

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

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

В.П. АЛЕКСЕЕВ, А.И. ХАЙМОВИЧ

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА  
РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКЕ В СРЕДЕ  
DEFORM**

САМАРА 2015

УДК СГАУ: 621.45.0.002.2 (075.8)  
ББК СГАУ: 39.55

Рецензенты:

**Алексеев В.П., Хаймович А.И.**

**Имитационное моделирование процесса разрушения при лезвийной обработке в среде DEFORM / А.И.Хаймович, В.П.Алексеев. Методические указания /Самарский гос. аэрокосм, ун-т., кафедра технологий производства двигателей.**

Целью данной лабораторной работы является получение определенного объема знаний по исследованию явления разрушения материала при стружкообразовании с использованием имитационного моделирования фрезерования в ПО DEFORM 2D/3D. Изучение интерфейса программного обеспечения DEFORM, изучение критериев разрушения, представленных в ПО DEFORM. В ходе занятий студенты осваивают методику моделирования процесса резания в ПО DEFORM с учетом заданных критериев разрушения. Подтверждают адекватность разработанной модели по параметрам усилия резания. Производят уточнение угла условной плоскости сдвига для дальнейшего расчет в ПО DEFORM 3D. Разрабатывают имитационную модель процесса резания с заданным критерием разрушения в ПО DEFORM 3D. Подтверждают адекватность разработанной 3Dмодели на основе экспериментальных данных по усилию резания и геометрии стружки.

Пособие для лабораторной работы разработано на кафедре технологий производства двигателей и предназначено для использования при подготовке магистров по направлению 24.04.05.

УДК СГАУ: 621.45.0.002.2 (075.8)  
ББК СГАУ: 39.55

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет,  
2015

## СОДЕРЖАНИЕ

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ DEFORM.....	4
2 РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ В ПО DEFORM 2D .....	5
3 РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ В ПО DEFORM 2D .....	27
ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ .....	44
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	44
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	45

# 1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ DEFORM

DEFORM-3D – система моделирования технологических процессов, предназначенная для анализа трехмерного поведения металла при различных процессах обработки. Использование данного пакета позволит существенно сократить время разработки имитационной модели.

Специализированный программный комплекс DEFORM имеет встроенные средства прогнозирования разрушения в виде набора критериев (см. табл. 1).

Таблица 1 – Краткое описание критериев разрушения, представленных в ПО DEFORM

№	Критерий разрушения	Расчетная зависимость
1	Cockroft&Latham (C&L)	$\int_0^{\bar{\varepsilon}} \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon}$ (1)
2	McClintock	$\int_0^{\bar{\varepsilon}} \left\{ \frac{2}{\sqrt{3}(1-n)} \sinh \left[ \frac{\sqrt{3}(1-n)(\sigma_b + \sigma_a)}{2\bar{\sigma}} \right] + \frac{(\sigma_b + \sigma_a)}{\bar{\sigma}} \right\} d\bar{\varepsilon}$ (2)
3	Freudenthal	$\int_0^{\bar{\varepsilon}} \bar{\sigma} d\bar{\varepsilon}$ (plastic work) (3)
4	Rice & Tracey (R&T)	$\int_0^{\bar{\varepsilon}} e^{\frac{\alpha \sigma_m}{\bar{\sigma}}} d\bar{\varepsilon}$ (4)
5	Oyane et al.	$\int_0^{\bar{\varepsilon}} \left( 1 + A \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} \right) d\bar{\varepsilon}$ (5)
6	Ayada	$\int_0^{\bar{\varepsilon}} \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon}$ (6)
7	Brozzo, et al	$\int_0^{\bar{\varepsilon}} \frac{2\sigma^*}{3(\sigma^* - \sigma_m)} d\bar{\varepsilon}$ (7)
8	Zhao & Kuhn	$\frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}}$ (8)
9	Max (Prin. Stress/UTS)	$\frac{\bar{\sigma}_{max}}{\bar{\sigma}_{uti}}$ (9)

где  $\bar{\varepsilon}$  - накопленная пластическая деформация;  
 $d\bar{\varepsilon}$  - приращение накопленной деформации;  
 $\sigma^*$  - максимальное главное растягивающее напряжение;  
 $\bar{\sigma}$  – интенсивность напряжений;  
 $\bar{\sigma}_{max}$  – максимальное главное напряжение;  
 $\bar{\sigma}_{uti}$  – предел прочности при растяжении;  
 $\sigma_m$  – гидростатическое давление;  
 $\alpha$  - коэффициент, зависящий от свойств материала;  
 $n$  - экспонента напряженно-деформированного отношения деформационного упрочнения Людвига;  
 $h$  - коэффициентупрочнения;

Критерием разрушения по умолчанию в DEFORM является критерий Cockroft-Latham, рассчитываемый по формуле (1) [10], основанный на вычислении потенциальной энергии пластической деформации, т.е. площади фигуры, ограниченной кривой деформация – напряжение. Зависимости (2) – (3) в таблице 1 также характеризуют накопление энергии повреждений при пластической деформации и относятся к энергетическим критериям. Энергетические критерии позволяют достаточно адекватно оценивать возможность разрушения твердых тел при монотонных процессах пластического деформирования с относительно не сложной траекторией деформации. Данные критерии приводят к занижению критических напряжений и деформаций при моделировании немонотонных процессов.

Предлагаемы в DEFORM критерии разрушения не учитывают экспериментальный факт увеличения технологической пластичности материала при увеличении в схеме напряженного материала сжимающих напряжений. Зависимости (8)-(9) в таблице 1 определяют достижение материалом своего предельного состояния по сопротивлению разрушению по критическим величинам относительных напряжений.

## 2 РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ В ПО DEFORM 2D

Создание имитационной модели в программе Deform 2D/3D осуществляется в три этапа:

1. **Препроцессирование** – задание начальных данных для расчета;
2. **Симуляция процесса обработки** ;
3. **Постпроцессирование** – вывод результатов расчета.

Представим пример разработки имитационной модели в ПО DEFORM 2D на примере бокового фрезерования материала ВТ-6 на режимах обработки:  $V = 60$  м/мин;  $S = 12, 7$  мм/сек,  $t = 0,3$  мм. В качестве режущего инструмента используется фреза  $D = 10$  мм.

### 1 Препроцессирование обработки

- 1) Запуск системы

Откройте шаблон “Machining 2D” из меню установленных программ (Allprograms) на PC (рис. 1) или используя имя ‘2d\_cutting’ на UNIX получите доступ к возможностям шаблона, включая настройку процесса, установившийся режим решения задачи и анализ напряжений на инструменте. Другой путь для запуска шаблона – это из главного меню Deform 2D (пользователь может только задать настройку процесса).



Рис. 1 – Запуск системы

В модуле Deform-2DMachining (Cutting) создается новый проект и вводится название. Выбираются единицы измерения. В данном случае – система СИ (Рис.2).

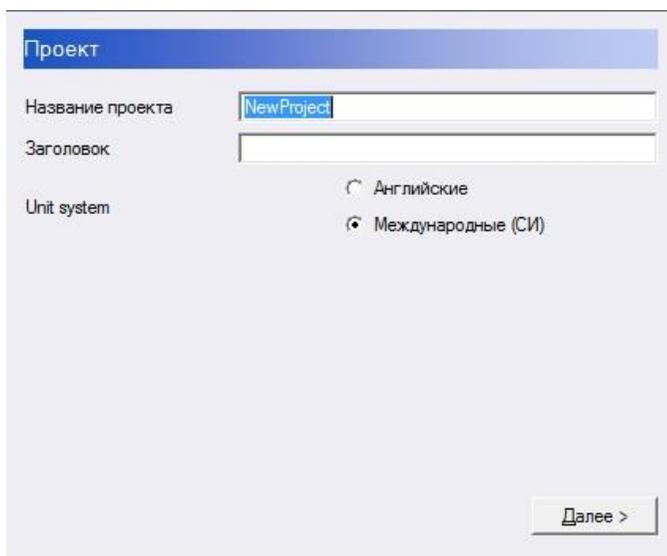
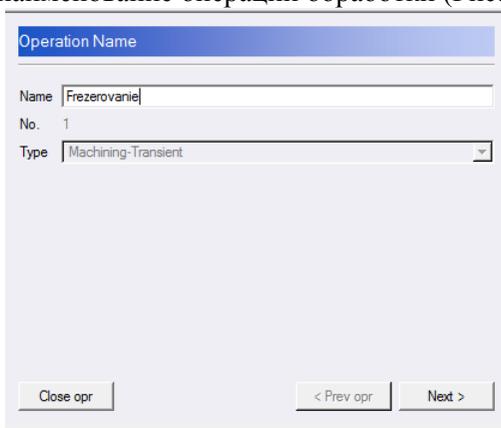


Рис.2 – Выбор системы единиц

Выбирается наименование операции обработки (Рис.3).



Operation Name

Name: Frezerovanie

No.: 1

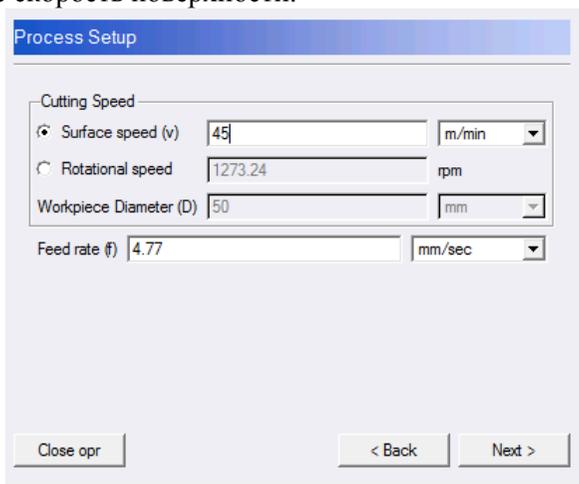
Type: Machining-Transient

Buttons: Close opr, < Prev opr, Next >

Рис.3 – Назначение наименования операции

2) Определение данных процесса механической обработки

В меню 'Настройки процесса (Process Setup)' выберите 'Скорость поверхности (Surface speed)' = 60м/мин, 'Скорость подачи (Feed rate)' = 12,7мм/сек (см. рис. 4). Как альтернатива, пользователь может задать определенную 'Скорость вращения (Rotational speed)' и диаметр заготовки, а не скорость поверхности.



Process Setup

Cutting Speed

Surface speed (v): 45 m/min

Rotational speed: 1273.24 rpm

Workpiece Diameter (D): 50 mm

Feed rate (f): 4.77 mm/sec

Buttons: Close opr, < Back, Next >

Рис.4 – Окно настроек процесса

3) Определение окружающих условий процесса (рис. 5):

- Температура окружающей среды – 20° C;
- Коэффициент трения Инструмент-Заготовка – 0,12;
- Коэффициент теплообмена – 45.

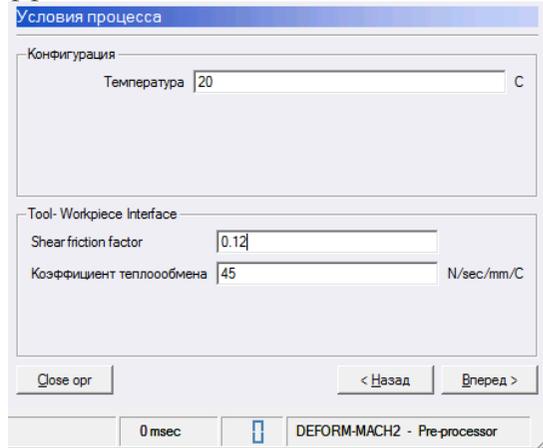


Рис.5 – Меню настройки процесса

4) Задание геометрии и параметров инструмента.

В меню 'Настройка инструмента (Tool Setup)' задайте температуру инструмента 20°С (рис.6). В этом месте пользователь может импортировать геометрию режущей грани из ключевого файла предыдущего моделирования или базы данных. Для этой лабораторной работы геометрия инструмента импортируется из двухмерной модели в форматеIGS, созданной в любой CAE - системе. Для этого в диалоговом окне выбирается опция «Importgeometry» (Рис.7).

