- 1) Формирование внешнего вида изделия
- 2) Анализ его характеристик
- 3) Оптимизация конструкции
- 4) Создание экспериментального образца
- 5) Натурные испытания

Проектирование имеет сложный итерационный характер, ему свойственно неоднократное возвращение к началу проекта. Поэтому вопрос автоматизации приобрёл особую актуальность для большинства предприятий. Разработка CAD/CAE-систем позволяет полностью моделировать весь жизненный цикл изделия. Тем самым они позволяют сэкономить время, материалы и денежные средства для создания изделий или конструкций.

На данный момент существует деление CAD/CAE-систем на системы верхнего, среднего и низкого уровней. Это деление не чёткое, так как системы среднего уровня порой приближаются по функционалу к системам верхнего уровня.

Верхний (тяжёлый) уровень включает в себя системы с передовым инструментарием: имитация сложных технологических процессов, развитые средства анализа, базы данных с текстовой и графической информацией. К данной группе относят такие программы, как CATIA, Pro ENGINEER и др.

К системам среднего уровня относят такие программы, как AutoCAD, SolidWorks, MasterCAM и другие.

К нижнему (лёгкому) уровню относят системы, позволяющие создавать чертежи, эскизы, двухмерные (иногда и трёхмерные) модели и производить механическую обработку этих заготовок. Сюда можно отнести такие программы, как Medusa4, AllyCAD, КОМПАС и др.

Но наличие нескольких рабочих станций с совершенными по функциональным возможностям системами не всегда приводит к принципиальному улучшению качества работ на предприятии. Причин может быть несколько. Во-первых, очень сильно влияет высокая стоимость «тяжёлых» CAD/CAE-систем, что не позволяет предприятиям даже с устойчивым финансовым положением приобретать их. Во-вторых, при разработке принципиально новых технологий производства не всегда есть возможность воспользоваться чужим (иностранном) пакетом. В-третьих,

некоторые предприятия предпочитают пользоваться своими системами из-за возможностей исправить или улучшить какие-то их части или модули.

В данной же работе система автоматизированного проектирования лёгкого уровня ЕММА создаётся с определёнными целями использования: для моделирования специфичных процессов ОМД и организации обучения методам программирования на примере реальной разработки CAD\CAE-системы, так как на данный момент исходный код доступен для студентов.

### 1.3. Граничные условия и уравнения состояния.

Для построения математической модели формоизменения рассмотрим деформируемое тело с границей  $S$  в декартовой системе координат  $x_m$  в некоторый момент времени  $t$ . Обозначим вектора поверхностных сил, действующих на части граничной поверхности  $S_\sigma$ , через  $\bar{P}_n = P_{n_i} \cdot \bar{\varepsilon}_i$ , вектор скоростей перемещений, заданный на другой части граничной поверхности  $S_u$ , через  $\bar{\varphi} = \varphi_i \cdot \bar{\varepsilon}_i$ . На участке границы  $S_{\sigma u}$  заданы смешанные граничные условия контактного типа. Очевидно, что  $S = S_\sigma + S_u + S_{\sigma u}$ . Тогда граничные условия на контуре можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} \bar{S}_n &= \bar{P}_n, \quad \bar{S}_n = \bar{S}_i \cdot L_{n_i} = \sigma_{ij} \cdot L_{n_i} \cdot \bar{k}_j, \quad \bar{P}_n = P_{n_i} \cdot \bar{\varepsilon}_i, & \text{на } S_\sigma \\ \bar{u} &= \bar{\varphi}, \quad \bar{u} = u_i \cdot \bar{\varepsilon}_i, & \text{на } S_u \\ \bar{P}_n &= \bar{P}_\alpha \cdot L_{n_\alpha} = \sigma_{\alpha_j} \cdot L_{n_\alpha} \cdot \bar{\varepsilon}_j, \quad \bar{u} = u_\beta \cdot \bar{\varepsilon}_\beta, & \text{на } S_{\sigma u} \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $\alpha, \beta \in \{1, 2\}$ ;  $\alpha + \beta = 3$ ;  $L_{n_i}$  – компоненты нормали к поверхности в рассматриваемой точке;  $\bar{\varepsilon}_i$  – единичные векторы декартовой системы координат;  $u_i$  – компоненты скорости перемещения;  $\sigma_{ij}$  – компоненты тензора напряжения;  $\bar{P}_n$  – вектор распределённых поверхностных сил, действующих на участок граничной поверхности  $S_\sigma$ ;  $\bar{\varphi}$  – вектор скоростей перемещений, заданный на участке граничной поверхности  $S_u$ .

Контур  $S$  и соотношение различных типов границ в процессе деформирования непрерывно изменяются, т.е. зависят от времени. Координаты границ пересчитываются по формуле

$$\bar{x}(t) = \bar{x}(t_0) + \int_0^t u(t)dt, \quad (4)$$

где  $\bar{x}(t_0) \in S(t_0)$  и определяет начальное положение границы, а  $\bar{x}(t) \in S(t)$  определяет текущее состояние.

Типы границ определяются в процессе решения. Если часть границы свободна, то реализуют условия в напряжениях, для не проскальзывания и непроницаемости инструмента используют кинематические ГУ при скольжении и симметрии – смешанные.

Среда предполагается сжимаемой, что позволяет использовать при конечноэлементном решении простые и удобные треугольные элементы. Для горячих металлов девиаторы напряжений и скорости деформаций пропорциональны:

$$\sigma_{ij} - \sigma \cdot \delta_{ij} = 2\mu \cdot (\dot{\epsilon}_{ij} - \dot{\epsilon} \cdot \delta_{ij}) \quad \text{и} \quad 2\mu = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma_{ii}}{\dot{\epsilon}_{ii}} \quad (5)$$

А шаровые части тензора напряжений и тензора деформации связаны законом Гука:

$$\sigma = K \cdot \sum_{i=0}^{n-1} \Delta t_i \cdot \dot{\theta}_i + K \cdot \Delta t_n \cdot \dot{\theta}_n = \sigma^* + K \cdot \Delta t \cdot \dot{\theta} \quad (6)$$

Соотношение между напряжениями и скоростями деформации запишется в этом случае следующим образом:

$$u_{i,j} = \mu(u_{i,j} + u_{j,i}) + \left[ \left( K \cdot \Delta t - \frac{2}{3} \mu \right) u_{p,p} + \sigma^* \right] \delta_{ij}. \quad (7)$$

Изменения скорости перемещения среды считаются достаточно малыми, чтобы пренебречь динамическими эффектами. Весь временной интервал, в котором решается задача, разбивается на подинтервалы  $\Delta t$ , внутри которых считается, что изменение скорости перемещений не происходит. Это позволяет на каждом шаге деформирования выполнять уравнения равновесия:

$$u_{ij,j} = 0. \quad (8)$$

#### 1.4. Описание свойств материалов.

Сопротивление пластической деформации  $\sigma$  – одна из важнейших характеристик обрабатываемого металла, зависящая главным образом от температуры  $T$ , степени деформации  $\varepsilon$  и скорости деформации  $\dot{\varepsilon}$ . В настоящее время в литературе приведено большое количество зависимостей  $\sigma = \sigma(T, \varepsilon, \dot{\varepsilon})$  в различных интервалах температур, степени и скорости деформации. Эти данные были получены как теоретическими, так и экспериментальными методами. Например, хорошие данные по определению сопротивления деформации достигаются по методу термомеханических коэффициентов:

$$\sigma = \sigma_k \cdot K_T \cdot K_\varepsilon \cdot K_{\dot{\varepsilon}} \quad (9)$$

где  $\sigma_k$  – базовое значение сопротивления для данного вида стали при заданное температуре, а  $K_T$ ,  $K_\varepsilon$ ,  $K_{\dot{\varepsilon}}$  – термомеханические коэффициенты.

Однако в производственных условиях не всегда удобно задавать свойства обрабатываемого материала в виде зависимости, так как иногда отсутствуют необходимые коэффициенты, а их вычисление потребует большого числа экспериментальных данных. Одновременно с этим, реализация всех зависимостей  $\sigma = \sigma(T, \varepsilon, \dot{\varepsilon})$  нецелесообразна.

Для формализации данных с целью использования в математических моделях различных процессов ОМД используется следующая идея. Значения напряжений при требуемой температуре, скорости и степени деформации вычисляется как последовательная аппроксимация значений напряжения для имеющихся в таблице ближайших значений температуры, скорости и степени деформации.

Подробнее процесс описывается так. В файл с данными заносится информация о типе металла, интервалах изменения  $T$ ,  $\varepsilon$ ,  $\dot{\varepsilon}$ . Далее вносятся: количество точек разбиения для степеней и скоростей деформации, а также температуры  $(n_1, n_2, n_3)$ . И записываются значения температуры, степени

деформации, скорости деформации и соответствующие значения сопротивления пластической деформации в точках.

Теперь, зная сопротивление пластической деформации в  $n_1 \times n_2 \times n_3$  точках пространства можно найти  $\sigma$  в любой точке пространства. Для этого необходимо знать восемь значений  $\sigma$  в ближайших точках с меньшими и большими значениями температуры, скорости и степени деформации.

## Глава 2. Сверхпластичная формовка

Сверхпластичность определяется как способность материала к вязкопластической деформации и характеризуется следующими признаками:

- 1) Повышенная чувствительность напряжения течения к изменению скорости деформации (т.е. повышенная склонность к скоростному упрочнению).
- 2) Высокая устойчивость течения, обеспечивающая большой ресурс деформационной способности. При растяжении таких материалов удлинение может достигать от сотен до тысяч процентов.
- 3) Напряжение течения значительно меньше предела текучести материалов в обычном пластическом состоянии.

Эти свойства используются при суперпластичной формовке при производстве компонентов сложной формы, которые в случае обычных методов технологически трудны или экономически дороги. Способность некоторых сплавов претерпевать суперпластичные деформации в сочетании с их возможностью диффузионной сварки предоставляет отличные возможности производства деталей сложной формы за одну операцию, уменьшая затраты и вес, в частности при производстве аэрокосмических деталей. Сверхпластичные материалы в реологическом отношении занимают промежуточное состояние между пластичным твёрдым телом и вязкой жидкостью, поэтому могут быть отнесены к классу вязкопластичных сред.

Указанные выше признаки состояния сверхпластичности проявляются в определённых условиях. Из них самыми важными считаются: структурное состояние материала, температурные условия и скорость деформации.

### *2.1. Структурное состояние.*

По структурному признаку обычно различают две разновидности сверхпластичных металлов:



1) металлы и сплавы с мелким или ультрамелким зерном (размерами менее 10 мкм);

2) полиморфные металлы и сплавы при их деформировании в процессе фазовых превращений.

Первая разновидность – структурная (или изотермическая) сверхпластичность. Главная её особенность состоит в зависимости от размеров исходного зерна. Чем меньше исходные размеры зерна, тем больше материал способен к скоростному упрочнению и тем больше показатель его деформационной способности. Ультрамелкозернистое состояние обычно получается предварительной термической или термомеханической обработкой [14]. Для достижения структурной сверхпластичности необходимо, чтобы зёрна имели одинаковую форму. Их размеры в процессе нагрева до температуры деформации и при последующей деформации не должны претерпевать существенного изменения. Наилучшие условия для предотвращения роста зёрен имеют двухфазные сплавы. Принято считать, что структурная сверхпластичность двухфазных сплавов проявляется в наибольшей степени при условии приблизительного равенства прочностных и пластических свойств составляющих.

Вторая разновидность присуща полиморфным металлам при деформации в процессе фазового превращения. Эта разновидность сверхпластичности обнаружена у железа и сталей, титана и его сплавов и некоторых других металлов [15]. В отличие от структурной сверхпластичности (первый тип), для сверхпластичности фазового превращения характерно постоянное изменение структуры (и состава) материалов в процессе фазовой деформации.

## *2.2. Температурные условия.*

Температурный интервал для структурной сверхпластичности достаточно широк. Для различных металлов и сплавов он варьируется в следующих пределах: начиная от температуры начала рекристаллизации и

заканчивая температурами, близкими к температурам плавления. Нижняя граница интервала обусловлена диффузионными процессами в механизме деформации сверхпластичных материалов, верхняя же соответствует температуре начала собирательной рекристаллизации, при которой начинается рост зёрен. Надо учитывать тот факт, что температура структурной сверхпластичности должна поддерживаться постоянной и по всему объёму деформируемого тела в течение всего периода деформации для достижения равномерного течения материала.

Сверхпластичность, связанная с превращением, может быть реализована при различных температурных режимах: в процессе постепенно изменяющейся температуры (при нагреве или охлаждении), при термоциклировании в пределах температурной амплитуды (которая включает в себя интервал температур превращения), при фиксированной температуре вблизи интервала превращения. Исходя из этого, температура деформируемого материала также претерпевает изменения при деформации в режиме сверхпластичности, связанной с превращением.

### *2.3. Скорости деформации и диапазоны скоростей.*

Для обеспечения состояния структурной сверхпластичности скорость деформации должна быть достаточно малой, чтобы успевали протекать диффузионные процессы, но при этом достаточно высокой, чтобы в условиях высоких температур не допустить чрезмерного роста зёрен. Для большинства исследованных металлов и сплавов наилучший интервал параметра скоростей деформации, которому соответствует структурная сверхпластичность, составляет  $10^{-2} - 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ , что является промежуточным значением между интервалами скоростей высокотемпературной ползучести и скоростей деформации, используемых в стандартных процессах ОМД.

Основными характеристиками проявления эффекта сверхпластичности считают показатель чувствительности напряжения течения ( $\sigma$ ) к изменению скорости деформации ( $\dot{\epsilon}_n$ ):

$$m = \frac{d(\lg \sigma)}{d(\lg \dot{\epsilon}_n)} \quad (10)$$

и характерную S-образную форму кривой, описывающей зависимость напряжения течения от скорости деформации.

Одной из важнейших особенностей структурной сверхпластичности является сильная зависимость эффекта от размера и формы структурной составляющей объекта, а также от изменения данной структуры при деформации [16]. Принято считать, что средний размер зерна в поликристалле, обеспечивающий появление признаков сверхпластичности не должен превышать 10 мкм в течение всего процесса деформации.

Сверхпластическое поведение материалов наблюдается при значении параметра  $m > 0.3$ . В отдельных случаях проявления эффекта сверхпластичности величина  $m$  достигает значения 1. При таких значениях обеспечивается достаточно высокое скоростное упрочнение материалов, замедляющее развитие деформации и, как следствие, достигается большая пластичность.

Кривую сверхпластичности (зависимость напряжения от скорости деформации) формально разделяют на три интервала скоростей деформации. Такое поведение типично для сверхпластичных материалов [14, 15]. Для первого интервала характерным механизмом является диффузионная ползучесть. Вторым интервалом сопровождается интенсивными сдвигами и разворотами структурных составляющих сплава относительно друг друга. В последнем интервале преобладает внутризёренный дислокационный сдвиг – основной механизм обычной пластической деформации металлов и сплавов. Поэтому, чем меньше размер зёрен сплава, тем легче реализуется скольжение зёрен, тем меньше напряжение течения и выше скорость сверхпластической деформации.

## Глава 3. Механические испытания

### 3.1. Задача определения скоростного диапазона.

Одно из основных следствий вязкого характера течения материалов заключается в повышенной устойчивости деформации против локализации в условиях линейного и плоского растяжения, что объясняется влиянием скоростного упрочнения, которое проявляется тем сильнее, чем больше параметр  $m$ .

Для простоты анализа особенностей вязкого поведения сверхпластичных материалов ограничимся схемой линейного растяжения, при которой устойчивость деформации, характерная для сверхпластичности, проявляется наиболее наглядно.

Известно, что напряжение течения материала зависит от многих переменных, в том числе от состава и структуры материала, температуры  $T$ , степени  $\varepsilon$ , скорости  $\dot{\varepsilon}$  и продолжительности деформации  $t$ . Эту зависимость для конкретного материала можно выразить в дифференциальной форме:

$$d\sigma = \frac{\partial\sigma}{\partial T} dT + \frac{\partial\sigma}{\partial\varepsilon} d\varepsilon + \frac{\partial\sigma}{\partial\dot{\varepsilon}} d\dot{\varepsilon} + \frac{\partial\sigma}{\partial t} dt \quad (11)$$

Из механики испытаний на растяжение известно, что период устойчивости деформации ограничивается моментом появления шейки, которому соответствует максимум усилия  $P$ . Таким образом, условие устойчивости равномерной деформации имеет вид:

$$\frac{dP}{d\varepsilon} \geq 0 \quad (12)$$

В случае растяжения цилиндрического образца с площадью поперечного сечения  $S$  и усилием  $P$  в изотермических условиях (11) зависимость напряжения течения материала можно выразить так:

$$\frac{dP}{P} = \frac{1}{\sigma} \left( \frac{\partial\sigma}{\partial\varepsilon} d\varepsilon + \frac{\partial\sigma}{\partial\dot{\varepsilon}} d\dot{\varepsilon} + \frac{\partial\sigma}{\partial t} dt \right) + \frac{1}{S} \left( \frac{\partial S}{\partial\varepsilon} \right) d\varepsilon \quad (13)$$

Тогда (12) переписывается так:

$$\frac{1}{\sigma} \left( \frac{\partial\sigma}{\partial\varepsilon} d\varepsilon + \frac{\partial\sigma}{\partial\dot{\varepsilon}} d\dot{\varepsilon} \right) \geq \frac{1}{S} \left| \frac{\partial S}{\partial\varepsilon} \right| d\varepsilon + \frac{1}{\sigma} \left| \frac{\partial\sigma}{\partial t} \right| dt \quad (14)$$

Смысл данного выражения заключается в том, что деформация устойчива, если деформационное  $\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon}$  и скоростное  $\frac{\partial \sigma}{\partial \dot{\varepsilon}}$  упрочнение компенсируют геометрическое ослабление образца (в месте возможного появления шейки)  $\frac{\partial S}{\partial \varepsilon}$  и физическое разупрочнение за счёт напряжений  $\frac{\partial \sigma}{\partial t}$ . Данное условие деформации справедливо для вязкопластического материала, коим являются почти все обрабатываемые давлением металлы. В определённых диапазонах режимов деформации эти зависимости можно аппроксимировать различными выражениями.

Следую работе Э. Харта [17] зависимости  $\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon}$  и  $\frac{\partial \sigma}{\partial \dot{\varepsilon}}$  для случая изотермической деформации вязкопластического материала можно записать в виде

$$\frac{\partial \sigma / \sigma}{\partial \varepsilon / \varepsilon} = n, \quad \frac{\partial \sigma / \sigma}{\partial \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}} = m. \quad (15)$$

Данные коэффициенты  $n$  и  $m$  обычно называют коэффициентами деформационного и скоростного упрочнения соответственно. Это параметры, зависящие от его структуры, температурных и скоростных условий. С учётом вышеизложенного, для цилиндрического образца выражение (13) будет выглядеть так:

$$\frac{\dot{P}}{P} = \frac{\dot{S}}{S} \left( 1 - \frac{n}{\varepsilon} - m \right) + \frac{\dot{S}}{S} m, \quad (16)$$

Известно, что при растяжении обычных пластических материалов, несмотря на уменьшение поперечного сечения, усилие возрастает вследствие деформационного упрочнения. Усилие достигает максимума, когда интенсивность упрочнения оказывается недостаточной для компенсации уменьшения поперечного сечения. С этого момента начинает формироваться шейка, в зоне которой локализуется дальнейшая деформация. При постоянной скорости растяжения скорость деформации в этой зоне увеличивается обратно пропорционально отношению длины зоны к длине всего образца. Если материал образца обладает способностью к скоростному упрочнению, то увеличение скорости в зоне локализации деформации ведёт к

местному увеличению напряжения течения и, как следствие, к торможению дальнейшей локализации. Зона равномерной деформации тем больше, чем больше показатели деформационного и скоростного упрочнения. При  $m \approx 0$  (холодная деформация)  $\varepsilon_{max} = n$ .

Материалы в состоянии сверхпластичности практически неспособны к деформационному упрочнению ( $n \rightarrow 0$ ). При их растяжении максимум усилия наступает вскоре после начала растяжения, а дальнейшую деформацию можно характеризовать как «почти равномерную», в процессе которой в различных местах по длине образца периодически возникают зародыши шеек, так называемый эффект «бегающей шейки». Вследствие скоростного упрочнения их дальнейшее развитие подавляется тем интенсивнее, чем больше показатель  $m$ .

Если рассматривать условие устойчивости деформации по Харту, то деформацию следует считать устойчивой, когда небольшая неравномерность сечения  $\delta S$  по длине образца не увеличивается в процессе деформации.

Пусть рассматриваемый образец имел сечение  $S_0$ . Через некоторое время под действием усилий  $P$  образец удлинился, а его сечение на всей длине уменьшилось до  $S$ , а на указанном участке до  $S - \delta S$  (причём  $\delta S \ll S_0$ ).

Тогда отношение скоростей растяжения (после интегрирования (16)) таково:

$$\frac{\dot{S}}{\dot{S}_0} = \frac{S_0}{S} e^{\left(\frac{1}{m}-1\right)}. \quad (17)$$

Отклонения от равномерного сечения  $\delta S$  и  $\delta S_0$  можно выразить так:

$$\frac{\delta S}{\delta S_0} = \frac{S_0}{S} e^{\left(\frac{1}{m}-1\right)} = e^{\varepsilon\left(\frac{1}{m}-1\right)}. \quad (18)$$

Так как

$$\varepsilon = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \frac{S_0}{S}. \quad (19)$$

Особенность представленного уравнения является сильная зависимость отношения  $\frac{\delta S}{\delta S_0}$  от коэффициента скоростного упрочнения  $m$ . С

его увеличением затрудняется развитие локализации шейки, т.е. увеличивается устойчивость деформации.

Таким образом, задача определения условий для существования эффекта сверхпластичности сводится к нахождению экспериментальным способом определённых режимов деформации и структурного состояния исследуемого материала, при которых он проявляет наибольшую способность к скоростному упрочнению.

### 3.2. Виды механических испытаний металлов.

На данный момент существует множество испытаний металлов для нахождения режимов и параметров сверхпластичности. Далее будет изложена суть данных опытов, их различия и результаты. Первый опыт [25] заключается в сверхпластичном прессовании. Материалом для сверхпластичной деформации в данной работе служит титан Ti-6Al-4V (BT-6). Использовались заготовки в форме диска диаметром 140 мм и толщинами 0,5, 0,7, 1 и 3 мм соответственно. Примерный химический состав заготовок (в процентах) был следующим: 0.08 C, 0.05 N, 0.20 O, 0.015 H, 5.50-6.75 Al, 3.5-4.5 V, Ti. Механические свойства показаны в таблице 1:

Таблица 1.

Механические свойства.

Диапазон температур (°C)	Диапазон скоростей деформации	Напряжение, МПа	Удлинение, %
790-940	0.0001-0.001	5-30	До 1400

Для сверхпластического прессования использовались два типа матриц: одна представляла собой стальной штамп для теста с пятью отверстиями, а другой штамп состоял из стального кольца и керамического материала внутри. Выбор в качестве материала керамики для штампа матрицы важно с точки зрения его прочности, тепловых свойств и стоимости.

Неправильный выбор материалов для штампов приведёт к выходу из строя матрицы и перфорации листа в процессе формирования. Были приняты меры безопасности для гарантии того, чтобы штамп был зафиксирован и находился на желаемой высоте.

Эксперимент для изучения сверхпластичной формовки включает испытания материалов для определения характеристик. Тест с пятью отверстиями был разработан, чтобы охарактеризовать сверхпластичность сплавов Ti-6Al-4V. Испытание проводилось на основе подхода свободного формирования, и просто используя циклическое давление газа аргона для «выдува» и удара по титановому листу. При этом на самой заготовке создаются пять выпуклостей различного радиуса. Функция напряжения течения скорости деформации была получена из двухосных многокупольных тестов, взяв простую модель  $K - m$ :  $\sigma = K\epsilon^m$ . Постоянные  $K$  и  $m$  были получены из сравнения экспериментально измеренных высот куполов с несколькими симуляциями FESPF. В указанном исследовании, значения  $K$  и  $m$  равнялись 338,06 (МПа) и 0,425 соответственно. Преимущества теста формирования нескольких отверстий, по сравнению с обычными испытаниями на растяжение, заключаются в уменьшенном времени испытаний, эффективном использовании оборудования и приближенному к реальному формированию компонентов. Целью использования испытания с пятью отверстиями было определение существенных параметров для вычисления цикла давления. В дальнейшем, полученные значения напряжения целевого потока (или скорости деформации) из симуляций были использованы для моделирования создания зубного протеза.

Сверхпластичное прессование проводилось при 900°C с использованием 20-тонного гидравлического пресса. В качестве газа использовался аргон (для создания необходимого давления). Была создана металлическая матрица с пятью цилиндрическими отверстиями, и радиусы этих пяти отверстий равнялись 8.50, 9.56, 10.63, 11.69 и 12.75 мм соответственно. Штамп был помещён в индукционную печь с подогревом и



температуру повышали до 800 °С. При этой температуре в печь вносилась титановая листовая заготовка. Затем температуру дополнительно повысили до температуры формования 900 °С, и был применён зажим с давлением в 6 тонн вместе с давлением газа сверху перпендикулярно титановому листу, то есть в соответствии с циклом давления во времени. Профиль давления изначально был создан на основе эмпирического предположение о напряжении течения, а радиус среднего отверстия был использован для расчёта коэффициентов. До начала суперпластичных экспериментов, диски были тщательно зачищены. Прежде чем поместить заготовку в стальную матрицу, край диска был покрыт нитридом бора методом напыления, таким образом, чтобы он мог быть легко извлечён при температуре 700 – 800 °С. После формирования, глубину пяти отверстий измеряли и сравнивали с результатами FESPF моделирования.

Вторым типом механического испытания является испытание на растяжения, описанное для дешёвого титана в работе [26]. Соотношение напряжения и деформации являются основной информацией для изучения возможностей формирования листового металла. По своей сути, формовка дешёвых титановых (ДТ) листов достаточно сложна при комнатной температуре, поэтому процесс проще проводить при повышенных температурах формирования. Для того чтобы исследовать различные механические свойства листов дешёвого титана при различных температурах испытания на растяжение проводили при различных температурах в диапазоне от комнатной температуры до 300 °С и при различных скоростях деформации: 0,1, 0,01, 0,001 и 0,0001 сек<sup>-1</sup> соответственно. Листовые образцы для испытания на растяжение выполнены из титана марки JIS класса 1 толщиной 0,5 мм и были получены в соответствии с ASTM стандартами. Образцы разрезали вдоль плоскостей, совпадающих с направлением прокатки (0°), и при углах 45° и 90° к направлению прокатки. Образцы были сточены по краям, чтобы избежать заусенцев. Испытания на растяжение проводились с использованием тестовой машины MTS 810. Для испытаний

при повышенных температурах, нагревательная печь была установлена на самой MTS 810. Образцы нагревали до 100, 200, 300 °C и проводили испытания на растяжение. В ходе испытаний, температура образца поддерживалась постоянной, пока образец не был растянут до разрыва.