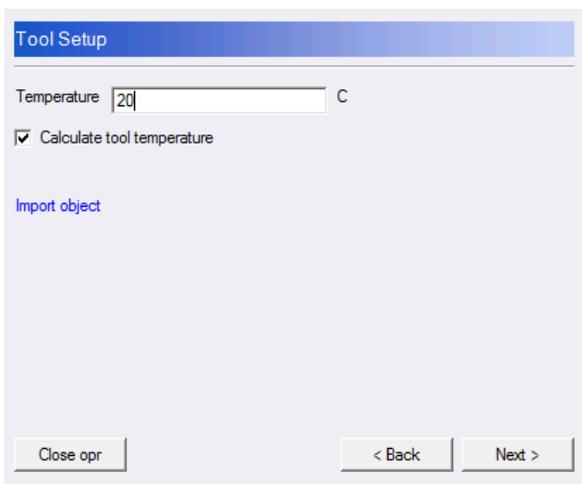


Рис.6 – Назначение температуры инструмента

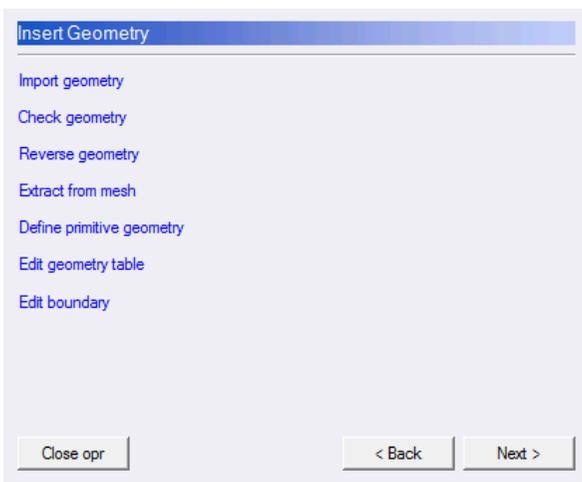


Рис.7 – Импорт геометрии режущего инструмента

Позиция инструмента задается автоматически. При необходимости можно ее изменить, выбрав опцию «Editposition».

#### 5) Создание покрытия

В следующем меню ‘Создание сетки покрытия (Create Coating Mesh)’ добавляем (+) два слоя для покрытий деталей. Для внешнего слоя выберем толщину покрытия 10 microns и ‘TiN’ в виде материала,

а для внутреннего слоя покрытие зададим так же 10, а материал назначим как 'TiCN' из категории материалов для инструмента. Нажмите 'Далее (Next)' для продолжения (см. рис. 8).

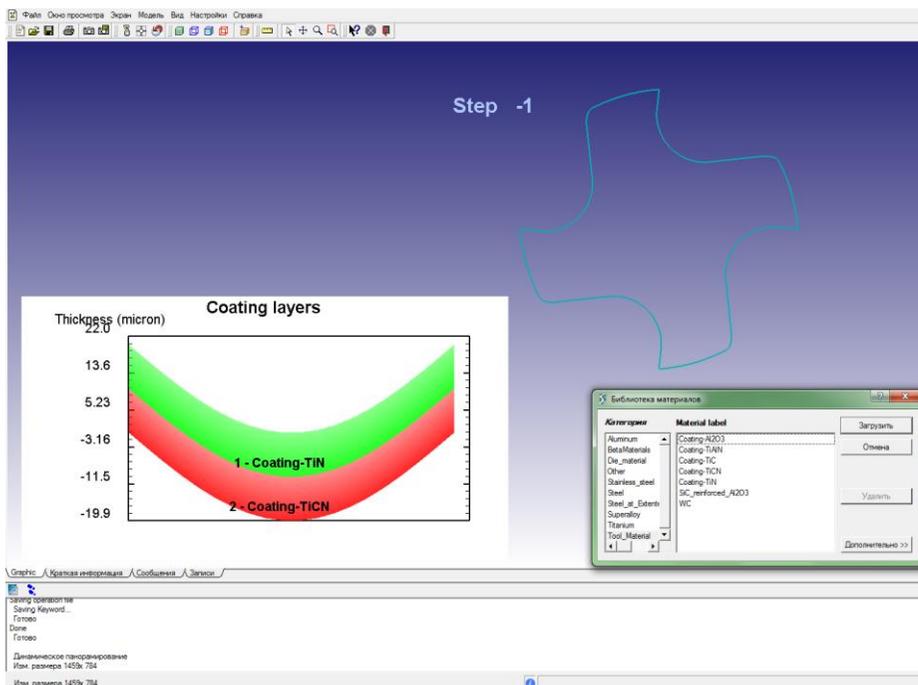


Рис. 8 – Определение материала покрытия

### б) Создание сетки конечных элементов на инструменте

Т.е., инструмент разбивается на конечные элементы. В нашем случае, сетка задается относительным способом (выбирается число конечных элементов – программа определяет их размер и генерирует сетку).

Следует отметить, что большое число элементов в сетке повышает точность расчета, но снижает скорость. Поэтому необходимо подобрать оптимальное количество элементов, удовлетворяющих требованиям точности и скорости расчета.

Число конечных элементов принято равным 2500. После задания всех параметров выбирается опция «Generatemesh» (рис. 9).

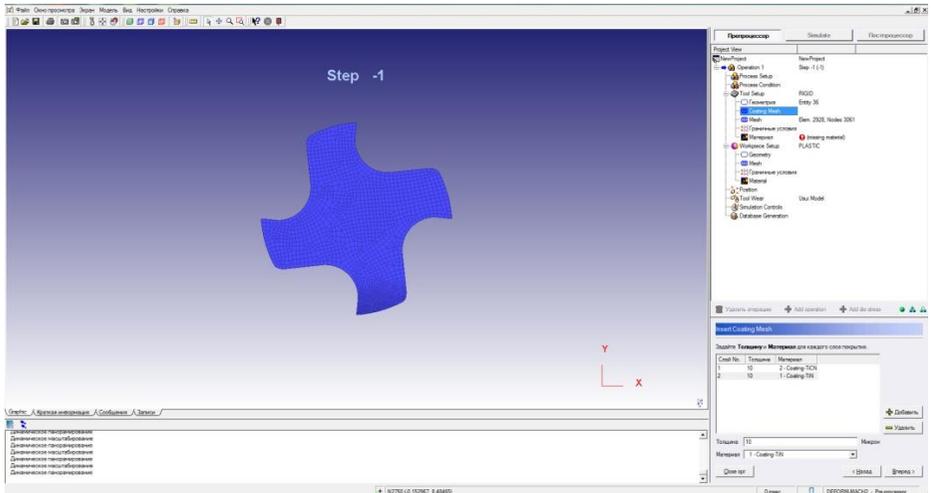


Рис.9 – Окно генерации сетки на инструменте

## 7) Вставка граничных условий

Следующим шагом мы должны рассмотреть температурные граничные условия, генерируемые системой в меню 'Просмотр граничный условия резца (View Insert BCC)'. Программа генерирует теплообмен с окружающей средой (часть резца, которая находится в зоне контакта) и фиксирует узловую температуру для поверхности вне зоны реза. Нажмите 'Далее (Next)' для продолжения (см. рис.10).

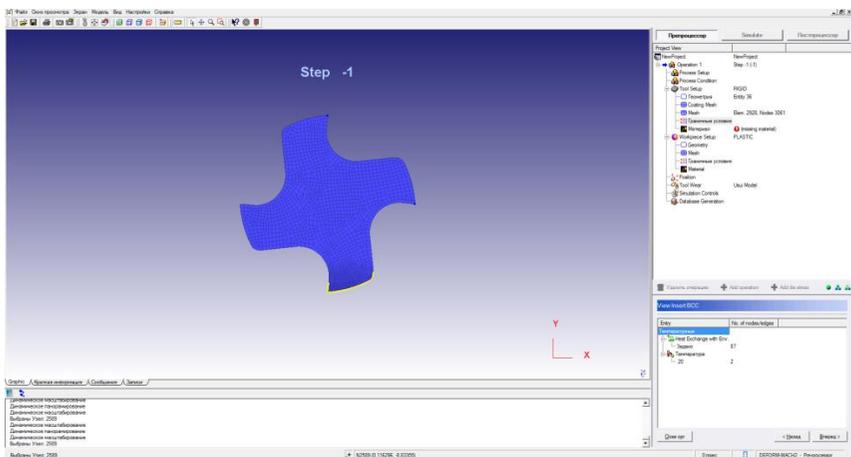


Рис. 10 – Граничные условия для инструмента

## 8) Выбор материала из базы

В меню ‘Настройка материала резца (Insert Material Setup)’ выберите материал из библиотеки используя опцию ‘Импорт материала из библиотеки (Import material from library)’. Выберем категорию ‘Материал для инструмента (Tool material)’ и материал ‘WC’ (рис. 11). Нажмите ‘Далее (Next)’ для перехода к настройке параметров заготовки.

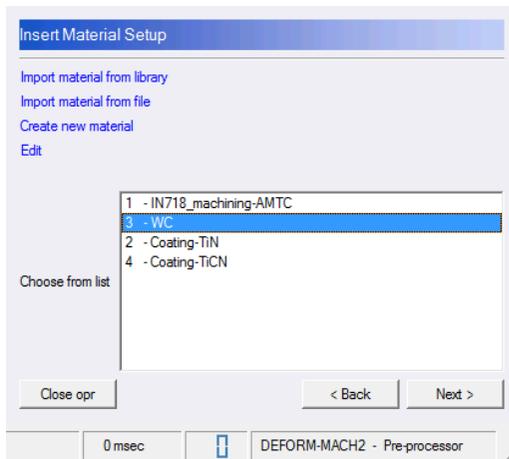


Рис.11 – Диалоговое окно выбора материала инструмента

## 9) Задание геометрии заготовки

В меню ‘Настройка заготовки (Workpiece setup)’ определите заготовку как пластический объект и задайте температуру 20 С. Нажмите ‘Далее (Next)’ для продолжения (рис. 12).

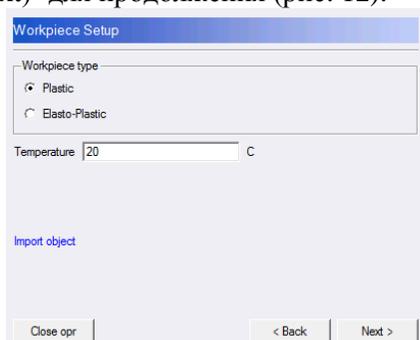


Рис. 12 – Задание свойств материала заготовки

Геометрия заготовки импортируется из CAD-модели в формате IGS, созданной в CAE системе. Для этого в диалоговом окне программы выбирается опция «ImportGeometry» (рис. 13).

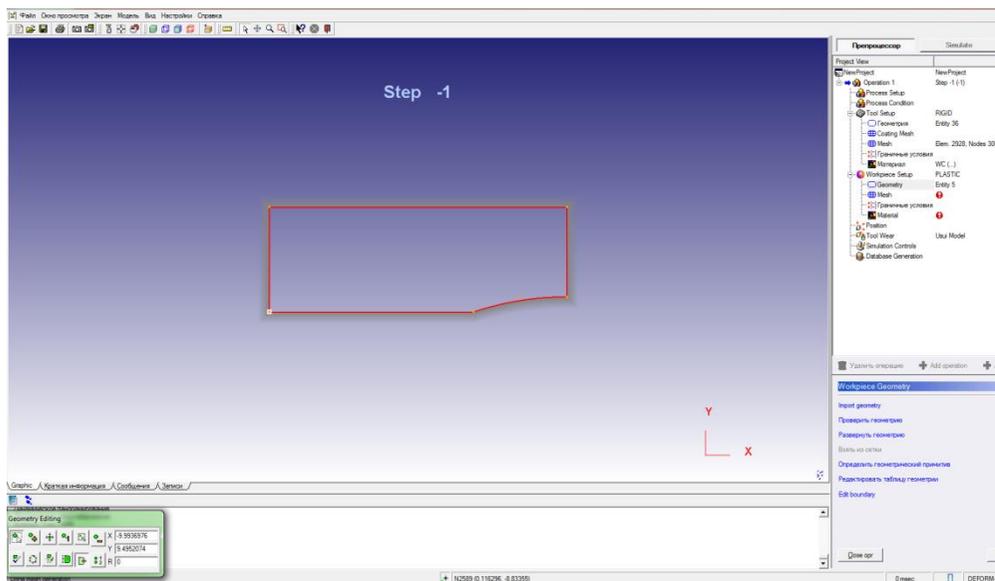


Рис. 13 – Импорт геометрии заготовки

На заготовке был выполнен срез глубиной 0,3 мм, имитирующий поверхность после обработки предыдущим зубом. Данная операция была выполнена с целью сокращения времени расчета за счет оптимальной генерации сетки программой. Закройте меню геометрии и нажмите ‘Далее (Next)’ для перехода к странице генерации сетки.