Следующие три вида испытаний (на растяжение, V-образная вытяжка и чашеобразная вытяжка) также описываются в работе [26]:

1) С тех пор, как Keeler и Backofen [28] ввели концепцию формирования диаграммы предельного деформирования (ДПД) в 1963 г., она стала широко распространённым критерием для прогнозирования разрушения при листовом формировании. Чтобы определить ДПД, испытания на растяжение проводились для листовых образцов различной ширины с использованием полусферического удара. Измеренные деформации вдоль главных и побочных осей эллипса называются основными и побочными деформациями, соответственно. Они также являются основными измеренными деформациями на плоскости.

2) Поскольку дешёвый титан имеет более низкое значение модуля упругости, чем у стали, упругость может быть очень важным параметром в процессе прогиба. В указанном исследовании, проводилось испытание на V-образный изгиб для изучения упругих свойств листов из ДТ при различных температурах формирования. Нижний штамп имеет угол раскрытия 90°. С целью изучения влияния радиуса штампа на параметр упругости были подготовлены инструментальные наборы с ударными радиусами от 0.5 до 5.0 мм и приращением 0.5 мм. Лист ДТ толщиной 0.5 мм, длиной 60 мм и шириной 15 мм был использован в качестве образца. Для испытаний при повышенных температурах, оба инструмента и образцы были заключены в нагревательной печи.

3) Предельный коэффициент вытяжки (ПКВ), который определяется как отношение наибольшего диаметра круглой заготовки ( $D_0$ ) к диаметру пуансона ( $D_p$ ) в процессе успешной вытяжки кругового цилиндра-чаши, является популярным индексом, используемым для описания формовки

листа металла. Большее значение ПКВ означает большую вытяжку, то есть лучшую формуемость. В указанном исследовании, пуансона и матрицы показаны были использованы для испытаний на выдавливание цилиндрических чаш. Испытания проводили при разных температурах: комнатной температуре, 100 и 200 °С соответственно. Нагревательные приборы, используемые в испытаниях на растяжение, были взяты для испытаний при повышенных температурах. Для того чтобы успешно провести процесс вытяжки, размер заготовки и усилия держателя заготовки адаптивно регулировались для устранения дефектов, таких как разрушение и неровности. Если на заготовке намечалась тенденция к трещине, то усилие держателя будет скорректировано до меньшего значения, до тех пор, пока разрушения не было устранено без возникновения морщин. Когда регулировке усилия держателя заготовки не удастся устранить появления неровностей, то в тот же момент будет предпринята попытка снижения размера заготовки, чтобы избежать разрушения.

Последним рассмотренным опытом будет испытание прокатки, которое описано в работе [27]. В качестве заготовки использовался слиток Ti-6Al-4V, который был изготовлен в корпорации Flowserve (Дейтон, Огайо) с помощью подхода индукционной плавки (ISM). Ломтики толщиной среза в 25-мм были созданы из слитка и подверглись процессу прокатки по двум ортогональным направлениям для изготовления листа с конечной толщиной 2.15 мм. Начальная температура прокатки была 954 °С. Хотя материал был прокатан в литом состоянии, никаких трещин не наблюдалось. Два ортогональных участка листа были металлографически отполированы для дополнительных микроструктурных наблюдений. В литой заготовке из Ti-6Al-4V-0.1B, TiB частицы в основном находятся в  $\beta$  фазе. В противоположность этому, после прокатки TiB частицы находятся во всех трёх фазах:  $\alpha/\alpha$  фазе,  $\beta/\beta$  фазе и  $\alpha/\beta$  на границе раздела фаз. Средний размер  $\alpha$  зерна составляет  $\sim 5$  нм. Это свидетельствует о структурном изменении материала после испытания.

### *3.3. Результаты и интерпретация.*

В испытании с пятью отверстиями при сверхпластичном формировании сплава Ti-6Al-4V и поведение верхнего основания зубного протеза одного и того же сплава проводились при различных скоростях деформации. Результаты показали, что оптимальные параметры для создания эффекта сверхпластичности могут быть получены за счёт правильного выбора скорости деформации и толщины сплавов. Моделирование испытания с пятью отверстиями предусматривает определение отношения напряжения-деформации. Были определены скорости и оценки моделируемого начального размера зерна, а так же наблюдалось согласие между экспериментальными и смоделированными данными по глубине выдавленных куполов. После титанового сплава был охарактеризован компонент зубного протеза (частичное верхнее основание протеза) и были получены полезные параметры на том же тесте из пяти отверстий. Были удовлетворительно смоделированы с использованием анализа мембраны и твёрдых частей. Сделан вывод, что техники суперпластичной формовки в сочетании с моделированием МКЭ могут быть применены для изготовления зубных протезов.

В следующей работе [26], при проведении различных экспериментов, исследовалась формуемость штамповки листов из дешёвого титана при различных температурах формирования. Были рассмотрены механические свойства листа из ДТ при различных температурах и соотношения напряжение-деформация, полученные из экспериментов показывают, что лист ДТ имеет более высокий предел текучести и меньшее относительное удлинение при комнатной температуре. Но при этом пропорционально уменьшается текучесть и увеличивается удлинение, когда лист нагревают до температуры в 300 °С. Следует отметить, что соотношения напряжение-деформация, полученные из испытаний на растяжение при комнатной температуре показали, что листы дешёвого титана могут быть сформированы

в пустотелые изделия при комнатной температуре, хотя коэффициент текучести немного выше. Была получена диаграмма предельного деформирования (ДПД) листа ДТ при комнатной температуре и она оказалась не столь высока, как у холоднокатаной стали. Однако, минимальная основная скорость деформации штампа, равная  $0.34 \text{ сек}^{-1}$ , также обеспечивает оптимальную возможность для суперпластичной формовки листа ДТ, который будет сформирован при комнатной температуре. Испытания на выдавливание круговой чашки показывают, что лист ДТ имеет значение ПКВ, равное 2.2 при комнатной температуре, и успешно штампуется наружным кольцом с глубиной 20 мм. Это также подтверждает, что лист ДТ может быть сформирован в пустотелые изделия при комнатной температуре. Тем не менее, в процессе испытания вытяжки цилиндрической чашки выявлена нестабильность процесса и это показывает, что лист ДТ несёт значительную анизотропию в плоскости, что также может повлиять на формуемость глубоких полостей. Влияние скорости деформации на напряжённо-деформированное соотношение также было исследовано при комнатной температуре. Экспериментальные результаты показывают, что напряжённо-деформированного отношения становятся стабильными, когда скорость деформации меньше, чем  $0.001 \text{ сек}^{-1}$ . В тестах на V-изгиб, экспериментальные результаты показывают важную информацию, которая говорит о том, что упругость может быть уменьшена при повышенных температурах формирования. Кроме того, упругость может быть уменьшена, если используется меньший радиус пуансона для формирования изделия.

В последнем испытании (на прокатку) [27] были сделаны следующие выводы:

- 1) Значения параметра  $m$ , определённого из  $\dot{\epsilon}$  для тестов на расширение, показывают, что материал Ti-6Al-4V (BT-6) проявляет свойства сверхпластичности в интервале скоростей  $\dot{\epsilon}$  от  $10^{-5}$  до  $10^{-3} \text{ сек}^{-1}$  и интервале температур 775 – 900 °С.

- 2) Тест на растяжение при постоянной скорости  $\dot{\epsilon}$  подтверждает, что наблюдается сверхпластичное поведение листов Ti-6Al-4V-0.1B при значении  $\dot{\epsilon} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ сек}^{-1}$  в интервале температур 725 – 950 °С.
- 3) Оптимальной температурой для суперпластичного формования является температура в 900 °С. При данной температуре, материал может быть подвергнут сверхпластичной формовке при скорости деформации  $\dot{\epsilon} = 10^{-2} \text{ сек}^{-1}$ .
- 4) Оптимальная температура для сверхпластичной формовки для Ti-6Al-4V-0.1B такая же, как и для Ti-6Al-4V. Однако, поток напряжения меньше для Ti-6Al-4V-0.1B.
- 5) Микроструктурные исследования подтверждают наличие свойств суперпластичности при температуре в 900 °С и скорости деформации  $\dot{\epsilon} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ сек}^{-1}$ .

## Глава 4. Обратный анализ

### *4.1. Анализ в задаче интерпретации результатов испытаний.*

Точность численного моделирования процессов обработки металлов давлением, сильно зависит от правильности описания реологических свойств материала, а также механических и тепловых граничных условий (ГУ). В работе [18] была экспериментально подтверждена возможность использования этого метода для правильной интерпретации результатов механических испытаний. Обратный анализ позволяет исследовать поведение материалов на основе разнообразных механических испытаний. К примеру, при применении обратного анализа становится возможным исследовать влияние предварительного нагревания образца до запуска теста, даже если тест проводится с использованием разных машин, что было показано в [19].

При интерпретации результатов большинства пластометрических тестов возникают проблемы, связанные, как правило, с различными формами неравномерности распределения термомеханических характеристик в образце, трением, генерируемым в процессе деформации теплом и т.п. Получаемые в результате эксперимента данные могут сильно зависеть от геометрии образца и штампов. Так, к примеру, наибольшее влияние на результаты экспериментов о плоской деформации сжатия (PSCT) оказывает неравномерность пластического течения в очаге деформации, вызванная жёсткими концами образца, и боковое уширение очага деформации, приводящее к увеличению контактной поверхности.

Точность численного моделирования процессов формирования в большой степени зависит от правильности описания реологических свойств материала, а также от механических и тепловых граничных условий. Оценка реологических параметров в различных условиях деформации – в процессах пластометрических испытаний на сжатие, растяжение или кручение – является одной из главных задач при моделировании термомеханических

процессов. Неоднородности и локализация деформаций, влияние трения и тепла, возникающего из-за деформации и из-за трения, могут вызывать некоторые нарушения в ходе испытаний. Многие исследования были посвящены разработке метода, который бы устранял влияние возмущений в ходе испытаний и позволял оценить, как параметры материала зависят от этих явлений. Задача оценки параметров при такой постановке определяется как обратная.

Большинство из приложений обратного анализа использует значение нагрузок в тесте в качестве единственных данных для ввода. Существует возможность того, что этот подход не даёт единственное решение, и что аналогичное значение целевой функции может быть получено для различных комбинаций оптимизированных параметров. В работе [18] было высказано предположение, что введение двухкритериальной оптимизации в обратном анализе позволит более эффективно и точно интерпретировать результаты пластометрических тестов. Если чувствительность нагрузок и размеры по сравнению со значениями переменных оптимизацией разные, то, скорее всего, в этой ситуации существует единственное решение. Первый критерий в предлагаемом подходе, как и в обычном обратном методе, основан на сравнении измеренной и прогнозируемой нагрузки. Второй критерий включает в себя измерения и предсказания формы образца после деформации.

Одним из существенных факторов, влияющих на силовые параметры эксперимента, является температура. Задача поддержания постоянной температуры во время механических испытаний даже на самом современном оборудовании представляет собой сложную задачу. Механизм нагревания и охлаждения образца в процессе испытания зависит от трёх основных факторов: нагревания, вызванного прохождением электрического тока; нагревания, вызванного деформацией материала; охлаждения за счёт теплоотвода в охлаждаемые захваты. Учёт всех этих факторов является отдельной сложной задачей, решение которой требует определения большого



числа эмпирических параметров. При решении методом конечных элементов, распределение температуры в объёме образца обычно считается постоянным, иными словами, на каждом шаге моделирования решается изотермическая задача формоизменения. При этом постоянная в объёме образца температура изменяется во времени в соответствии со значениями, измеренными при тестировании – такой подход был реализован, в частности, в работе С.А. Аксёнова [20].

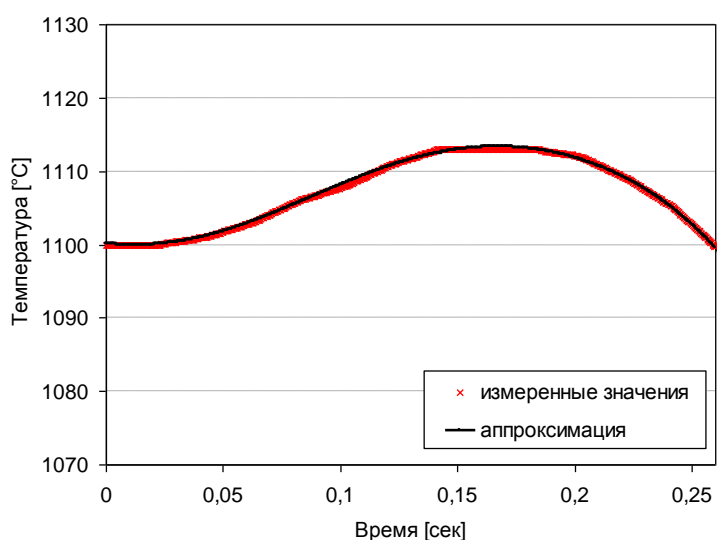


Рис.1. Изменение температуры образца в процессе деформирования при начальной температуре 800 °С и скорости деформации 5 сек<sup>-1</sup> (микролегированная сталь)

Влияние температуры на соотношение напряжения и деформации в процессе испытания также хорошо показано в работе [21]. В этой работе исследовалась высокотемпературная пластическая деформация титана ВТ-6 (Ti-6Al-4V) в диапазоне температур от 650°С до 955°С. Заготовки имели размеры 200 мм в длину и 150 мм в диаметре.

Ещё одним важным фактором, влияющим на результаты механических испытаний материалов, является трение. Коэффициент трения должен быть известен, когда реологические параметры определяются с помощью обратного анализа. Влияние трения в той или иной мере исследовалось во многих научных работах, посвящённых механическим

испытаниям. Некоторая оценка влияния трения также приведена в работе [20], несмотря на то, что специальных экспериментов по определению коэффициента трения в рамках этого исследования не проводилось.

Концепцию обратного анализа удобно применять для устранения влияния различных факторов, мешающих получению корректных данных и для получения зависимости напряжения от деформации, не чувствительной ни к этим факторам, ни к геометрии образца [22].

#### 4.2. Моделирование испытаний как этап обратного анализа.

Принципиальная схема используемого алгоритма обратного анализа представлена на Рис.2. ниже.

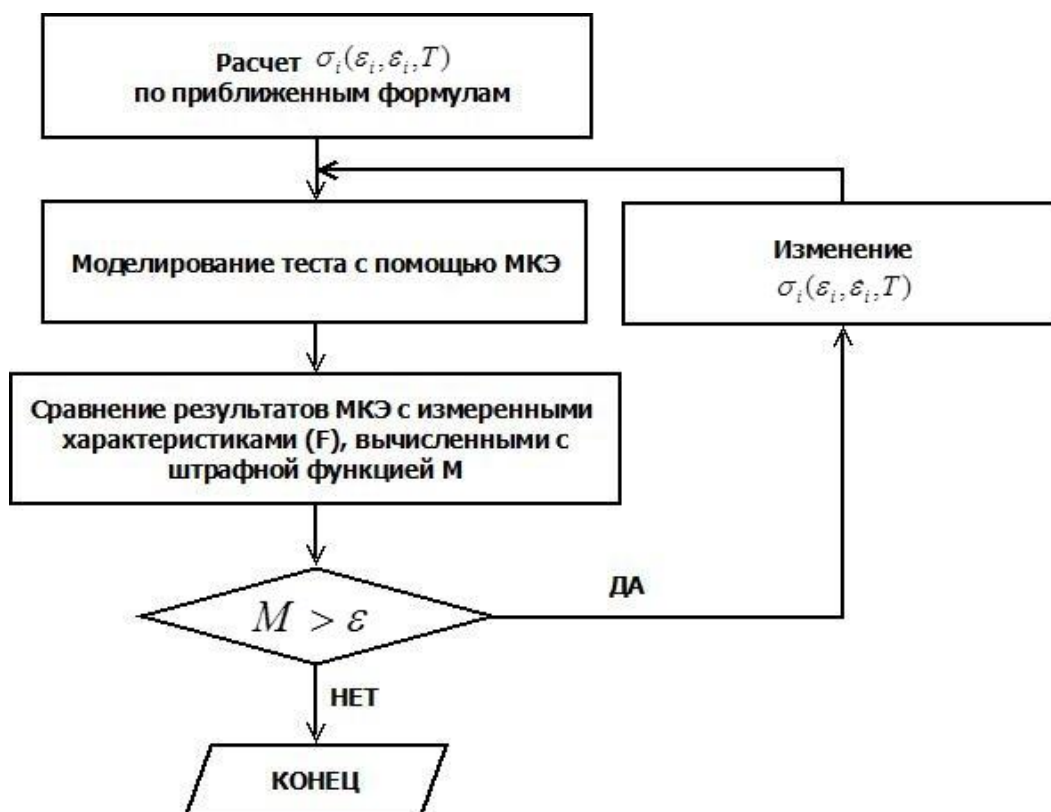


Рис.2. Принципиальная схема обратного анализа

## Глава 5. Моделирование испытаний на растяжение

### 5.1. Постановка задачи.

Как уже было показано выше, эксперименты на растяжение являются одними из основных методов тестирования материала при исследовании механических свойств сверхпластичных материалов, например, сплава титана ВТ-6 (Ti-Al6-V4), при высоких температурах. Этим экспериментам отводится значительное место во многих процессах промышленной горячей листовой штамповки, таких как горячее тиснение и обработка горячего металла давлением.

Именно поэтому для показа примера работы модулей программы была выбрана задача моделирования механического испытания по сложной программе нагружения для растяжения двумерного профиля винта заданной формы. Профиль предполагается осесимметричным, что позволяет нам моделировать только четверть чертежа. Размеры рабочей части таковы: длина – 4 мм, высота – 5 мм. Используемые граничные условия таковы: левый нижний угол заделан, на нижней и левой сторонах задано условие симметрии, а движение с заданной скоростью задаётся с помощью инструмента, который прикрепляется с правой стороны заготовки. Инструмент движется вверх. Для достижения эффекта сверхпластичности необходимо поддерживать постоянную скорость деформации ( $\dot{\epsilon}$ ). Это достигается заданием определённой скорости движения штампа.

Согласно формуле (19):  $\epsilon = \ln \frac{l}{l_0}$ , где  $l$  – текущая длина рабочей части,  $l_0$  – начальная длина рабочей части заготовки. Отсюда можно найти зависимость для скорости движения штампа:

$$\dot{\epsilon} = (\ln l - \ln l_0)' = \frac{1}{l} \cdot \frac{dl}{dt} \quad (20)$$

$$\frac{dl}{dt} = l \cdot \dot{\epsilon} \quad (21)$$

Для линейного изменения размеров заготовки необходимо линейно изменять скорость штампа. Необходимо создать такую траекторию движения

штампа, которая бы обеспечивала постоянную скорость деформации. Такой траектории соответствует отрезок с двумя точками, в которых соответствующие скорости линейнозависимы. Соответственно, чтобы смоделировать растяжение рабочей части детали в 3 раза надо поддерживать постоянную скорость деформации (например,  $0.001 \text{ сек}^{-1}$ ) и скорость штампа должна варьироваться от 0.005 до 0.015 мм\сек.

## *5.2. Необходимые этапы.*

Для решения поставленной задачи было необходимо создать и\или протестировать определённые части (модули) программы ЕММА. Хотя программа ЕММА и представляет собой САД\САЕ-систему лёгкого уровня (глава 1, пункт 1.2), но, тем не менее, она состоит из двух частей: Препроцессор (или Редактор) и Ядро (или Сервер). Соответственно, некоторые модули программы находятся как в Ядре, так и в Препроцессоре.

Основные этапы решения:

1) В Препроцессоре происходит выбор типа моделирования: 2D-задача, прокатка или 3D-задача.

2) Загрузка метамоделей (чертежа) заготовки (т.е. исследуемого объекта). В данный этап входит создание коллекции чертежей разнообразных форм и размеров.

3) Построение сетки конечных элементов. Здесь используется метод конечных элементов, основная идея которого состоит в том, что непрерывную область заменяют конечным числом её значений, определённых в узлах сетки. Для этого рассматриваемая область разбивается на некоторое число достаточно малых треугольных элементов, которые соединены в конечном числе узлов, расположенных на их границе.

4) Задание операции, которая определяет количество инструментов и траектории, по которым они будут следовать. Примечательно, что одной заготовке можно сопоставлять множество операций, результаты которых не будут пересекаться между собой.

5) Аналогично пункту 2 загружается чертёж инструмента, который будет взаимодействовать с заготовкой. Устанавливается точка привязки, которая указывает, как инструмент будет перемещаться в пространстве (в случае 2D задачи – на плоскости).

6) Для каждого инструмента задаётся своя траектория перемещения. Траектория задаётся опорными точками, в которых указываются линейная и угловая скорости инструмента. Опорные точки соединяются между собой либо отрезками, либо дугами (как части окружностей). Возможен пересмотр того, как инструмент будет перемещаться по траектории движения в реальном времени.

7) Этап сборки. Он представляет собой объединение результатов работы всех предыдущих этапов и создание единого файла-задания для дальнейшего расчёта в Ядре программы ЕММА. В любой момент можно отредактировать какой-либо предыдущий этап и заново создать файл-задание.

8) Расчёт файла-задания в Ядре. Сюда входит считывание файла-задания, анализ правильности данных, задание граничных условий, материалов, температур, расчёт параметров и графический вывод результатов расчётов.

9) Просмотр и анализ получившихся результатов в Постпроцессоре.

## Глава 6. Реализация этапов моделирования

Решение поставленной задачи проходило поэтапно, согласно плану, изложенному выше (глава 5, пункт 5.2). Этапы с первого по третий были частично реализованы до начала данной работы, поэтому эти модули лишь тестировались, и (если там находились ошибки) исправлялись.

### 6.1. Описание чертежей.

Очевидно, что никакие расчёты невозможны без наличия заготовок или их моделей. Поэтому первым этапом работы стало создание необходимого минимума двумерных чертежей. Для программы ЕММА ранее был разработан специальный загрузчик, который работает с meta-файлами. Данные файлы представляют собой обычный текстовый файл, в котором записывается следующая информация: параметры (скалярные величины), комментарии, точки (x,y), дуги (x,y,r), и контур. Например, файл `Rectangle_H04W09.meta`, который описывает чертёж прямоугольника шириной 4 мм и высотой 9 мм, выглядит следующим образом:

```
point p1 (0, 0);           /* координаты точки */
point p2 (0, 4);
point p3 (9, 4);
point p4 (9, 0);

    line l1 (p1, p2);      /* определение отрезков */
    line l2 (p2, p3);
    line l3 (p3, p4);
    line l4 (p4, p1);

contour c1 (l1, l2, l3, l4); /* определение контура */
```

Всего было создано около 30 файлов самых разнообразных размеров, для учёта большинства наиболее возможных взаимных расположений отрезков и дуг.

## 6.2. Загрузка чертежей.

Все двумерные чертежи описываются классом `C2DOutline`. При загрузке чертежей в программу используется модуль для предпросмотра. Он состоит из двух классов – класса диалога загрузки `CDlgParametricPreview` и класса окна предпросмотра `CGLModelPreview`. В классе окна предпросмотра использовался метод `C2DOutline::BoundingBox()`, который работал некорректно. Суть данного метода состоит в том, что он возвращает прямоугольник (класс `C2DRect`), который обрамляет вызвавший его двумерный элемент. Например, есть контур из отрезков, тогда вызвав данный метод у контура мы получим прямоугольник, который содержит в себе весь исходный контур. Метод `C2DOutline::BoundingBox()` сначала узнаёт количество кривых в чертеже. Если их нет – возвращается фиксированный прямоугольник со следующими координатами:  $((-50,35);(50,-35))$ . Если же кривые есть, то каждой из них вызывается соответствующий метод `BoundingBox()`. Как видно из изображения (Рис.3.) в предпросмотре неправильно вычислялись границы чертежа (за это отвечает обрамляющий прямоугольник) для класса `C2DCircleArc` (дуги), который является наследником класса `C2DOutline`.

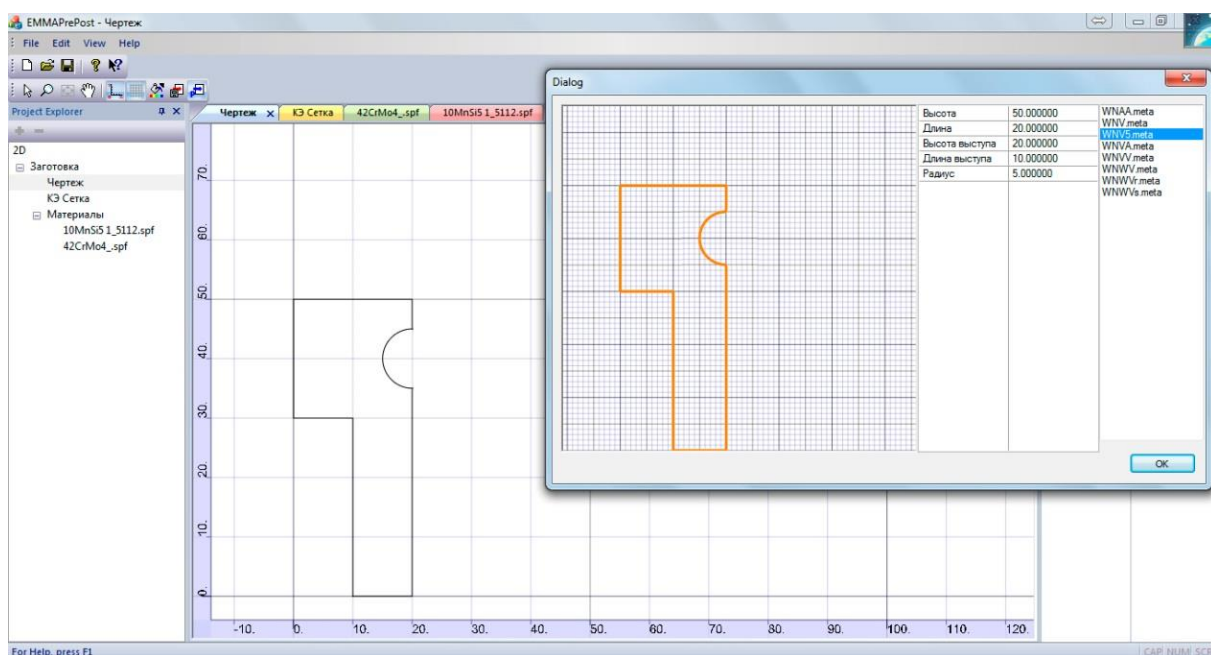


Рис.3. Модуль предпросмотра до исправления.