Сетка заготовки задается аналогично инструменту. Выберите 25 элементов по толщине припуска на заготовке и нажмите ‘Генерация сетки (Generate mesh)’ для создания сетки на заготовке. Нажмите ‘Далее (Next)’ для продолжения.

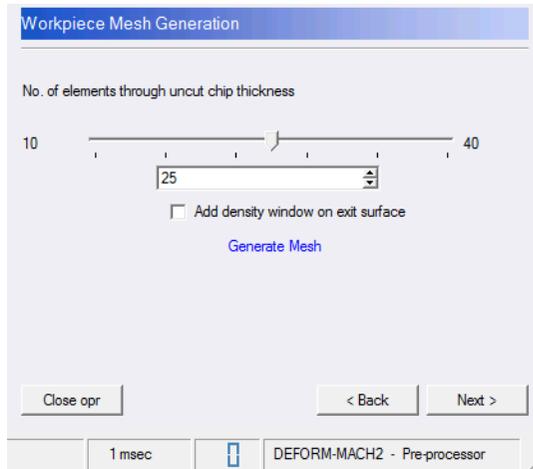


Рис. 14 – Задание сетки заготовки

#### 10) Проверка граничных условий заготовки

В меню ‘Просмотр граничный условия заготовки’ проверьте граничные условия, наложенные на заготовку системой, и нажмите ‘Далее (Next)’ для продолжения.

Определяется плоскость закрепления заготовки (раздел «Скорость») и граничные условия (рис. 15).

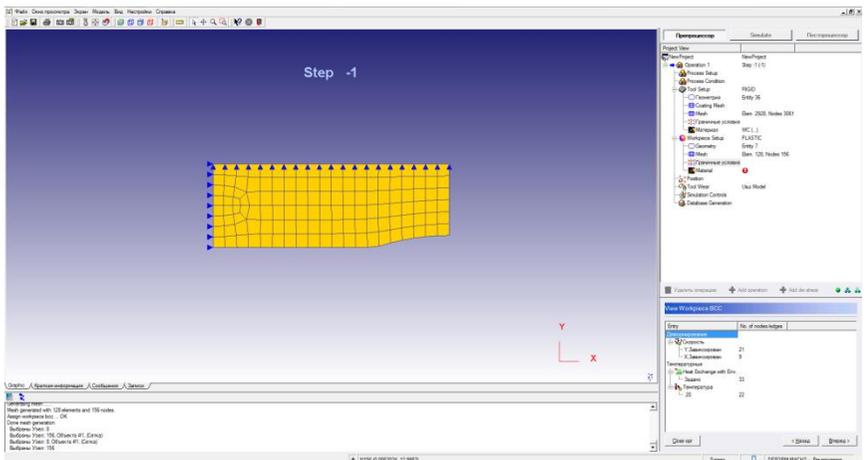


Рис. 15 – Граничные условия на заготовке

### 11) Выбор материала для заготовки

В меню 'Настройка материала для заготовки (Work piece material setup)' выберите материал из библиотеки используя опцию 'Импорт материала из библиотеки (Import material from library)'. Выберем категорию 'Titanium' и материал 'Ti6Al4V-machiningSFTC'. 'Загрузите (Load)' этот материал и нажмите 'Далее (Next)' для продолжения.

### 12)Позиционирование резца

В меню 'Позиционирование (Position)' нажмите на 'Установить позицию по умолчанию (Generate default position)' и нажмите 'Далее (Next)' для продолжения.

В случаи, если инструмент неправильно расположен относительно заготовки, необходимо вернуться в настройки инструмента, выбрать опцию «Editposition» (см. рис.6) и задать верное расположение (рис. 16). В данной лабораторной работе расположение взаимного расположения заготовки и инструмента задано автоматически через общую систему координат в CAE – системе.

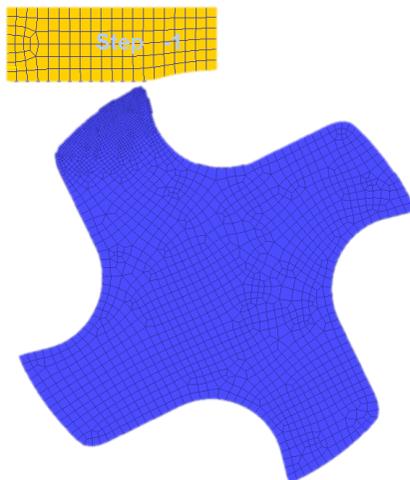


Рис.16 – Объекты после позиционирования

### 13) Настройка износа инструмента

Выберите модель Usui's и введите коэффициенты  $a$ ,  $b$ . Пожалуйста, обратите внимание, что они (показаны рядом с

уравнением) являются лишь некоторыми обычными величинами, которые могут быть получены из литературы и пользователь несет ответственность за точность этих данных. Нажмите “Далее (Next)”.

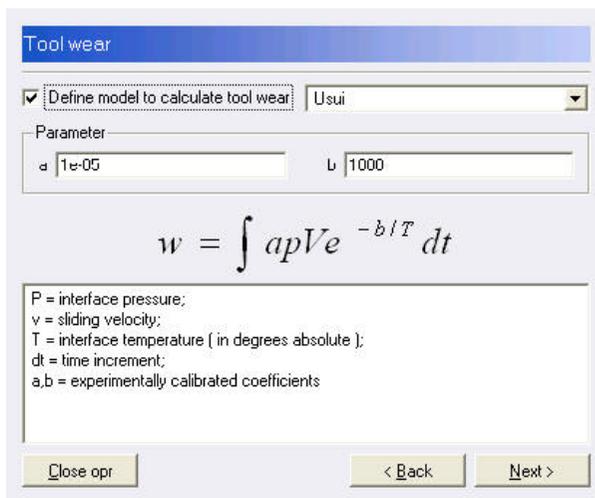


Рис. 17: Окно настройки износа инструмента

#### 14) Настройка задачи

Проверьте ‘Настройка задачи (Simulation Controls)’ и установите длину реза как ‘10 мм’, а остальные значения оставьте по умолчанию (рис. 18). Сгенерируйте базы данных. Закройте текущую операцию.

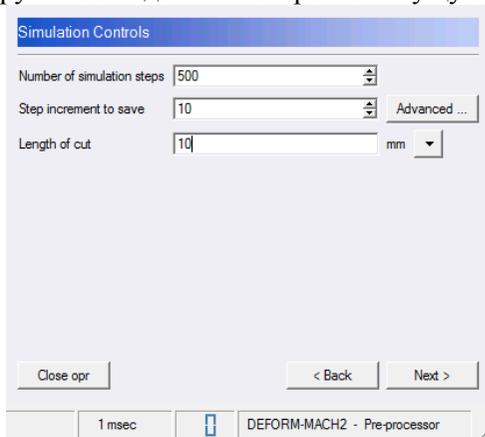


Рис. 18 – Окно настройки задачи

## 15) Генерация базы данных

По завершению настроек симуляции необходимо проверить (Checkdata) и сгенерировать базу данных (Generatedatabase).

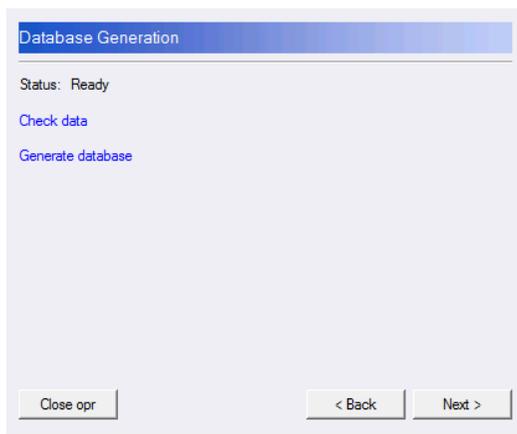


Рис. 19 – Окно проверки и генерации базы данных

Для завершения препроцессинга необходимо сгустить сетку в зоне контакта инструмента с заготовкой. Это необходимо для повышения точности расчета.

Для этого открываем модуль Deform-2D/3D, выбираем в директории программы созданный в модуле 2DMachining проект и в окне «Preprocessor» выбираем Deform-2D/3D Препроцессор. (рис.20).

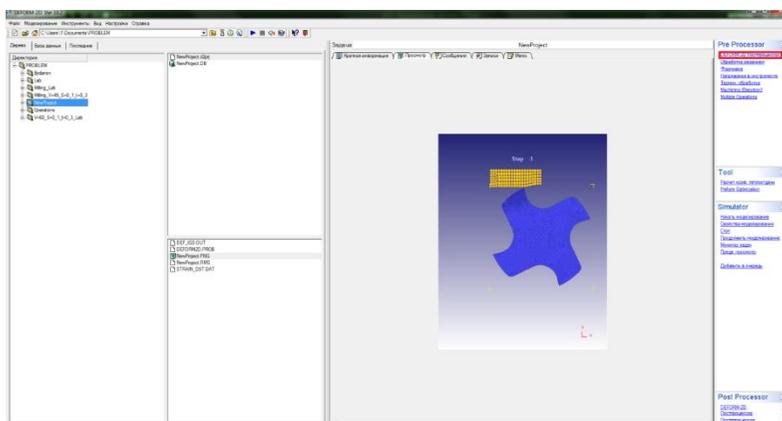


Рис.20 – Окно программы Deform-2D/3D



При необходимости повышения точности расчета, можно уменьшать размер элементов при задании окон плотности.

## 16) Задание критерия разрушения

Для адекватности расчета необходимо указать соответствующий критерий разрушения. Критерий задается во вкладке «Материалы» – «Дополнительно» – Fracture (рис.23).

В данной лабораторной работе разрабатываются два типа моделей: с критерием разрушения и без учета критерия разрушения. Для разработки модели без учета критерия разрушения необходимо во вкладке «Дополнительно» – Fracture выбрать критерий Cockroft-Latham и указать значение 0. Для разработки модели, учитывающей критерий разрушения выберем во вкладке разрушение критерий «Max(Prin.Stress/UTS)», откроем его свойства (рис. 24) и изменим значение «Criticalvalue» на 2 (рис. 26). Величина предела текучести определяем из свойств материала в самом DEFORM. Для этого в окне проекта Pre-Processor выберем вкладку «Материал» и в свойствах пластичности обрабатываемого материала выведем график распределения strain-flowstress (рис.25). Предел прочности для данного материала выбираем как функцию максимальных напряжений от температуры при скорости деформации  $10^4 \text{ c}^{-1}$  (рис. 26, 27).

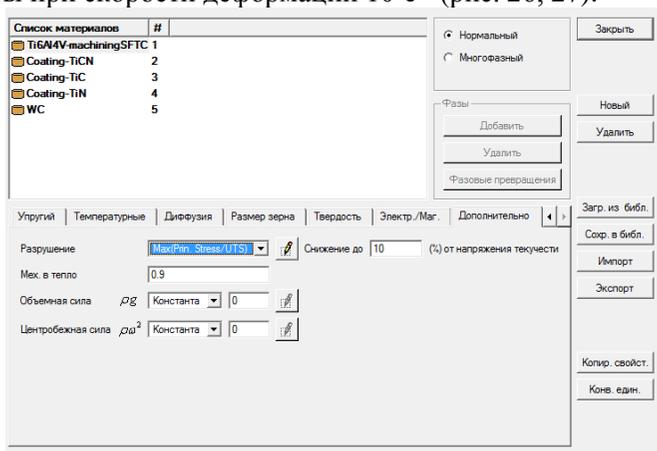


Рис. 23 – Окно выбора направления движения

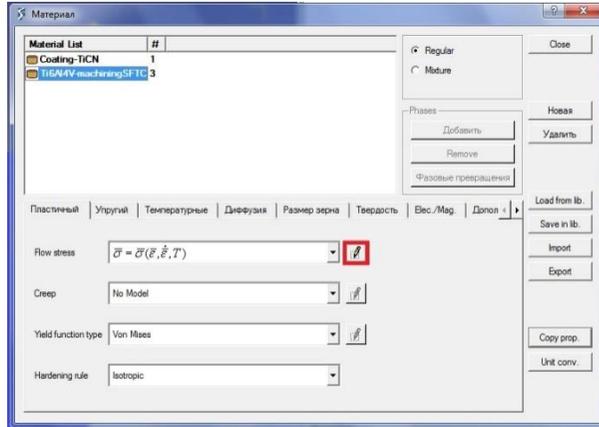


Рис. 24 – Окно выбора свойств материала

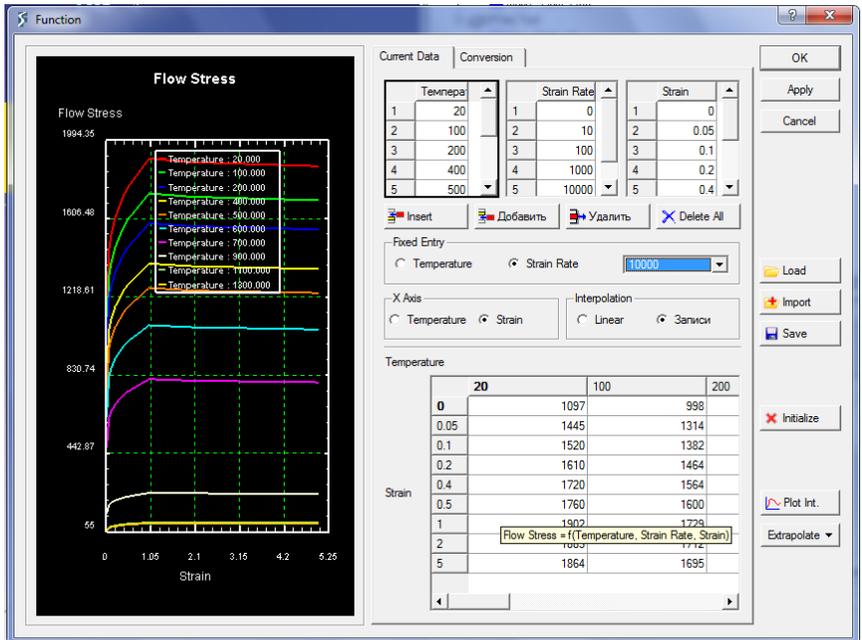


Рис. 25 – График распределения напряжение – температура прискорости деформации  $1 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$

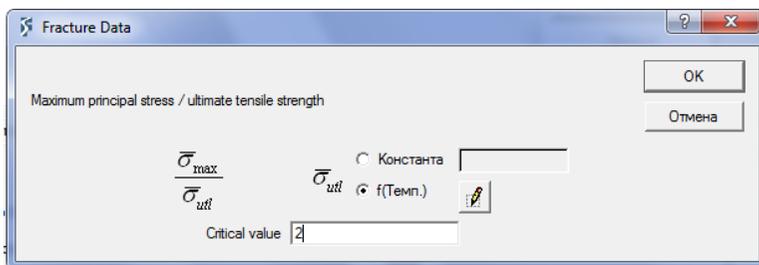


Рис. 26 – Свойства критерия разрушения

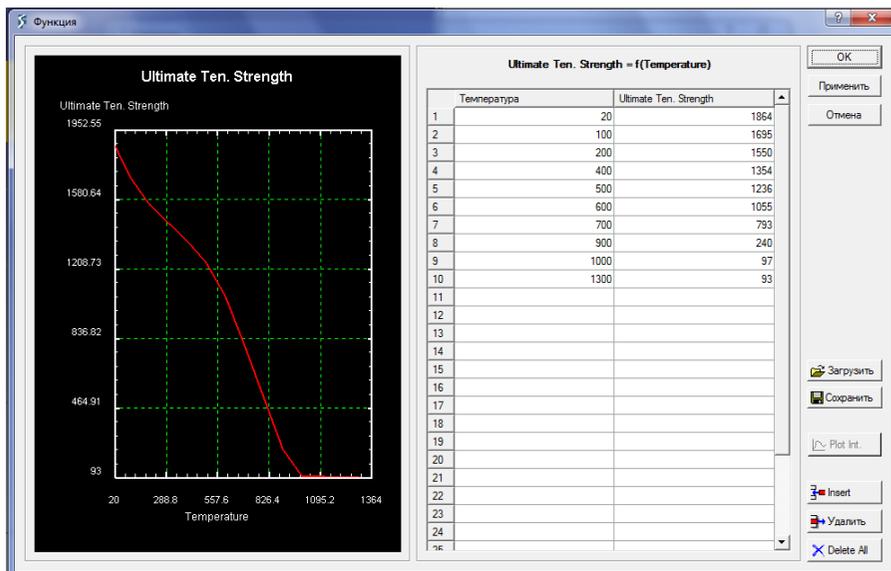


Рис. 27 – График распределения напряжения от температуры

После задания свойств материала необходимо выбрать направление движения заготовки и вращения инструмента. Для этого нужно выбрать раздел «Движение» и во вкладках «Перемещение» и «Вращение» ввести необходимые параметры (рис. 28).

Вращение инструмента задается относительно его центра по часовой стрелке. Перемещение – в положительном направлении оси Y.

Для визуализации движения необходимо кликнуть по иконке  .

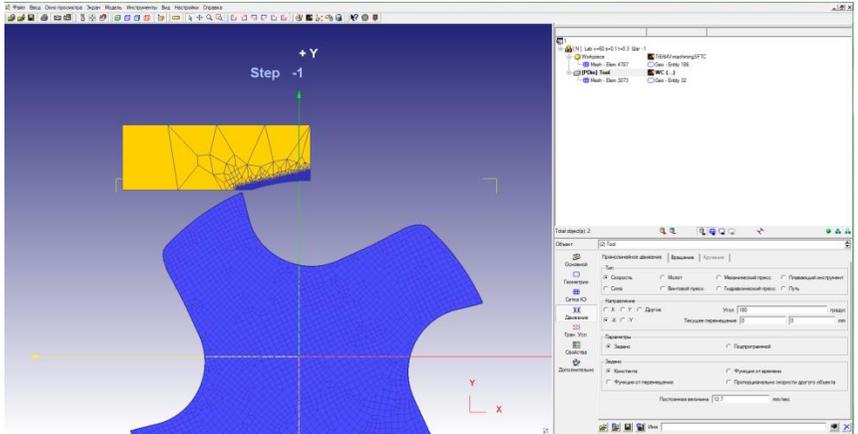


Рис. 28 – Окно выбора направления движения

По завершению настроек симуляции необходимо проверить (Checkdata) и сгенерировать базу данных (Generatedatabase) (рис. 29).

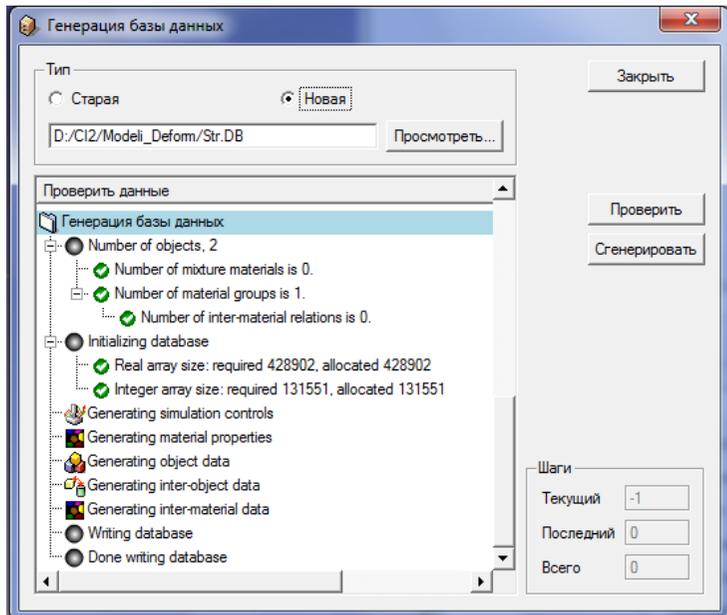


Рис. 29 – Проверка и генерация базы данных

## 1.2 Симуляция процесса

Перейдите на закладку ‘Моделирование (Simulator)’ (см. рис. 30).

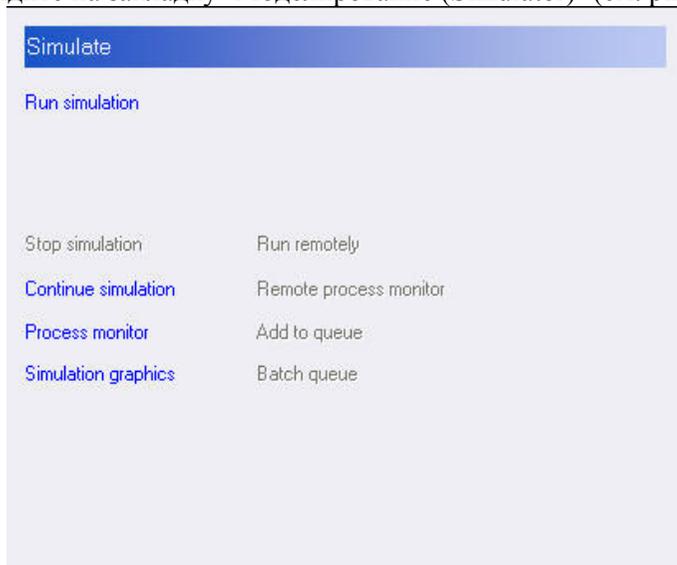


Рис. 30 - Запуск моделирования

Выберите ‘Запуск моделирования (Run Simulation)’, чтобы запустить расчет. Пользователь может использовать ‘Визуализация расчета (Simulation Graphics)’ для отображения как процесс достигает определенной длины реза.

После завершения моделирования пользователь может выбрать либо проверить результат в ‘Постпроцессоре (Post)’ или вернуться в ‘Препроцессор (Pre)’ и добавить следующую операцию моделирования при установившихся условиях или добавить операцию анализа напряжений на инструменте или продолжить текущую операцию с неустановившимся режимом стружкообразования.

## 1.3 Постпроцессирование – вывод результатов расчета

По завершении расчета, в окне сообщений программы будет выведен отчет (см. рис.31).

```

TOTAL CPU TIME UP TO THIS STEP = 59 (min) 24.6722 (sec)
SUBTOTAL CPU TIME OF THIS STEP = 79.6160 (sec)

RESULT I/O 0.3840

CPU FOR DEFORMATION CALCULATIONS (sec)
INTERFACE GENERATION 0.0000 1
EQ. INDEXING PREPERATION 1.6640 1
STIFFNESS MATRIX GENERATION 6.5280 28
BOUNDARY CONDITION CAL. 0.0000 28
EQUATION SOLVING 68.2240 28
CONTACT TIME CALCULATION 1.1520 1
MESH CHECKS 0.0000 1
INSIDE/OUTSIDE CHECK 0.0000 0

CPU FOR HEAT TRANSFER CALCULATIONS (sec)
NONLINEAR H. T. MATRIX 0.2560 2
LINEAR H. T. MATRIX 0.0000 0
INTERFACE H. T. MTRIX 0.0000 2
GEN INT. ELEMENT 0.0000 1
EQUATION SOLVING 0.7680 2
I/O L. H. T. 0.0000 0
FOR ELEMENT HEAT FLUX 0.0000 1
*** Simulation Aborted by User ***

```

Рис.31 – Отчет программы

Нажав под окном проекта «Постпроцессор», можно посмотреть визуализацию расчета (рис.32).

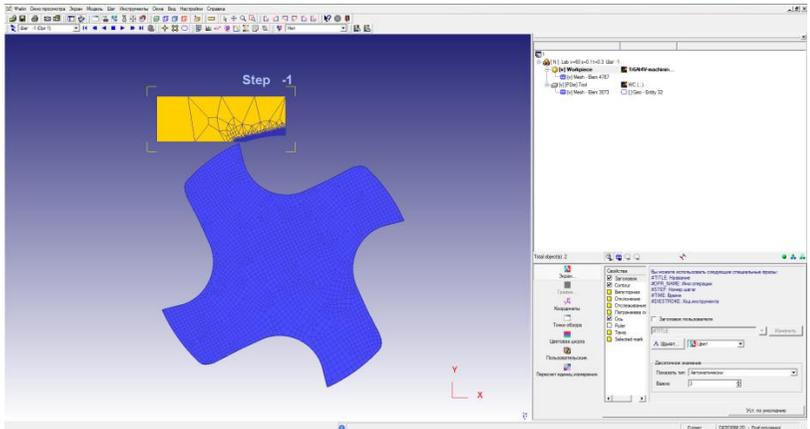


Рис.32 – Окно постпроцессора

В постпроцессоренеобходимо проанализировать следующие результаты расчета:

- 1) Определение составляющих силы резания.