Работа состояла в исправлении метода `C2DCircleArc::GetBoundingBox()`, который был полностью переписан. На данный момент метод работает так:

Объявляются переменные класса `C2DPoint` (точка) для начальной, конечной точки и точки на середине дуги. Находятся начальная и конечная точка дуги. Далее на всей дуге определяются точки разбиения, в зависимости от длины дуги (одна восьмая окружности, четверть и половина окружности данного радиуса). Происходит по координатной проверке и формирование возвращаемого прямоугольника.

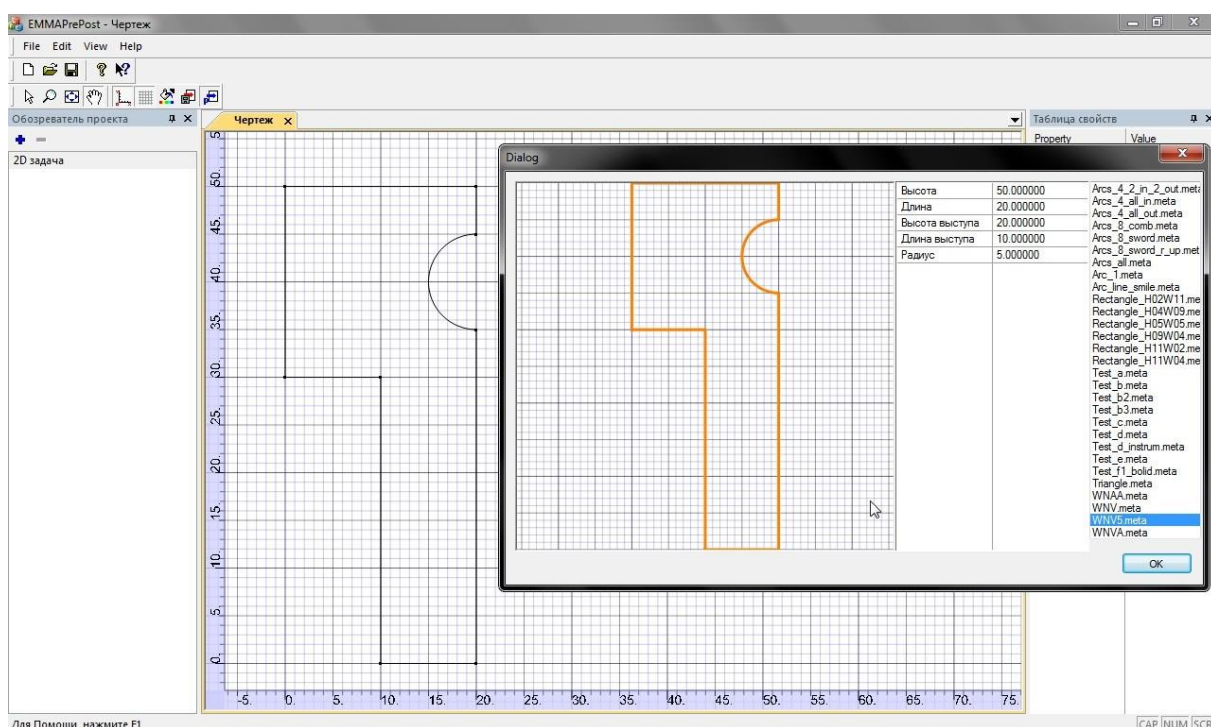


Рис.4. Модуль после исправления.

### 6.3. Редактирование чертежа.

Помимо существующих возможностей добавления точек, отрезков и дуг в чертёж с нуля был создан такой инструмент редактирования чертежа, как построение сопряжения (для двумерного случая) [23]. Метод `AddFacet` получает в качестве параметров указатель на точку (класс `C2DPoint`) между двумя кривыми `C2DPoint *pPoint`, параметр типа `bool set` (который отвечает за тип построения: вспомогательное – подсказка или окончательное



изменение чертежа) и радиус скругления `double rad`. Результатом работы является построение сопряжения (в форме дуги, класса `C2DCircleArc`) между этими кривыми.

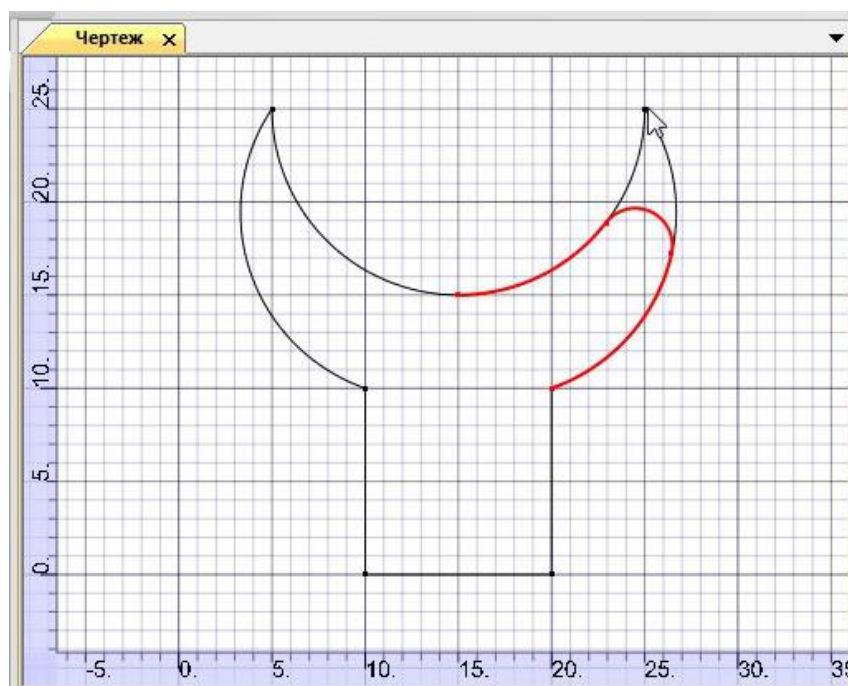


Рис.5. Пример работы модуля создания сопряжения.

Визуальная подсказка для оценки будущего скругления.

Несмотря на то, что в ЕММА кривых всего два типа (отрезки и дуги), задача осложнялась их комбинациями и взаимным расположением [24]. При создании данного модуля требовалось рассмотреть три случая расположения угловой вершины:

1) Угол образован двумя отрезками. Требовалось определить нужную полуплоскость, т.е. ту, где угол от  $0^\circ$  до  $180^\circ$ .

2) Угол образован отрезком и дугой. В зависимости от вида дуги (4 вида) определялось расположение центра сопряжения.

3) Угол образован двумя дугами. Центр скругления определяется исходя из вида дуг, и зависит от их взаимного расположения.

Построение сопряжения в выбранном узле может быть невозможно в следующих случаях:

1) В одной точке сходятся больше или меньше двух кривых. Такие ситуации возможны, если задание геометрии ещё не завершено и контур разомкнут или если объект состоит из нескольких подобластей и это приводит к ветвлению линий в некоторых узлах.

2) Касательные кривых в точке сопряжения равны. Например, когда отрезок продолжается дугой. В таком случае построение сопряжения не имеет смысла.

3) Заданный радиус сопряжения больше геометрически возможного. Геометрические ограничения на радиус сопряжения обусловлены типом и размерами сопрягаемых кривых.

#### *6.4. Сетка конечных элементов.*

Модуль построения сетки конечных элементов был уже написан и работа в данной части программы заключалась в устранении следующих неточностей: неравномерность заполнения области чертежа треугольными элементами и отсутствие возможности сгущения сетки в выбранной области. Исправлена передача параметра длин рёбер элементов и экспериментально создано сгущение. КЭ сетка описывается классом `CMesh` и создаётся методом `BOOL CMesh::GenerateMesh()`, который получает следующие параметры: `UINT MeshType` - тип сетки, `double dRibLen` - длина ребра сетки, `double Ang` - угол конуса сгущения и `C2DOutline* Outline` – указатель на чертёж, для которого строится КЭ сетка.

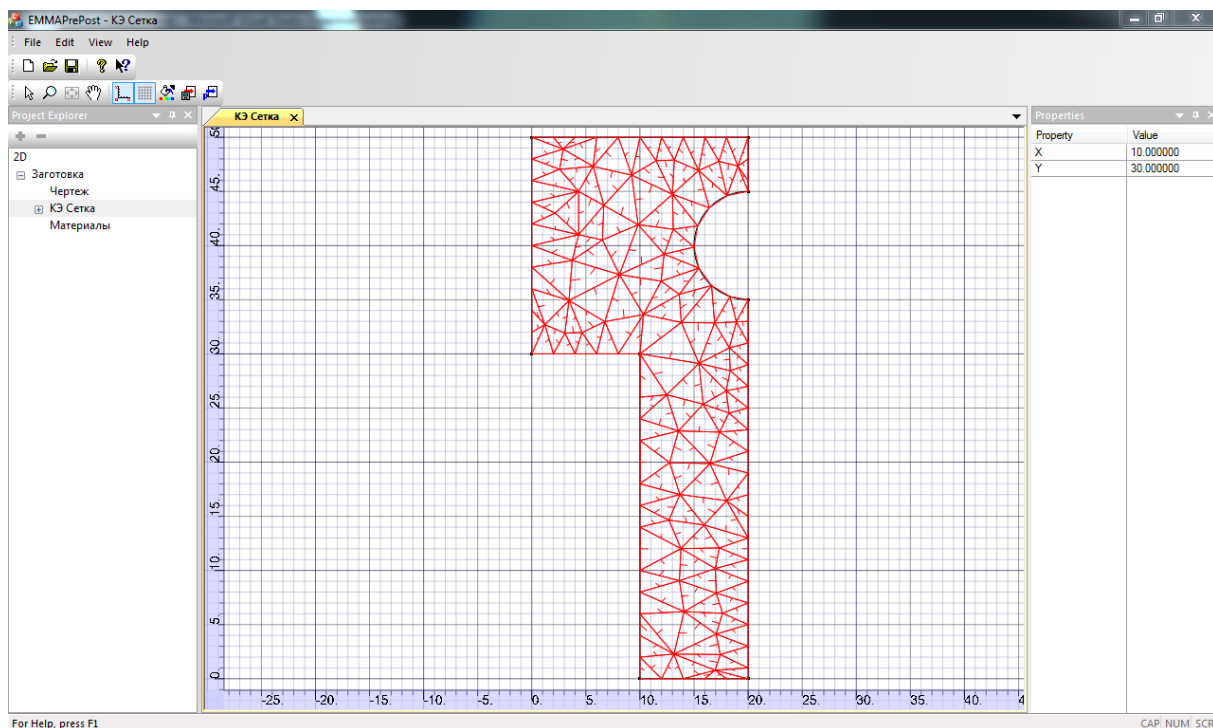


Рис.6. Построение сетки до настоящего момента.

Очевидна проблема при такой реализации построения: неоднородные элементы (треугольники). Как известно из МКЭ, треугольные элементы должны быть приближены по параметрам к равносторонним треугольникам. Были исправлены следующие методы класса CRibLine, которые отвечают за фронты построения элементов: `BOOL CRibLine::AddRib` – добавление «ленты» конечных элементов, `BOOL CRibLine::IfTooClose` – отвечает за близость узлов друг относительно друга в одном элементе, `void CRibLine::IfCross` - проверяет пересечения с фронтом построения. При отрисовке сетки граничные узлы КЭ сетки теперь увеличены в несколько раз (смотри Рис.7).

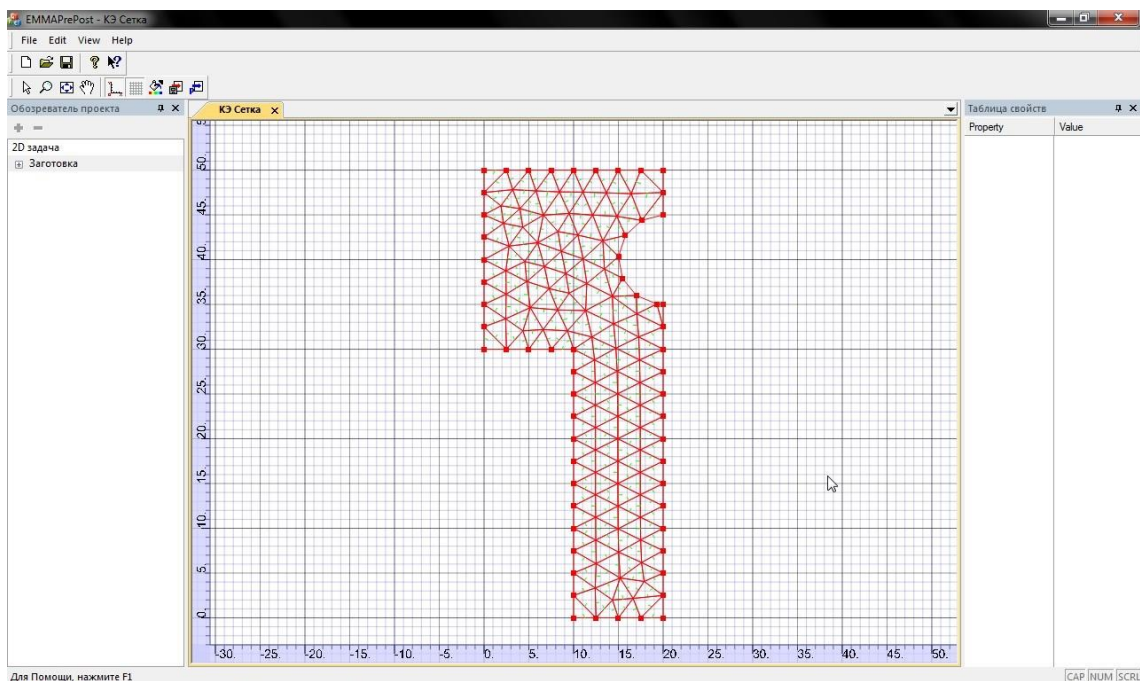


Рис.7. Построение сетки после исправления недостатков.