Используя функцию «График»  выведем изменение составляющих усилия резанияпо шагам. Ниже представлена

зависимость составляющей силы резания по оси X и Y по шагам рассчитана в режимах обработки  $S_z = 0,1\text{мм}$ ;  $t = 0,3\text{мм}$ ;  $V = 60\text{ м/мин}$ ; (рис. 33).

Для анализа составляющих силы резания, необходимо вывести значения графика в текстовый формат. Для этого выводим график распределения силы резания во времени нажатием клавиши , далее выбираем по оси x «время», а по оси y «X load». Далее на графике кликаем левой клавишей мыши и нажимаем «Exportgraphdata». Сохраняем данный в формате txt.

Результирующая сила, действующая на динамометр пропорциональна алгебраической сумме соответствующих компонент отдельных сил деленной на толщину стружки (при обработке титана ВТ6 на режимах обработки  $S_z = 0,1\text{мм}$ ;  $t = 0,3\text{мм}$ ;  $V = 60\text{ м/мин}$  толщина стружки равна 2 мм).

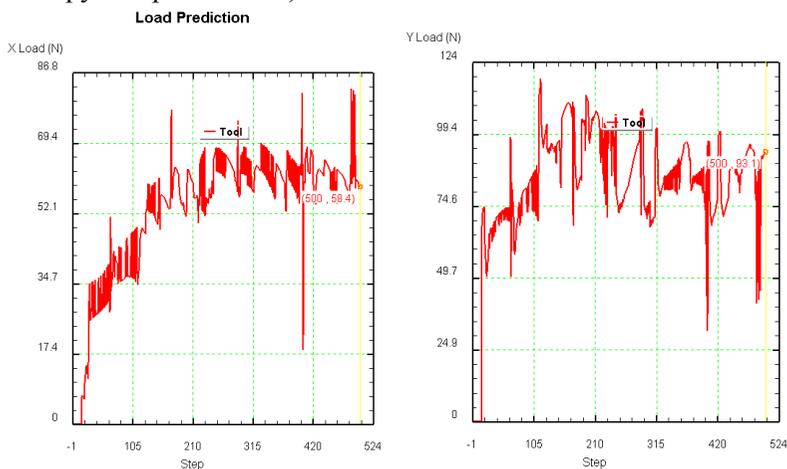


Рис.33 –Зависимость составляющей силы резания по оси X и Y от времени

На основе рассчитанных составляющих усилий резания и суммарной силы определяем адекватность разработанной модели. Сравнение экспериментальных данных с данными моделирования представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения усилий резания при обработке на режимах  $S_z=0.1$  мм;  $t=0.3$ мм;  $V=60$  м/мин

	$P_x$ , Н	$P_y$ , Н	$P_z$ , Н	$P_{\Sigma}$ , Н
Данные эксперимента	38,38	44,21	11,2	59,6
Данные 2D моделирования без учета критерия разрушения	44,29	54,36	-	70,12
Данные 2D моделирования с учетом критерия разрушения	27,24	42,69	-	50,64

Делаем вывод о адекватности разработанной модели. Если погрешность распределения усилия не превышает 10% от экспериментальных данных, то модель считается адекватной. Для определения критерия разрушения необходимо вывести изменения Stress – Max principal (рис. 34). Далее нажатием клавиши необходимо определить напряжения в узлах вблизи условной плоскости сдвига (рис. 35). Критерий разрушения приблизительно определяется как отношение полученного значения к эффективному напряжению в срезе стружки. В нашем случае критерий равен  $300/1400=0,214$ . Используем данный критерий для дальнейшего расчета модели в DEFORM 3D.

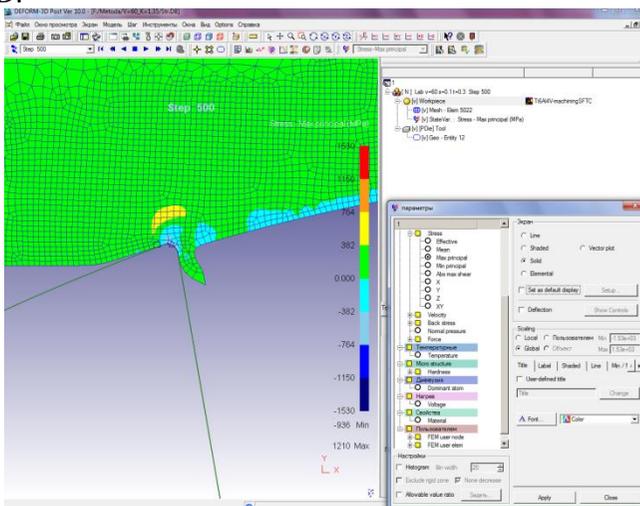


Рис.34–Распределение напряжения в срезе стружки при обработке на режимах  $S_z= 0,1$ мм;  $t = 0,3$ мм;  $V = 60$  м/мин

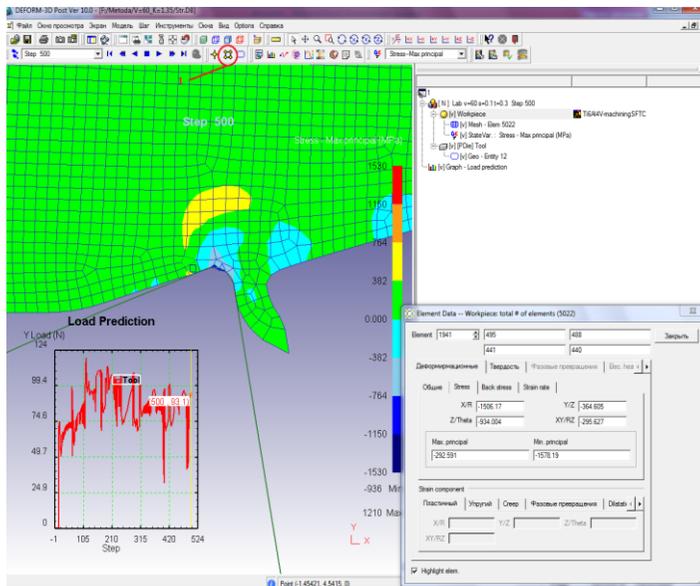


Рис.35– Определение напряжения в узле условной плоскости сдвига при обработке на режимах  $S_z = 0,1\text{мм}$ ;  $t = 0,3\text{мм}$ ;  $V = 60\text{ м/мин}$

Разработанная модель позволяет вывести основные параметры (распределение температуры, эквивалентная деформация, нормальное давление и др.), отследить изменение параметров в конкретной точке геометрии, сделать разрез и др.

### 3 РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ В ПО DEFORM 3D

Рассмотрим процесс разработки имитационной модели в ПО DEFORM 3D.

Моделирование обработки в САЕ-системе осуществляется в 3-этапа, аналогично разработке имитационной модели в ПО DEFORM 2D.

- препроцессинг – ввод начальных условий для обработки (импорт геометрии инструмента и заготовки, создание сетки конечных элементов, определение граничных условий, задание параметров движения инструмента);

- симуляция – непосредственная симуляция обработки;
- постпроцессинг – анализ полученных результатов. В данном случае — экспорт данных по усилиям резания).

Этапы моделирования:

1) Запустить приложение DEFORMIntegrated 2D3D.

2) В дереве пути (рис. 36 позиция 1) выбрать директорию, в которой будет сохранен проект. *Важно: в имени пути не должно присутствовать кириллицы и пробелов.* Запустить приложение DEFORM-2D/3D Pre (рис. 36 позиция 2).

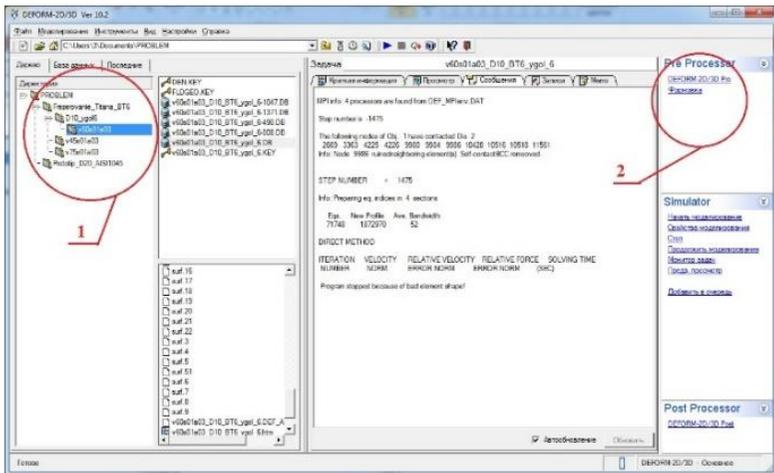


Рис. 36 – Интерфейс приложения DEFORM Integrated 2D3D

3) Ввод геометрии инструмента и заготовки.

Геометрия предварительно создается в стороннем CAD модуле в виде сборки (рис. 37). Моделирование в контексте сборки позволяет добиться наиболее точного расположения инструмента относительно заготовки и не прибегать к средствам позиционирования в Deform.

На заготовке предварительно сделан срез, имитирующий обработанную поверхность зубом фрезы. Это условие необходимо для дальнейшей оптимальной генерации сетки конечных элементов. Модели сохраняются в формате STL.

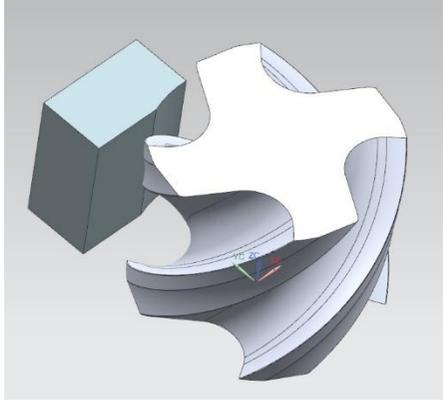


Рис. 37 – CAD-модели заготовки и инструмента

Для импорта геометрии в DEFORM выбираем вкладку Геометрия-Импорт геометрии (рис. 38 позиция 1). В поле «Объект» должно быть выбрано Workpiece (рис. 38 позиция 2). Указываем путь к STL-модели заготовки. Во вкладке «Основной» выбираем тип объекта «Пластичный». Для ввода геометрии инструмента нажимаем кнопку «Добавить объект» (рис. 38 позиция 3). На вкладке «Основной» меняем имя инструмента на Tool, выбираем тип «Жесткий», ставим галочку в поле «Главный инструмент» (рис. 39). Геометрия вводится аналогично заготовке. Возвращаемся к настройке заготовке. В поле объект выбираем Workpiece и нажимаем кнопку «Загрузить материал из библиотеки» (показана на рис.39 позиция 1). Выбрать материал Ti6Al4V-machiningSFTC как указано на рис.40. Результат представлен на рис.41.

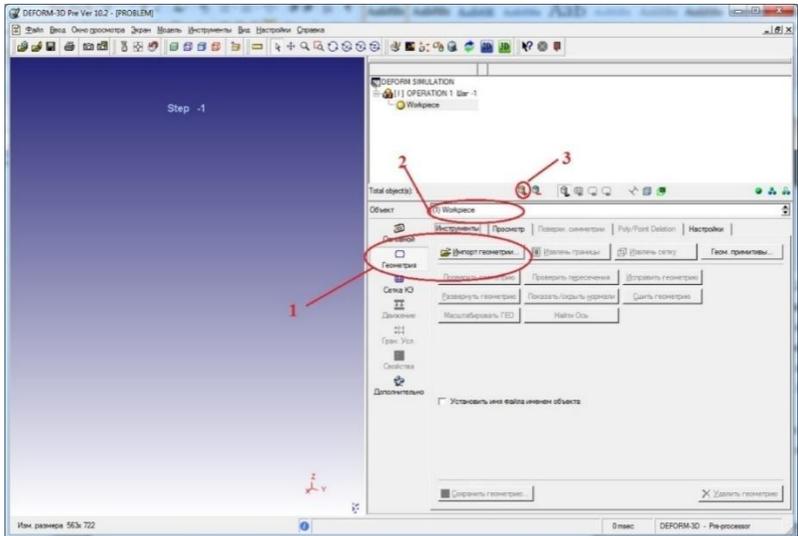


Рис. 38 – Импорт геометрии

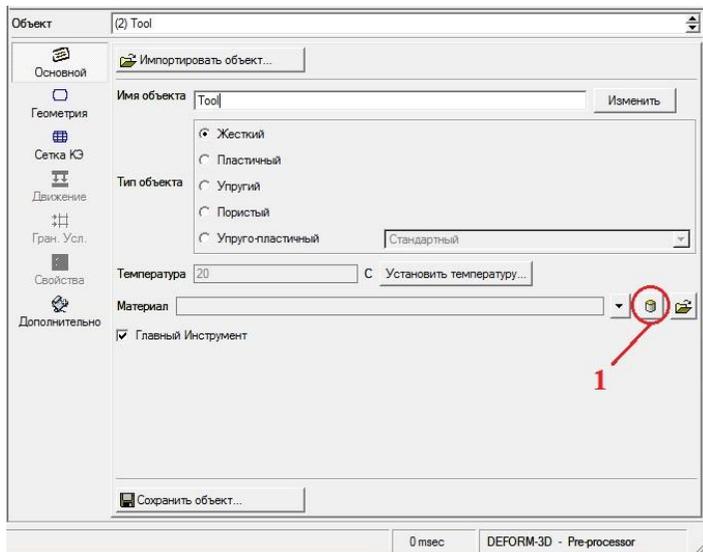


Рис. 39 – Изменение параметров инструмента

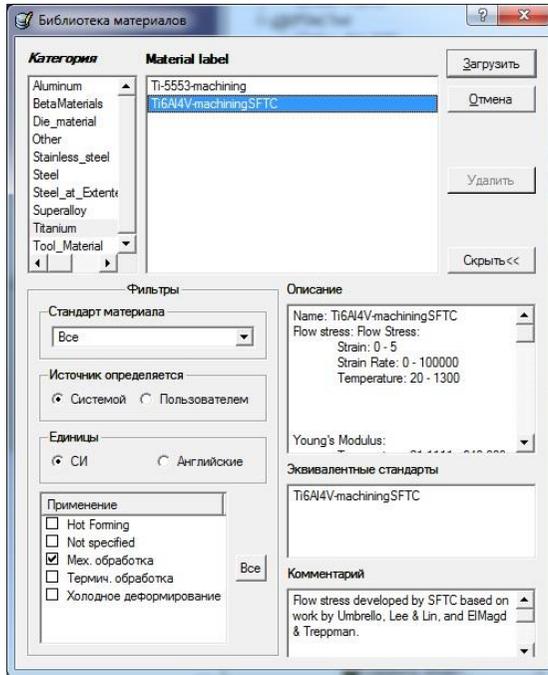


Рис.40 – Окно выбора материала

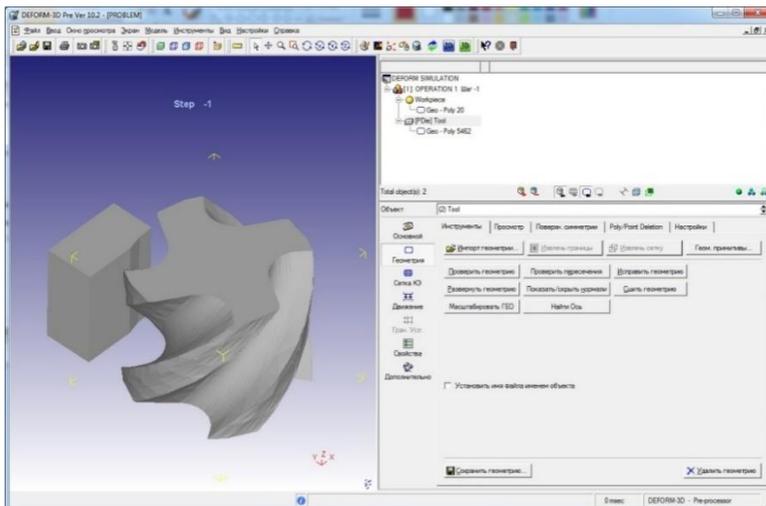


Рис. 41 – Импортированная геометрия

#### 4) Задание взаимодействия объектов

Для определения параметров взаимодействия объектов выбираем в строке меню кнопку «Взаимодействие объектов» . В появившемся диалоговом окне нажимаем «Нет». В появившемся диалоговом окне заполнить параметры, как указано на рис. 42.

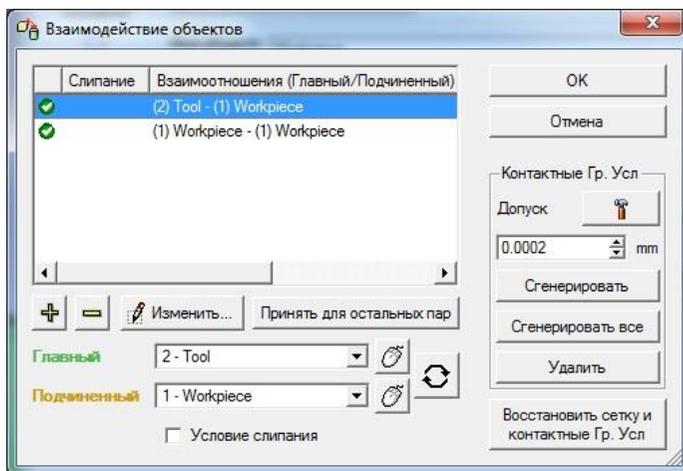


Рис. 42 – Задание условий взаимодействия

Выбираем пару «Tool-Workpiece» и нажимаем кнопку «Изменить». В появившемся диалоговом окне (рис. 43) выбрать вкладку «Деформирование» и задать коэффициент трения по Зибелю 0,12. Аналогичным образом выставить коэффициент трения 0,5 для пары «Workpiece-Workpiece». Нажать ОК и закрыть окно.

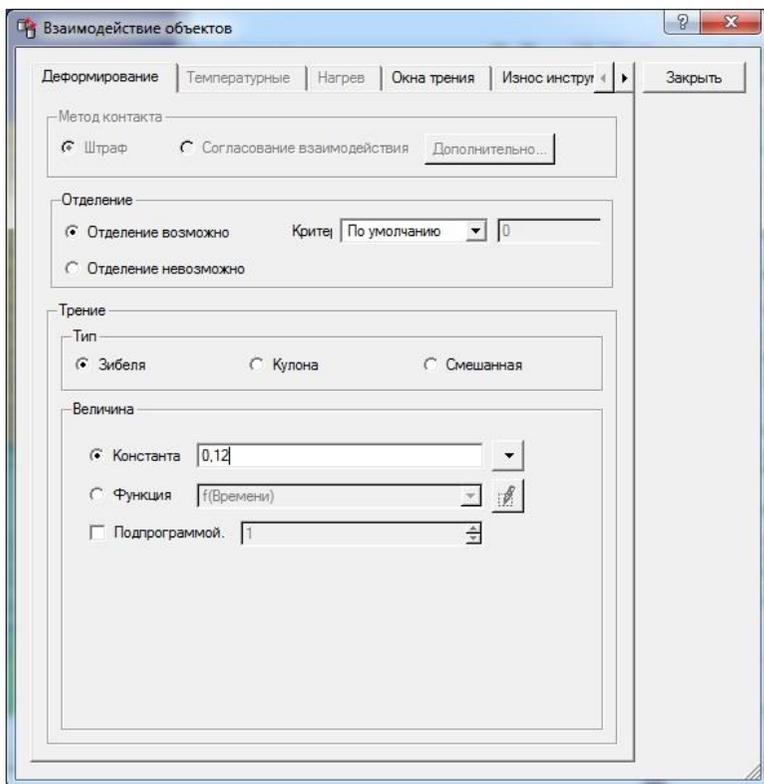


Рис. 43 – Задание коэффициента трения

##### 5) Создание сетки конечных элементов.

Для создания сетки конечных элементов (далее СКЭ) заготовки в поле «Объект» выбираем «Workpiece». Выбираем вкладку Сетка КЭ – Настройки - Общие, задаем тип сетки «Абсолютная» и вводим минимальный (0,07) и максимальный размер элементов. Коэффициент отношения выбираем 4. (рис. 44).

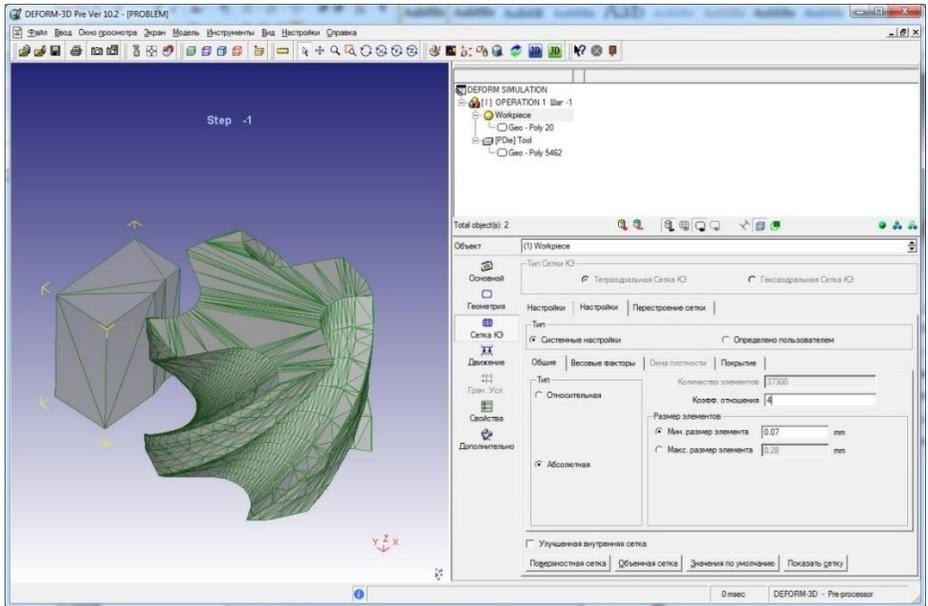


Рис. 44 – Основные параметры СКЭ

Переходим во вкладку Сетка КЭЧ — Настройки — Весовые факторы и выставляем ползунки так, как указано на рис. 44. Нажимаем «Объемная сетка».

Выбираем на панели инструментов кнопку «Настройка задачи» . В появившемся диалоговом окне выбираем вкладку «SimulationsStep» и в графе кол-во шагов моделирования выставляем 5000 (рис.46). Переходим во вкладку «StepIncrement». В поле Stepincrementcontrol выставляем постоянное время шага 1,59403e-05 (рис.47). Нажимаем «Генерация базы данных» (рис.45 поз.1) и выходим из DEFORM. Данное обстоятельство необходимо в дальнейшем для корректного отображения окон плотности СКЭ.

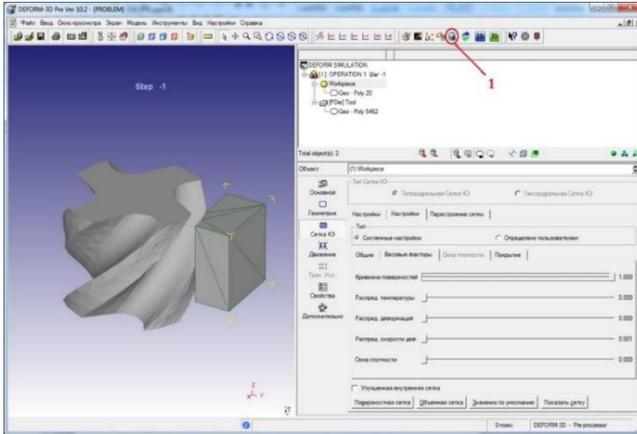


Рис.45 – Изменение весовых факторов СКЭ

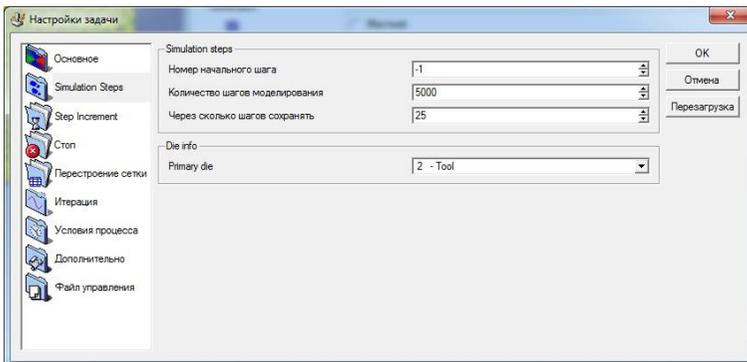


Рис.46 - Задание количества шагов моделирования

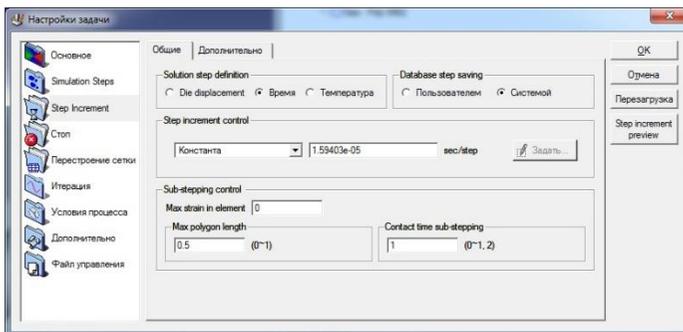


Рис.47 – Задание времени шага

Снова запускаем DEFORM. Выбираем существующую базу данных и запускаем препроцессор (шаги 1,2).