Для реализации сгущения КЭ сетки была написан метод `double CMesh::GetRibLen(const Math::C2DPoint &point)`, который возвращает желаемую длину ребра элемента в окрестности данной точки. Также в данном методе описаны условия, которые позволяют уменьшать длину ребра для определённой области (не зависимо от точки). Пример работы данного метода представлены на Рис.8:

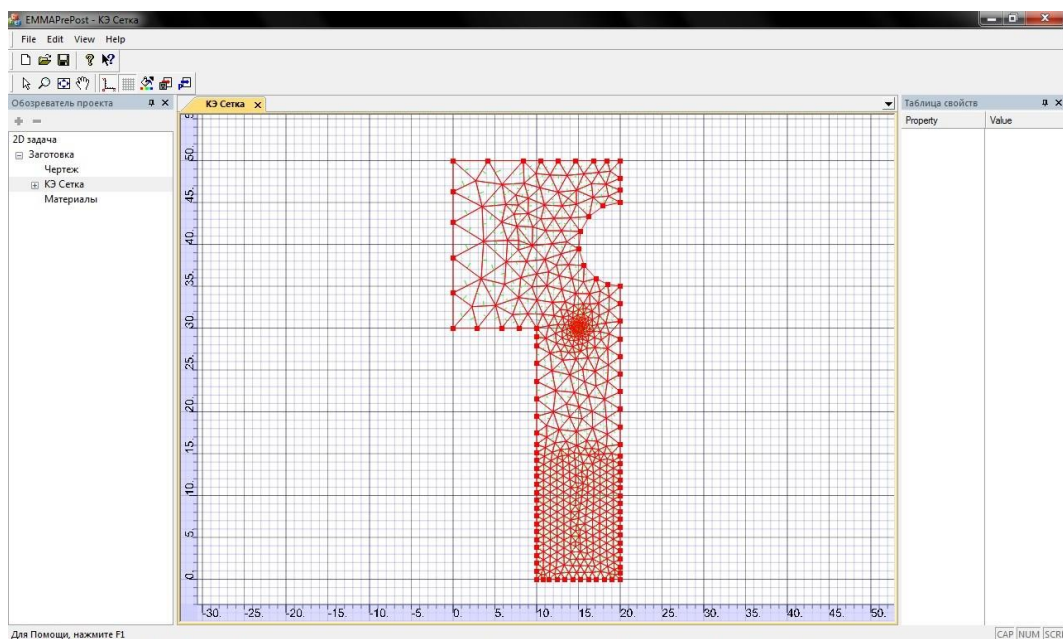


Рис.8. Реализация сгущения КЭ сетки (точка и область).

### 6.5. Операции.

Модуль операций является разделом, ответственной за предоставление таких возможностей программы ЕММА, как создание инструментов, задание траектории их движения, сборки всех элементов в единый файл для расчётов и вывод результатов расчётов. У одной задачи (их три вида: 2D задача, прокатка, 3D задача) может быть несколько операций с различными инструментами, траекториями и результатами. Основной трудностью при разработке данного раздела стало создание инструментов и возможности переключения между ними. Операции описываются классом `class CGen2Operation`, который является наследником главного класса документов `CEMMADoc`. При инициализации, создаются три вышеперечисленные операции: `C2DTool *pTool = new C2DTool;` – инструмент, `C2DBuilder *pBuilder = new C2DBuilder;` – сборка задания, `C2DResults *pResults = new C2DResults;` – результаты вычислений.

В классе `CGen2Operation` содержится переменная `int m_nInstruments`, которая отвечает за идентификационный номер (счётчик) созданных инструментов. Следующие методы созданы для работы с инструментами: `int GetToolNum()` – возвращает кол-во Инструментов в Операции, и `C2DTool* GetTool(int i)` возвращает указатель на Инструмент по его номеру.

### 6.6. Инструмент.

Класс инструментов создан для того, чтобы имитировать работу реальных инструментов, таких как пресс, зажим, траверса и т.д., которые используются в процессах ОМД. Для 2D задачи инструменты так же, как и заготовки, представлены двумерными чертежами, но с одним отличием – наличием точки привязки, которая задаёт положение инструмента при перемещении по траектории. Класс инструментов - `C2DTool` содержит в себе переменную `IO::C2DPoint m_StickPoint;` - точку прилипания траектории и следующие методы:

- `void ChangeNodes(Math::C2DPoint *new_point)` – отвечает за перемещение чертежа инструмента по траектории;
- `C2DTrajectory* GetTrajectory()` – возвращает ссылку на траекторию для данного инструмента;
- `bool Copy(C2DTool *tool)` – копирует инструмент;
- `void AddStickPoint(Math::C2DPoint ppoint)` – добавление точки привязки.

Точка привязки определяется двумя способами: кликом мыши на рабочей области инструмента и заданием координат вручную. Для второго способа создаётся дополнительная панель свойств (справа) с координатами X,Y и параметром IsInside (метод `C2DOutline::IsInside(const Math::C2DPoint& p)`), который показывает, находится ли точка внутри инструмента (значение 1) или нет (значение 0). Для работы панели этого используются следующие методы:

- `void FillPropList(CMFCPropertyGridCtrl *pGrid);` - заполнение параметров панели с координатами точки привязки.
- `void UpdateProp(double *pEval, DWORD *pId);` - обновление параметров панели.

При перемещении чертежа инструмента по траектории (пункт 6.6. данной главы), он соприкасается с чертежом заготовки изделия. При этом некоторые граничные узлы КЭ сетки заготовки попадают в область чертежа инструмента. В этом случае узлы изменяют свои граничные условия в зависимости от скорости инструмента.

Пример Инструмента представлен на Рис.9:

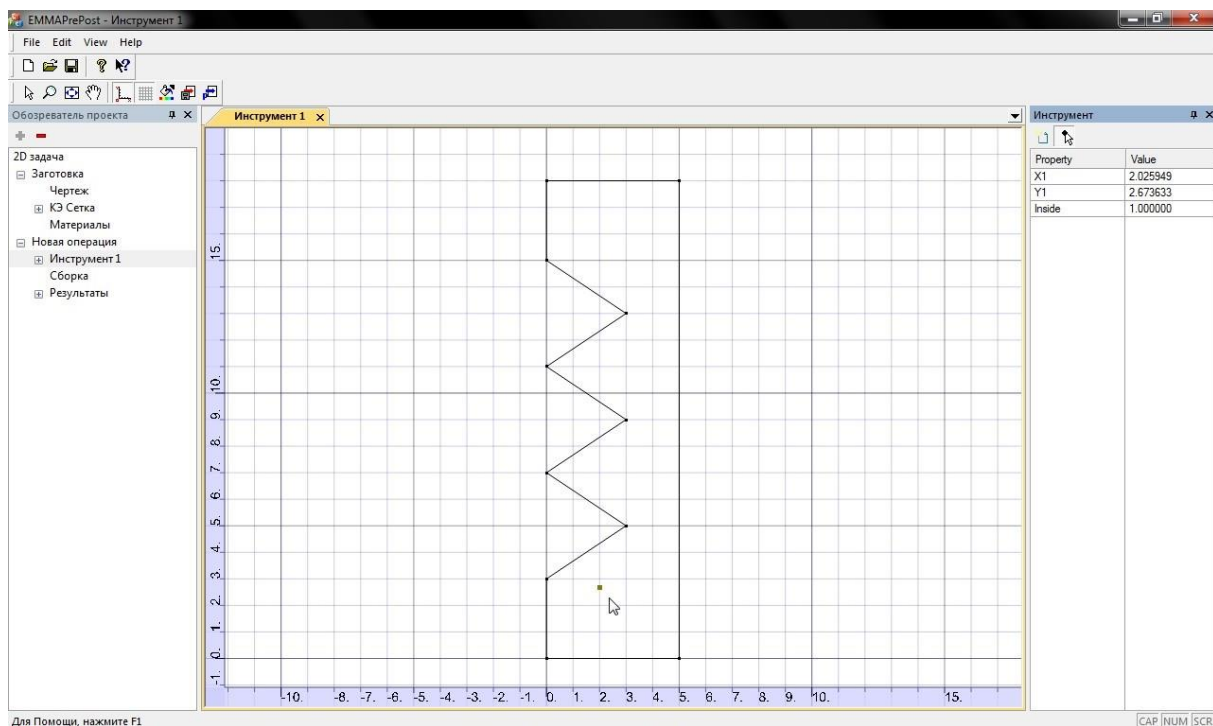


Рис.9. Пример модуля инструмента (заготовка-зажим).

### 6.7. Траектория.

Траектория описывается классом `C2DTrajectory` (наследник классов `CEMMADoc` и `I2DSketch`) и представляет собой двумерный чертёж (на данный момент не замкнутый), который состоит из узлов (точек) и отрезков или дуг. В узлах задаются скорости (линейная и угловая) для перемещения инструмента. Инструмент «едет» по траектории с учётом точки привязки. Для удобства возможна анимация данного процесса в реальном времени. В данном классе были созданы следующие методы:

- При редактировании траектории должны корректно сохранять значения координат. За это отвечают методы `void FillPropList(CMFCPropertyGridCtrl *pGrid)` (заполнение) и `void UpdateProp(double *pEval, DWORD *pId)` (правка);
- При проигрывании анимации в режиме реального времени используется метод `void C2DTrajectory::DrawTool()`, который отвечает за прорисовку инструмента относительно траектории. Данный метод вызывает у инструмента уже описанный ранее метод

ChangeNodes(&posit->m\_pos), который меняет его координаты. Во время анимации существует возможность поставить паузу. После повторного нажатия, инструмент продолжает «ехать» по траектории с предыдущей позиции.

Были созданы следующие методы для работы модуля Траекторий:

- CIO2DMotion\* C2DTrajectory::GetMotion() - доступ к полученной траектории для внешних классов
- void C2DTrajectory::InitialClearView() – полная очистка рабочей области.
- void C2DTrajectory::InitialUpdateView() – масштабирование рабочей области.

Так же были исправлены ошибки при создании элементов траектории. Например создана проверка на наличие начальной точки на чертеже при задании геометрии траектории. За это ответственны методы void I2DSketch::AddNode(Math::C2DPoint \*ppoint) – для создания узла, void I2DSketch::AddCurve(Math::C2DPoint \*ppoint) – для отрезка, void I2DSketch::AddCircleArc(Math::C2DPoint \*ppoint) – для дуги).

Примером работы данного модуля служит Рис.10. на котором показано перемещение инструмента-зажима по простейшей траектории.





Рис.10. Перемещения инструмента в реальном времени. Справа показаны инструменты для создания траектории.

### 6.8. Сборка.

Процесс сборки заготовки, КЭ сетки, инструментов и траекторий реализован в классе C2DBuilder (наследник класса документа CEMMADoc).

Состав класса:

`void DrawMesh(CGen2DDoc *mesh)` – отрисовка КЭ сетки

`void DrawTools(CGen2Operation *operation)` – отрисовка инструментов

`void DrawTrajectories(CGen2Operation *operation)` - отрисовка траекторий с инструментами

`bool Build()` - сборка всего проекта для расчёта в ядре.

Самый главный метод – `Build()`, так как именно в нём происходит формирование файла-задания (task-file) для расчёта на серверной части (ядре) программы EMMA.

В методе `Build()` происходят следующие процессы: получают указатели на КЭ сетку, которая заносится сначала в «оболочку» `C2DPlaneFEM* p2DFem = new C2DPlaneFEM`, которая уже добавляется в task-file. После этого в цикле перебираются все инструменты с траекториями. Они заносятся сначала в «оболочку» `C2DRigid* p2DRigid =`

new C2DRigid, которая тоже заносится в файл-задание. После этого файл именуется, сохраняется и закрывается.

bool m\_IsBuild – переменная, которая служит для первоначальной сборки.

Сборку можно произвести в любой момент, достаточно кликнуть на иконке сохранения. При этом будет вызван метод void C2DBuilderPane::OnSave(), который вызовет сам метод Build().