Возвращаемся к настройке весовых факторов. Выставляем ползунок «Кривизна поверхностей» в нулевое положение, а ползунок «Окна плотности» в 1. Все остальные факторы равняются 0.

Переходим во вкладку «Окна плотности». Нажимая кнопку

«Добавить» 

выставляем три окна плотности, как показано на рис.48.

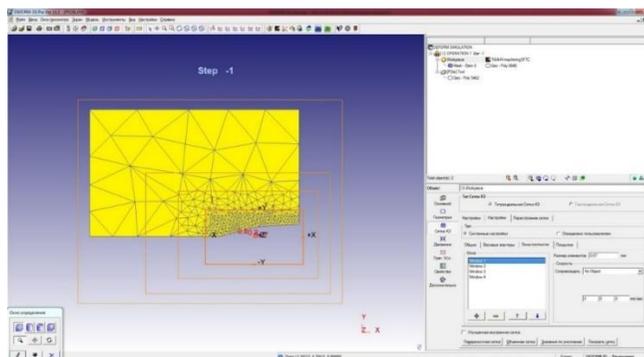


Рис.48 – Положение окон плотности (плоскость X-Y)

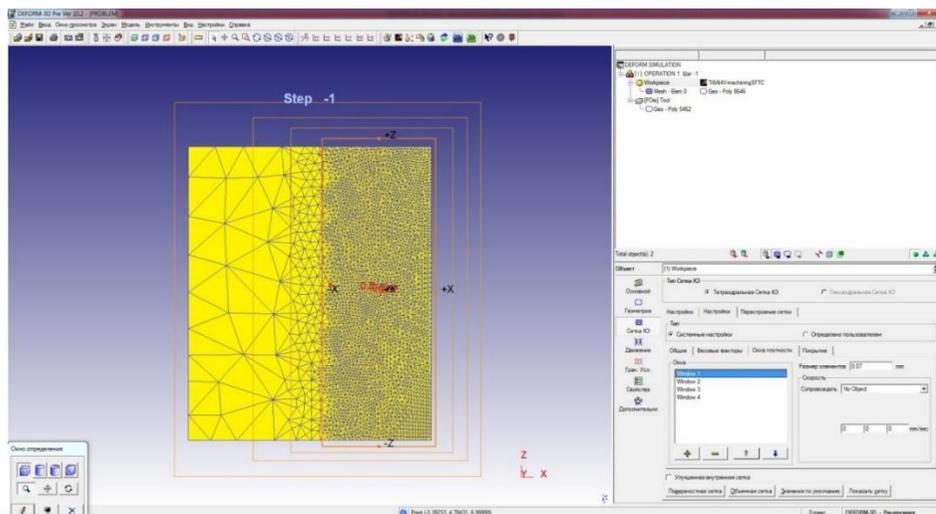


Рис.49 – Положение окон плотности (плоскость Z-X)

В графе Скорость – Сопровождать выбираем NoObject. В поле «Размер элементов» выбираем 0,07 мм (для первого – наименьшего окна), далее в порядке возрастания размеров окон – 0,2; 0,8; 1 мм. Нажимаем «Поверхностная сетка». Если результат соответствует указанному на рисунках 48, 49 – нажимаем «Объемная сетка». Сетка заготовки готова.

В данной задаче сеткой инструмента пренебрегаем, поскольку в расчете не учитывается теплообмен между инструментом и заготовкой. Данное обстоятельство позволяет существенно сократить время расчета.

#### б) Задание параметров движения.

В данной задаче заготовка рассматривается как неподвижное тело. Фиксация заготовки будет рассмотрена в следующем пункте. Чтобы придать направление и скорость движения фрезы (режим обработки), переходим во вкладку «Движение». В поле объект выбираем «Tool». В поле «Направление» выбираем  $-X$ . В поле Задано- Постоянная величина вводим значение подачи 12,733 мм/сек. (рис.50).

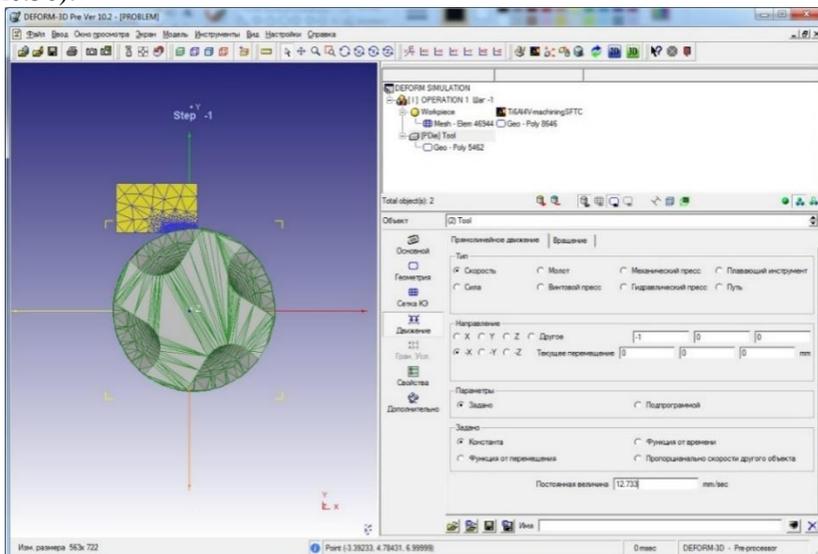


Рис.50 – Задание прямолинейного движения

Переходим во вкладку «Вращение» (рис.51). В поле «Rotation 1- Угловая скорость» нажимаем кнопку  и задаем частоту вращения шпинделя 1910 оборотов. В поле «Ось» выбираем  $-Z$ . Движение фрезы задано. Проверить правильность движения можно нажав кнопку .

7) Задание граничных условий заготовки.

На данном этапе осуществляется придание заготовке неизменного положения в процессе обработки.

Переходим во вкладку «Гран.Усл.». В поле Деформирование-Скорость выбираем направление X, скорость 0. Кликаем на заднюю поверхность заготовки, как показано на рис.50, и нажимаем кнопку «Добавить гр. условия». Аналогично делаем для направлений Y и Z. Поверхность заготовки выбирается та же, что и для направления X.

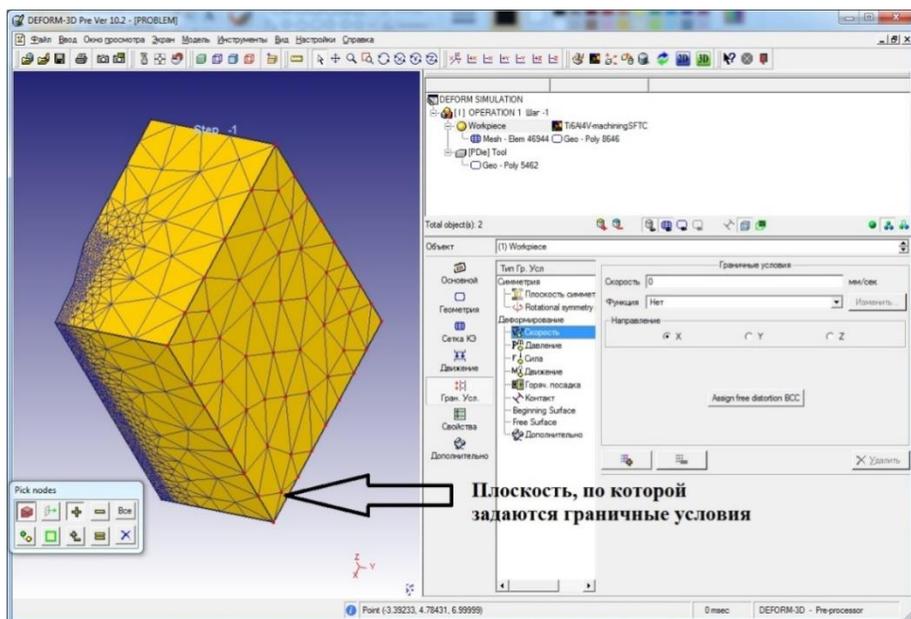


Рис.51 – Задание граничных условий

## 8) Редактирование материала заготовки.

В выбранном ранее материале необходимо изменить значение критерия разрушения, который был рассчитан ранее и уточнен в процессе 2D моделирования.

Для изменения свойств материала нажимаем на значок  на инструментальной панели. В появившемся окне (рис.52) переходим во вкладку «Дополнительно». В выпадающем меню «Разрушение»

выбираем Max (Prin. Stress/UTS) и нажимаем на значок «Задать» . В поле константа (предел текучести) вводим значение зависимости предела прочности от температуры. В поле «Criticalvalue» вводим критерий разрушения 0,214 (рис.53).

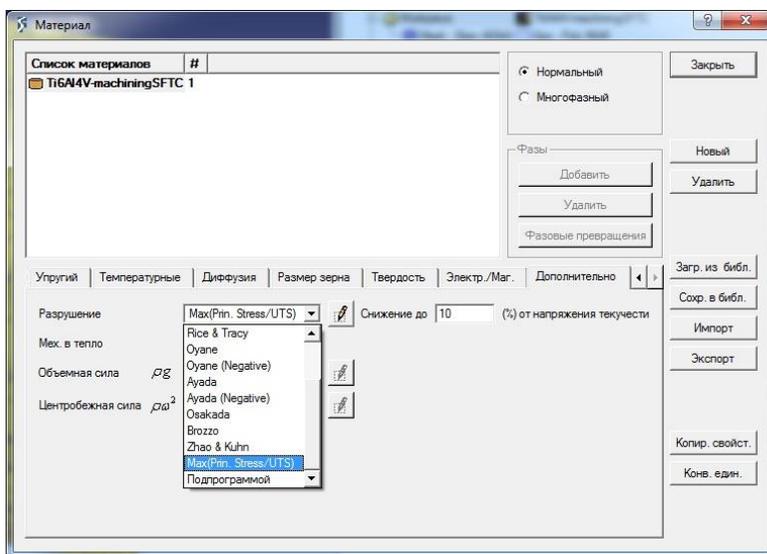


Рис.52 – Редактирование параметров материала

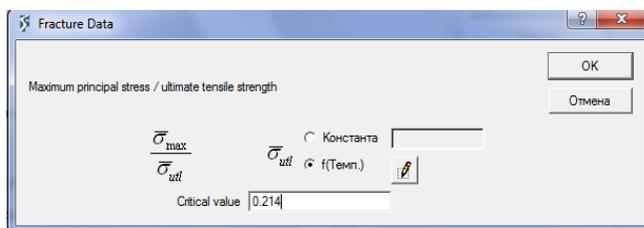


Рис.53 – Ввод критерия разрушения

Предел текучести для данного материала выбираем как функцию от температуры при скорости деформации  $10^4 \text{ с}^{-1}$  (54). Для этого в свойствах материала выводим график распределения напряжения – температура при скоростях деформации  $10^4 \text{ с}^{-1}$  (рис. 55).