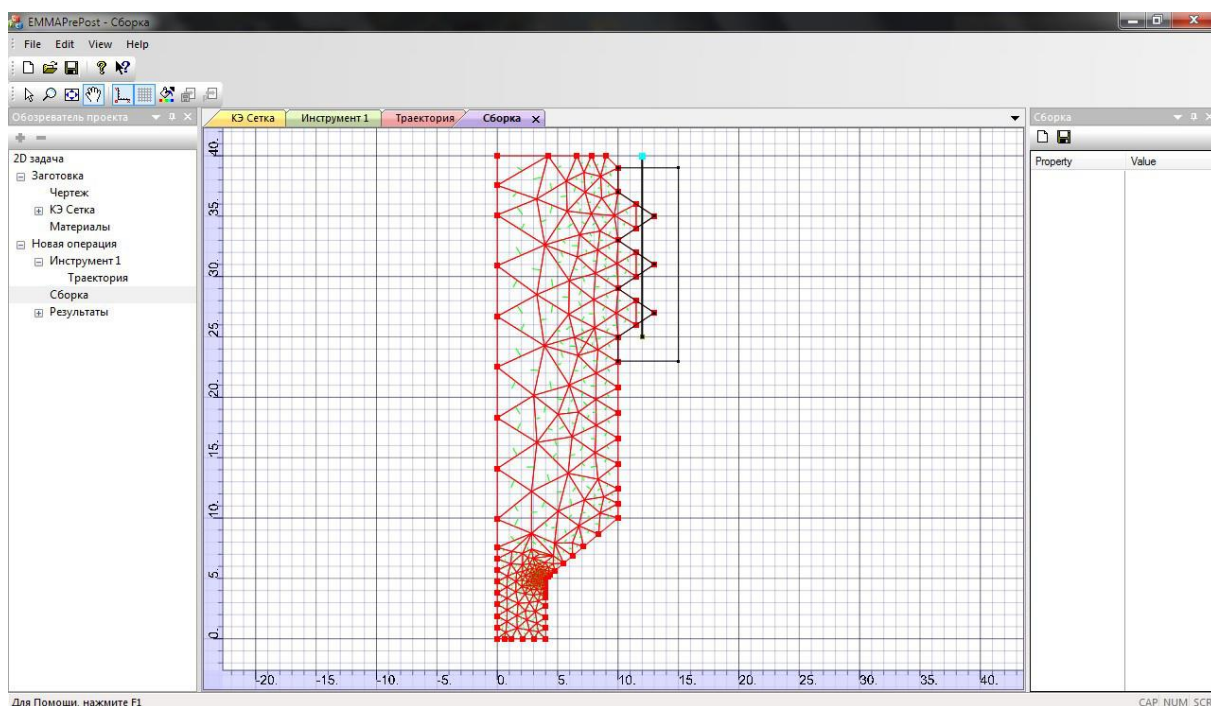


Рис.11. Пример работы модуля Сборки.

Для данной заготовки вносились следующие граничные условия: заделка (прилипание) ( $Q_x = V_x = 0, Q_y = V_y = 0$ ) в левой нижней точке ( $x = 0, y = 0$ ), симметрия слева ( $x = 0$ ) и внизу ( $y = 0$ ), заделка в области соприкосновения с инструментом, остальные узлы – свободные. Скорости брались из скоростей узлов траектории, которая согласно пункту 5.1. и формуле (19) представляет отрезок прямой. Материал – ВТ-6 (титановый деформируемый сплав).

## 6.9. Ядро.

Основной расчёт всех характеристик (напряжения, деформация, давление и т.д.) происходит в ядре программы ЕММА. После загрузки файла-задания запускается менеджер заданий (класс `ITask`), который даёт команду на вычисление методом `void ITask::RunCalc()`, который итерационно (в зависимости от начального и конечного времени) решает поставленную задачу. Каждая итерация записывается в соответствующий файл туда же, где хранится файл-задание. На любом шаге для всех объектов из задания сначала попарно выполняется метод `Preparations()`, который «подготавливает» объекты. Данный метод определяет граничные узлы КЭ сетки, которые получают условие прилипания к инструменту. Далее выполняются методы `Calc(dt)` и `Move(dt)`, которые делают необходимые вычисления и смещают объекты соответственно. Все вычисления происходят с объектом-сеткой (класс `C2DPlaneFEM`). В данном классе инициализируются граничные условия для оставшихся узлов, подключается материал заготовки, указывается температура. Вычисления происходят с помощью следующих методов: `InitStep()` – начальные определения, `CalcAvgDef(dt)` – расчёт средних деформаций для элементов, `MakeSmooth()` – сглаживание, `CalcFEM(dt)` – формирование матрицы жёсткости и её решение.

Для хранения физических величин для узлов и элементов сетки используется перечисление `enum eFields`, которое содержит следующие важные параметры и коэффициенты: координаты центра элементов (`cm_x`, `cm_y`), площади элементов, их деформации, скорости деформаций, напряжения, средние деформации (`avg_d`), модуль Юнга и прочие параметры.

Так как ядро является расчётной частью, то интерфейса у неё нет. Для контролирования расчётов были созданы методы для ведения логов (текстовых файлов с информацией) почти всех объектов:

- `void C2DPlaneFEM::WriteBCSToLog()` – записывает информацию о ГУ.
- `void CSLAE::WriteToLog()` – записывает информацию о матрице линейных уравнений.

- `void CMesh::WriteToLog() const` – информация о КЭ сетке в препроцессоре.
- `void C2DMesh3::WriteToLog() const` – информация о сетке в ядре (узлы и элементы).
- `void C2DOutline::WriteToLog()` – информация о чертеже.
- `void C2DPlaneFEM::WriteEFieldsToLog()` – информация о всех полях в элементах.
- `void WriteToLog(bool val)` – для ленточной матрицы (шаблон в `BandMatrix`), `val = true` - выводить значение ячейки, `val = false` - выводить \*, если не 0, иначе – 0.
- `void WriteBitFuncsToLog()` – отладка битовых функций.

#### 6.10. Результаты.

Результаты вычислений на данный момент представляются в двух видах: в графическом виде (изменение КЭ сетки) и текстовом (лог-файлы).

Графический вид показывает КЭ сетку, градиент одной из указанных физических величин (площадь, напряжения, деформации, скорости деформаций и т.д.) для всех элементов и инструмент. Названия файлов показывают итерацию и текущее время расчёта.

Ниже представлены изображения расчётов для исходной четверти детали (тест на растяжение). Общее время процесса растяжения – 800 секунд. Цветом показывается интенсивность деформации в каждом элементе в процентном соотношении (зависит от текущего минимального и максимального значения интенсивности):

Белый и Синий: от 0 до 25%

Зелёный: от 25% до 50%

Оранжевый: от 50% до 75%

Красный: от 75% до 100%

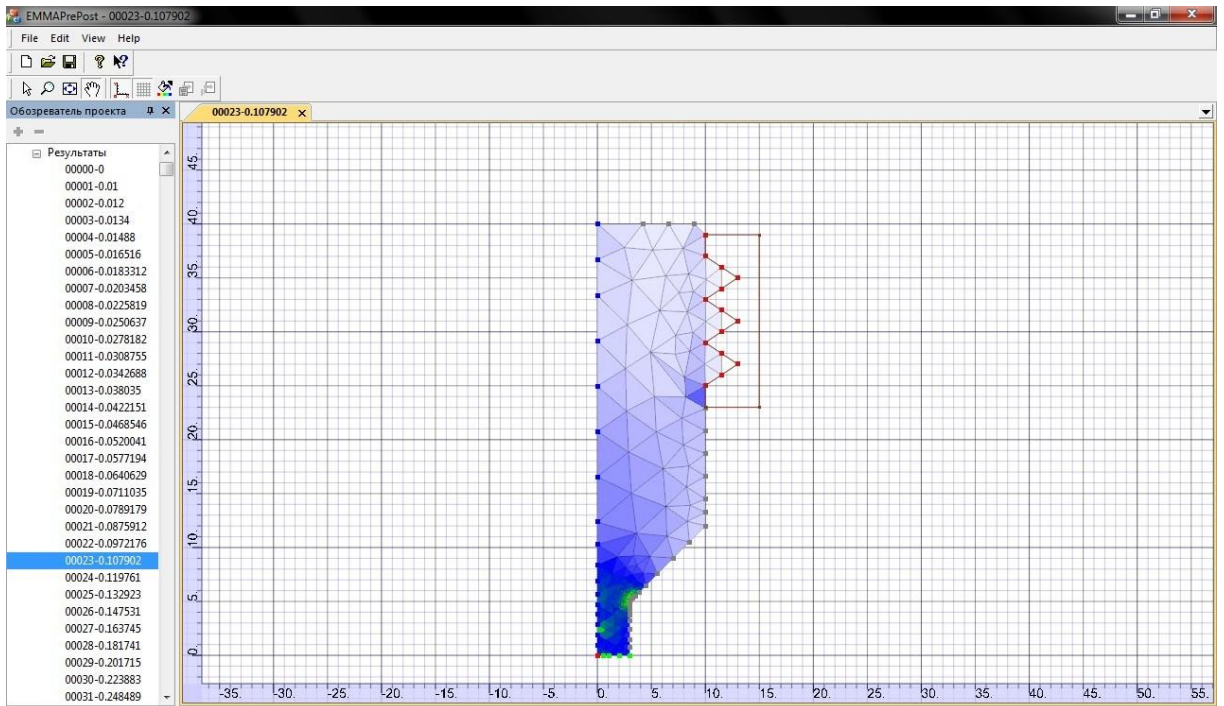


Рис.12. Начало вытягивания заготовки (время испытания – 0.1 сек.)

Начиная с 30-й секунды в рабочей части заготовки образуется утонение. На 100-й секунде оно уже хорошо различимо для глаз (смотри Рис.13.).

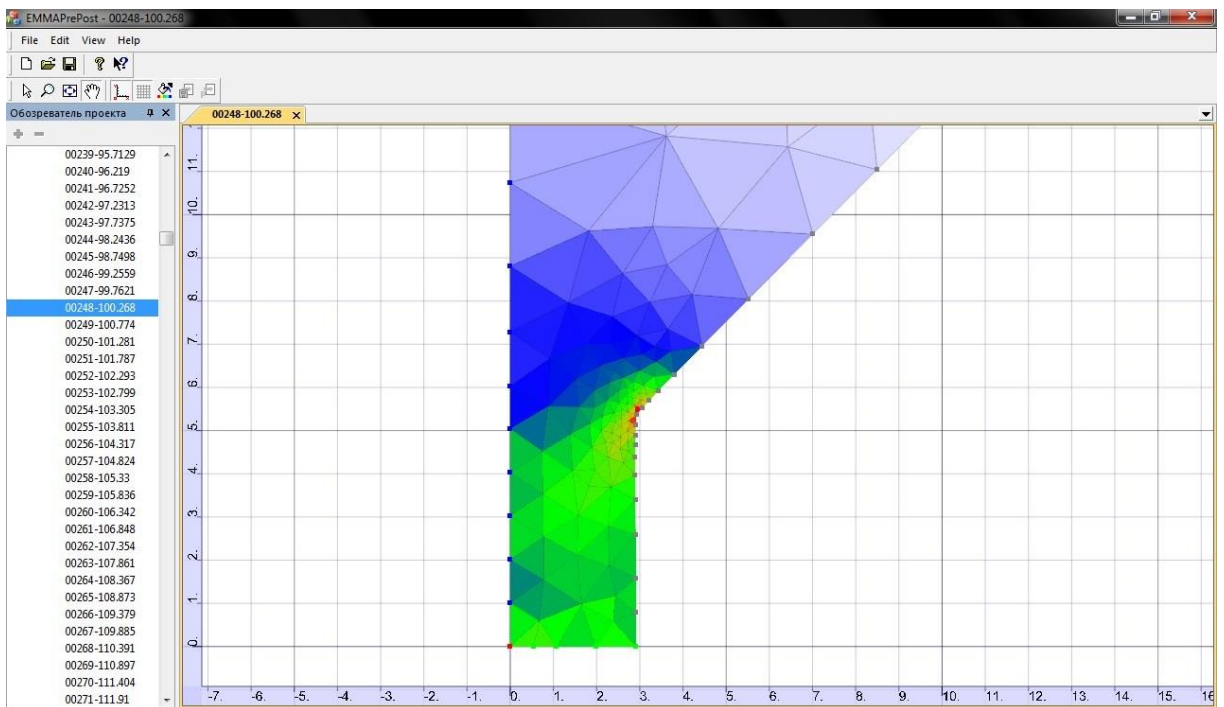


Рис.13. Рабочая часть заготовки (время испытания – 100 сек.)

Максимум интенсивности деформации сосредоточен в рабочей части.