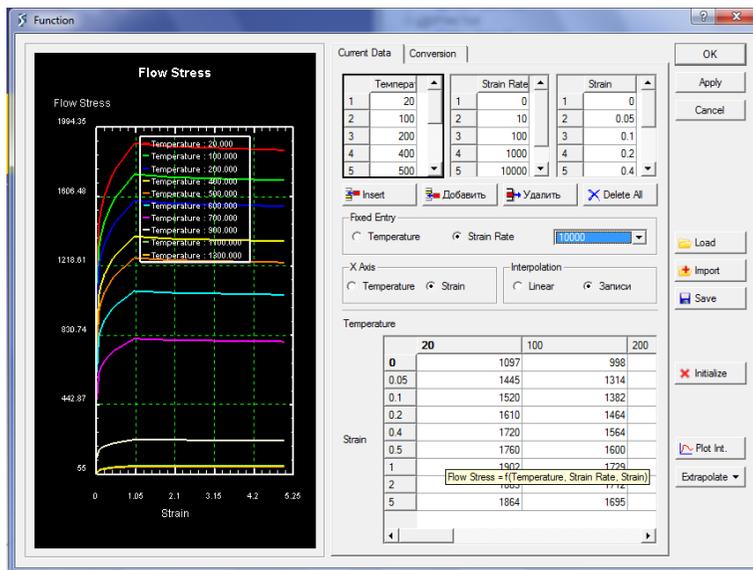


Рис.54 – График распределения напряжения – деформации

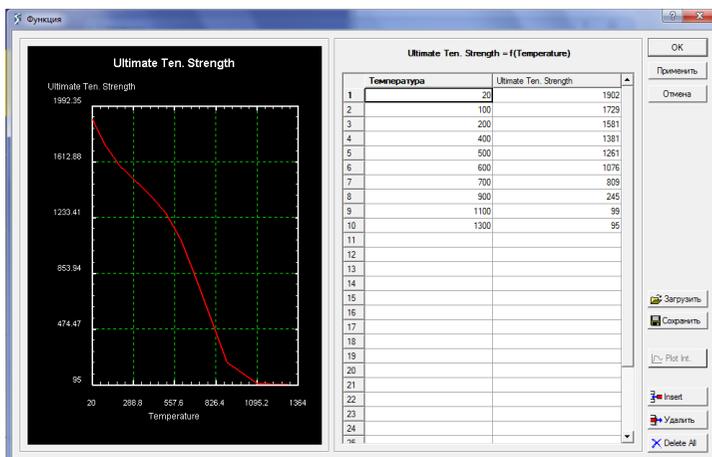


Рис. 55 – График распределения напряжения от температуры

Генерируем базу данных. В диалоговом окне нажимаем Да. Этап препроцессинг закончен.

В интерфейсе программы DEFORMIntegrated 2D3D выбираем сгенерированную базу данных (рис.56) и нажимаем «Начать моделирование». Нажав кнопку «Предв. просмотр» можно отслеживать изменение параметров (напряжений, деформаций, температуры и др.) в реальном времени. Данные по расчету будут отображаться во вкладке «Сообщения». По завершении расчета на экране будет выведено сообщение о нормальной остановке расчета по достижении предельного шага.

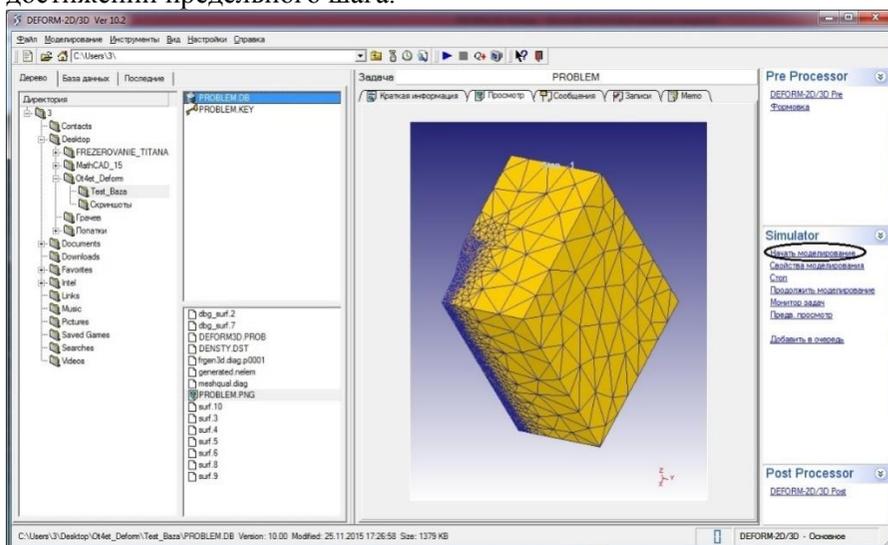


Рис.56 – Запуск симуляции

Постпроцессор. В интерфейсе программы DEFORMIntegrated 2D3D выбираем базу данных. В окне PostProcessor (внизу справа) выбираем DEFORM-2D/3DPost. По результат расчета будет получена прогнозируемая форма стружки, как показано на рис.57.

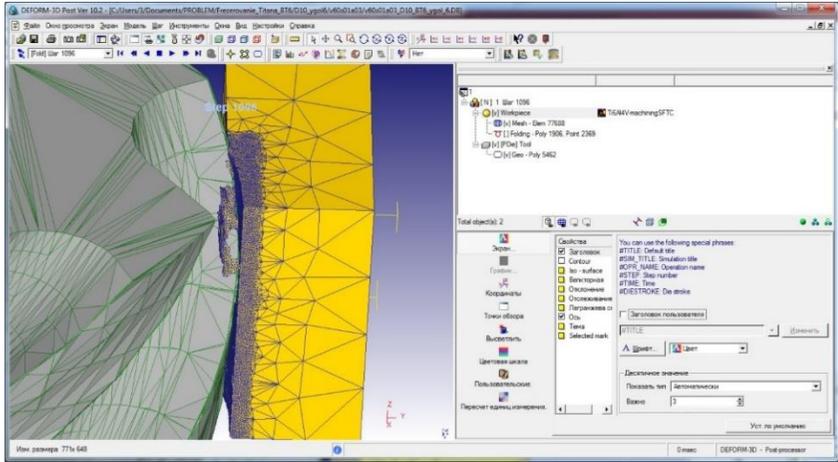


Рис.57 – Результат симуляции обработки

На этапе постпроцессинга нам необходимо вывести результаты усилий резания по трем осям во внешний файл. Для этого нужно на инструментальной панели выбрать значок . В появившемся окне (рис.58) в поле объект оставить подсвеченным Tool. По оси X выбрать Время, а по оси Y – Сила по X. Нажать «Ок».

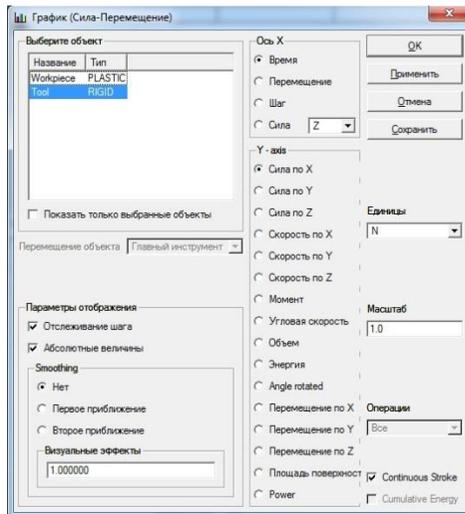


Рис.58 – Вывод графика усилий резания

Результат представлен на рис.57. Кликая правой кнопкой мыши в поле графика выбираем «Экспорт данных шкалы» и сохраняем текстовый файл. Аналогично выводим данные усилий по другим осям, выбирая в поле «Ось Y» (рис.59) «Сила по Y» и «Сила по Z».

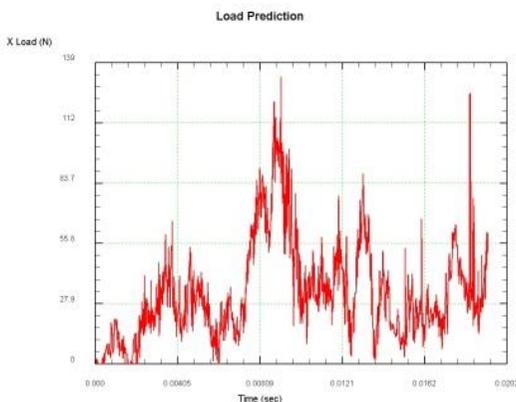


Рис.59 – График изменения составляющей силы резания по оси X во времени

Произведя расчет усилий с помощью пакета Excel, были получены следующие результаты, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Значение усилий резания

	$P_x$ , Н	$P_y$ , Н	$P_z$ , Н	$P_{\Sigma}$ , Н
Данные эксперимента	38,38	44,21	11,2	59,6
Данные 2D моделирования без учета критерия разрушения	44,29	54,36	-	70,12
Данные 2D моделирования с учетом критерия разрушения	27,24	42,69	-	50,64
Данные 3D моделирования с учетом критерия разрушения	36,78	39,54	12,17	55,36

Данные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными и данными 3D моделирования. Погрешность прогнозирования усилия не превышает 10% от экспериментальных данных. Геометрия реальной стружки аналогична геометрии стружки, полученной методом имитационного моделирования. Данные выводы подтверждают адекватность разработанной модели.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с методическими указаниями к лабораторной работе.
2. Ознакомиться с интерфейсом модуля Machining программного продукта DEFORM и его возможностями.
3. В соответствии с заданием, полученным от преподавателя, составить план моделирования.
4. Согласно методическому указанию разработать имитационную модель процесса ортогонального резания. Данные по материалу, режимам резания и критерию разрушения получить у преподавателя.
5. Подтвердить адекватность разработанной модели на основе экспериментальных данных силы резания. Получить графики изменений силы резания от режимов обработки (скорости, подачи и глубины резания) во времени.
6. Получить графики изменений эффективной деформации и уточнить угол условной плоскости сдвига  $\beta_1$ .
7. Согласно методическому указанию разработать имитационную модель процесса резания в ПО DEFORM 3D.
8. Получить имитационную САЕ – модель геометрии стружки и сравнить ее с реальной геометрией стружки, полученной экспериментальным путем.
9. Провести анализ влияния критерия разрушения на точность имитационного моделирования.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Для решения каких задач предназначен программный продукт DEFORM?
2. Перечислить факторы, влияющие на точность расчета имитационной модели.
3. Перечислить критерии разрушения, представленные в интерфейсе ПО DEFORM и дать их краткую характеристику.
4. Описать основные этапы создания имитационной модели в ПО DEFORM 2D.
5. Описать основные этапы создания имитационной модели в ПО DEFORM 3D. Выделить основные различия при создании модели в ПО DEFORM 2D.
6. Перечислить данные необходимы для задания материала.

7. За счет каких факторов происходит уменьшение силы резания при использовании критерия разрушения?
8. Описать методику уточнения условной плоскости сдвига методом имитационного моделирования.
9. Какие модули имеет DEFORMи для чего они предназначены?
10. Описать суть критерия разрушения применительно к процессу бокового фрезерования.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бурмистров Е.В., Самыкин В.Н. Исследование сил резания при точении: Метод. указания к лаб. работе/ сам. аэрокосмич. университет, Самара 1996.- 36 с.
2. В.С. Паршин, А.П. Карамышев, И.И. Некрасов, А.И. Пугин, А.А. Федулов Практическое руководство к программному комплексу DEFORM-3D: учебное пособие /Екатеринбург: УрФУ, 2010.- 266 с.

ОТЧЕТ

по лабораторной работе

Имитационное моделирование процесса разрушения при лезвийной  
обработке в среде DEFORM

1. Исходные данные и результаты эксперимента

Обрабатываемый материал: титан ВТ6

Параметры заготовки Д x В x Г: 40x24x6 (мм)

Режущий инструмент (фреза): d= 10 мм,

№ опы- та	Режимы резания			Экспериментальные данные составляющих силы резания, Н				Данные составляющих силы резания при моделировании, Н			
	v, м/мин	S, мм/об	t, мм	Pz,	Py,	Px,	PΣ,	Pz,	Py,	Px,	PΣ,
Вариант 1											
1	60	0,1	0,3								
2	80	0,1	0,3								
3	100	0,1	0,3								
Вариант 2											
1	60	0,05	0,3								
2	60	0,1	0,3								
3	60	0,2	0,3								
Вариант 3											
1	60	0,1	0,1								
2	60	0,1	0,3								
3	60	0,1	0,5								

2. Уточнение угла условной плоскости сдвига  $\beta_1$

3. Выводы:

4. Индивидуальное занятие (№ вопроса по методическим указаниям к лабораторной работе)

Выполнил студент  
Группа

Проверил

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА  
РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКЕ В СРЕДЕ DEFORM

*Методические указания*

*Составители Хаймович Александр Исаакович  
Алексеев Вячеслав Петрович*

Самарский государственный  
аэрокосмический университет.  
443086, Самара, Московское шоссе, 34.