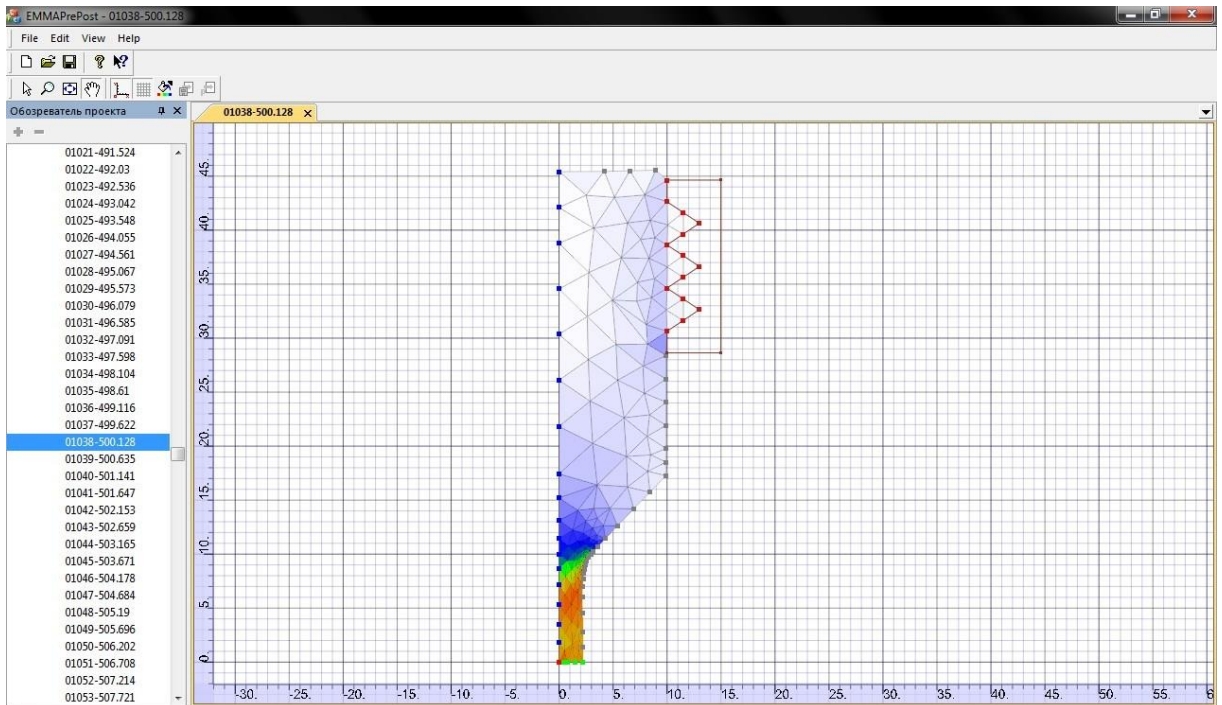


Рис.14. Растяжение рабочей части в 2 раза (время – 500 сек.)

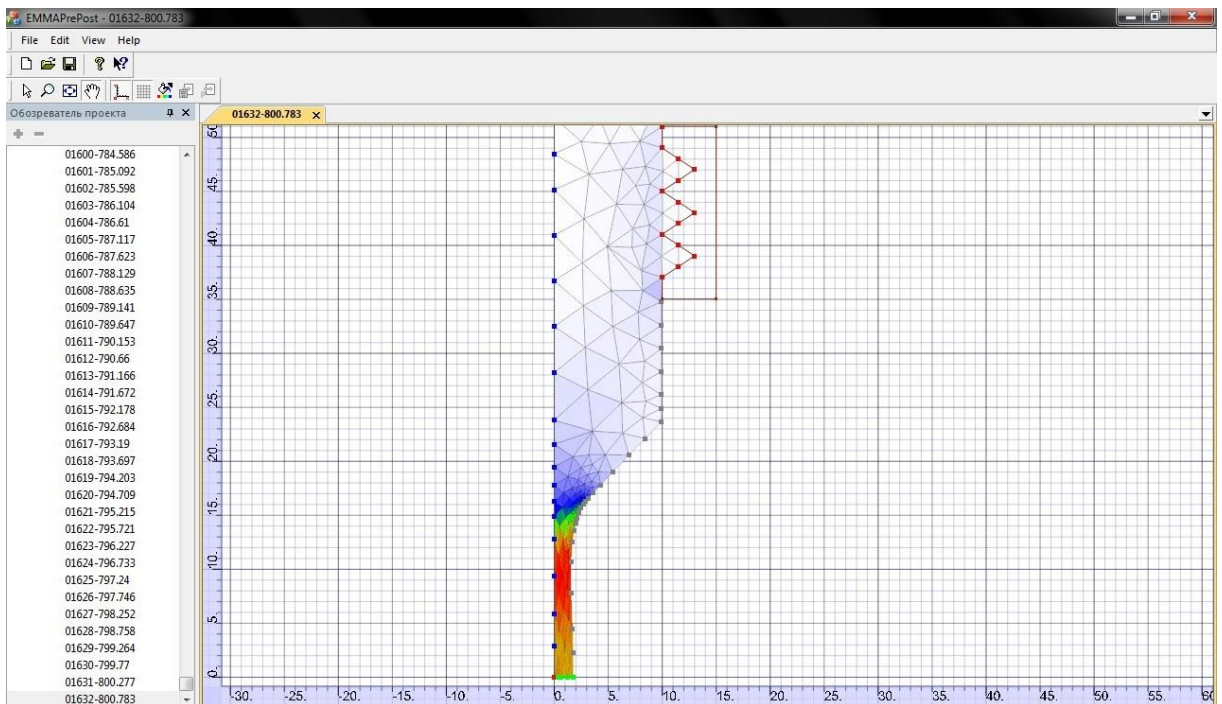


Рис.15. Растяжение рабочей части в 3 раза (время – 800 сек.)

В результате данного моделирования рабочая часть удлинилась в 3 раза с 5 мм до 15 мм. Как и ожидалось, в процессе растяжения в узкой части возникает своеобразная «шейка». Из изображений (Рис.12. – Рис.15.) видно,

что интенсивность скорости деформации в объёме образца распределена неравномерно. В текстовых лог-файлах были получены физические значения, которые в будущем подвергнутся анализу и сопоставлению с данными из реальных опытов. После сопоставления последует необходимый итерационный процесс (по алгоритму обратного анализа) для уточнения параметров, корректировки модели и нахождению возможных ошибок. Это повысит точность результатов таких испытаний в дальнейшем.

## Заключение

В работе проведён обзор возможностей математического моделирования при проектировании технологических процессов обработки металлов давлением. Математические модели позволяют на этапе проектирования технологического процесса учесть характеристики обрабатываемого материала для достижения наилучших условий его формоизменения, что играет особую роль при производстве изделий из материалов с высокой скоростной чувствительностью.

В рамках данной работы созданы элементы автоматизированной системы, позволяющей производить математическое моделирование процессов ОМД с помощью МКЭ. Разработаны модули автоматизации по подготовке данных к расчёту и расчётные модули для решения задач формоизменения обладающих осевой симметрией.

С помощью разработанного программного обеспечения было произведено моделирование процесса растяжения осесимметричного стержня по сложной программе нагружения. Скорость траверсы регулировалась в модели автоматически для поддержания постоянной скорости деформации рабочей части образца.

Результаты моделирования показали, что при реализации подобных экспериментов интенсивность скорости деформации в объёме образца распределена неравномерно. Разработанное программное обеспечение будет использовано для изучения характера неравномерности и оценки влияния на него геометрических характеристик образца в процессе его растяжения, что позволит повысить адекватность интерпретации результатов таких испытаний в дальнейшем.

Дальнейшая работа по данному направлению состоит в создании удобного пользовательского интерфейса программы, обработчика возможных ошибок и оптимизация исходного кода программы.



## Список используемой литературы

- 1) Aksenov, S. A., Inverse analysis of a plane strain compression test results for the purpose of material mechanical and microstructural properties study / S. A. Aksenov, E. N. Chumachenko, J. Kliber, R. Fabik // HUTNIK.- №8.- 2009.- С. 555-557. (ISSN 1239-3534)
- 2) Kliber, J., Numerical study of deformation characteristics in PSCT volume certified following microstructure / J. Kliber, S. A. Aksenov, R. Fabik, // Metallurgy.- volume 48 (4).- 2009.- С. 257-262. (ISSN 0543-5846).
- 3) Kliber, J., Simulation of forming processes by plastometric tests / J. Kliber // VŠB-TUO Metallurgical series.- Ostrava.- 1997.- PP. 1-58.
- 4) Lacey, A. J. Measuring flow stress in hot plane strain compression tests / A. J. Lacey, M. S. Loveday, G. J. Mahon, B. Roebuck, C. M. Sellars, M. R. van der Widen // Measurement Good Practice Guide.- No 27.- 2002, 85 p.
- 5) Kowalski, B. Identification of rheological parameters on the basis of plane strain compression test on specimens of various initial dimensions / B. Kowalski, C. M. Sellars, M. Pietrzyk // Computational Materials Science.- 35.- 2006.- PP. 92-97.
- 6) Szeliga, D. Inverse analysis for identification of rheological and friction models in metal forming / D. Szeliga, E. Gawad, M. Pietrzyk // Computer methods in applied mechanics and engineering.- 195.- 2006.- PP. 6778-6798.
- 7) Kowalski, B. Influence of strain and strain rate inhomogeneity on constitutive equations determined from plane strain compression tests / B. Kowalski, W. Wajda, M. Pietrzyk, C. M. Sellars // Proc. 4th ESAFORM Conf. on Materials Forming. A. M. Habraken (Ed.).- University of Liege.- 2001.- PP. 561-564.
- 8) Szeliga, D. Identification of rheological parameters on the basis of various types of plasometric tests / D. Szeliga, P. Matuszyk, R. Kuziak, M.

Pietrzyk // Journal of Materials Processing Technology.- 125-126.- 2002.- PP. 150-154.

9) Aksenov S.A., Chumachenko E.N., Logashina I.V., Experimental investigation of Ti-Al-V alloy superplastic behavior, Proceedings of 21st International Conference on Metallurgy and Materials METAL-2012, Brno, Czech Republic, Issued by TANGER ltd., 2012, Ostrava, p. 78+CD.

10) Aksenov S.A., Chumachenko E.N., Logashina I.V., Investigation of mechanical properties of titanium alloy in order to assess the possibility of its superplastic forming, XIII International scientific conference "New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering", a collective monograph edited by Henryk Dyja and Anna Kowalek, Series: Monographs No 24, Czestochowa 2012, p. 281-285.

11) Гун Г.Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением – М.: Metallurgiya, 1983. – 352 с.

12) Tang S.C. Computer modeling in sheet metal forming / S.C. Tang, McCune R.C. // J. Metals. – 1985. – V.37. – №10.

13) Чумаченко Е.Н. Математическое моделирование пластического формоизменения материалов при обработке металлов давлением / Е.Н. Чумаченко. – М.: МГИЭМ, 1998. – 157 с.

14) Новиков И.И., Портной В. К. Сверхпластичность сплавов с ультрамелким зерном. М.: Metallurgiya, 1981. – 168 с.

15) Смирнов О.М. Обработка металлов давлением в состоянии сверхпластичности. М.: Машиностроение, 1979. – 184 с.

16) Smirnov O. M. Superplasticity of Metals: Phenomenology Based on Rheological Properties and Structural Dynamics. Materials Science Forum, 1997, V.243 – 245.

17) Hart E.W. Theory of tensile test // Acta metallurgica, 15. 1967.

- 18) Szeliga D., Gawad E., Pietrzyk M. Inverse analysis for identification of rheological and friction models in metal forming // Computer methods in applied mechanics and engineering. 2006. 195. P. 6778-6798.
- 19) Pietrzyk M., Kuziak R., Loveday M., Roebuck B. Effect of Preheating and Testing Method on the Flow Stress of Steels. // Advanced Technology of Plasticity, Proc. 8th ICTP, Verona, 2005. CD ROM.
- 20) Аксёнов С.А. Автоматизированная система проектирования и анализа технологических процессов прокатки в калибрах // диссертация к.т.н. Москва, 2010. – 113 с.
- 21) G.A. Sargent, A.P. Zane, P.N. Fagin, A.K. Ghosh, and S.L. Semiatin Low-Temperature Coarsening and Plastic Flow Behavior of an Alpha/Beta Titanium Billet Material with an Ultrafine Microstructure, The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International —VOLUME 39A, DECEMBER 2008
- 22) Чумаченко Е.Н., Аксёнов С.А., Борхсениус С.С. Интерпретация результатов пластометрических тестов на базе обратного анализа // Тезисы докладов XX Международной конференции-школы-семинара «Новые информационные технологии» М.: МИЭМ, 2012, С. 139-140
- 23) Пузино Ю.А., Аксёнов С.А., «Автоматизация построения элементов геометрических моделей», Тезисы Научно-Технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ НИУ ВШЭ, февраль 2013 г, Москва, МИЭМ НИУ ВШЭ, стр. 127-128.
- 24) Пузино Ю.А., Аксёнов С.А. «Методы создания дуговой фаски при моделировании твердотельных деталей», Труды XIII Всероссийской научно-технической конференции и школы молодых учёных, аспирантов и студентов АКТ-2012, г. Воронеж, ООО Фирма «Элист»; 2012, стр. 66-72.
- 25) Xiaomei Li, Steven Soo Numerical Simulation and Superplastic Forming of Ti-6Al-4V Alloy for a Dental Prosthesis, Journal of Materials Engineering and Performance, Volume 20(3) April 2011 —341 p.
- 26) Fuh-Kuo Chen, Kuan-Hua Chiu Stamping formability of pure titanium sheets. Journal of Materials Processing Technology, 170 (2005) 181–186.

27) V. Sinha, R. Srinivasan, S. Tamirisakandala, D.B. Miracle Superplastic behavior of Ti-6Al-4V-0.1B alloy Materials Science and Engineering A 539 (2012) 7-12.

28) S.P. Keeler, W.A. Backofen, Plastic instability and fracture in sheets stretched over rigid punches, Trans. Am. Soc. Met. 56 (1963) 25-48.

## Приложение