

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П.КОРОЛЕВА»

**ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛ РЕЗАНИЯ
ПРИ ОРТОГОНАЛЬНОМ ТОЧЕНИИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
И ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
ПЛАСТИЧНОСТИ И РАЗРУШЕНИЯ ДЖОНСОНА-КУКА**

Методические указания к лабораторной работе

САМАРА 2017

УДК 621.91

Составители: *Евдокимов Д.В.*

Рецензент: д.т.н., профессор Н.Д. Проничев

Исследование сил резания при ортогональном точении с использованием метода конечных элементов и феноменологических моделей пластичности и разрушения Джонсона-Кука ÷ метод. указания к лабораторной работе / сост. Евдокимов Д.В. – Самара: Изд-во Самар. ун-та, 2017. – 28 с.

Показано применение компьютерной вычислительной техники для проведения исследований по определению составляющих силы резания при свободном ортогональном точении. Предлагается определять величины составляющих силы резания, используя методику аналитического определения и метод конечных элементов. Методика аналитического определения сил резания использует в своем алгоритме феноменологическую модель пластичности Джонсона-Кука, а компьютерная модель, основанная на методе конечных элементов, использует две феноменологические модели пластичности и разрушения Джонсона-Кука.

Предназначены для проведения лабораторной работы студентам специальности ТКМ 221400.62, ТКМ 160400.62, ТКМ 151600.62, ОКМ 141100.62, ОКМ 160700.65.

Выполнены на кафедре технологий производства двигателей Самарского университета.

УДК 621.91

© Самарский университет, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ.....	3
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ФИЗИКЕ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ	4
2. СХЕМА ДЕЙСТВИЯ СИЛ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ.....	6
3. ВОЗНИКНОВЕНИЕ СИЛЫ $P\tau$ В ЗОНЕ СДВИГА	8
4. КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ.....	9
5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.....	17
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	22
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	23
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	24

Цель работы: ознакомление с принципами работы в инженерных программных пакетах; ознакомление с областью применения конечно-элементных программных пакетов; получение знаний о физике процесса резания.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ФИЗИКЕ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

Процесс механической обработки материалов лезвийным инструментом сопровождается противодействующими силами, знание которых необходимо для выполнения расчетов на прочность, жесткость и виброустойчивость элементов конструкции станков и режущих инструментов.

Кроме того существует подход к оценке действующей температуры в зоне резания при точении, основывающийся на знании величин плотностей тепловых потоков, определить величины которых возможно при условии известных величин составляющих силы резания. Как известно, на формирование состояния поверхностного слоя деталей оказывают влияние силовой и температурный факторы. Причем, если температура в зоне резания достигает значений, соответствующих значениям критических точек аллотропических превращений в поверхностном слое материале заготовки, то влияние температуры на формирование поверхностного слоя существенно возрастает.

Схема сил, действующих в процессе токарной обработки, приведена на рис. 1.

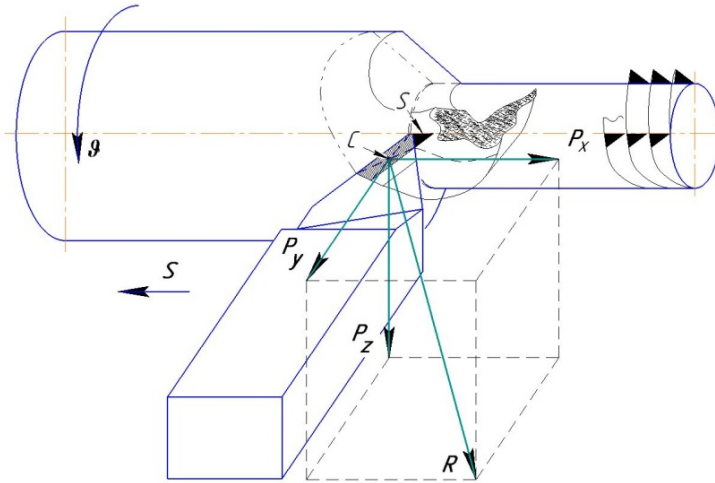


Рис. 1. Схема сил при точении

Сила R представляет здесь равнодействующую силу резания, которую можно разложить на три составляющие: P_z – тангенциальную, действующую в плоскости резания в направлении главного движения; P_x – осевую, действующую вдоль оси заготовки в направлении, противоположном направлению подачи; P_y – радиальную, действующую перпендикулярно плоскости, образованной векторами сил P_z и P_x в направлении от заготовки на резец.

Величина равнодействующей силы R может быть выражена через ее составляющие:

$$R = \sqrt{P_z^2 + P_y^2 + P_x^2}.$$

Сила P_z определяет крутящий момент и нагружает коробку скоростей станка и резец. Сила P_y определяет отжим резца от заготовки и прогиб самой заготовки. Сила P_x нагружает механизм подачи станка и резец.

2. СХЕМА ДЕЙСТВИЯ СИЛ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ

Теперь рассмотрим схему действия составляющих силы резания, показанную на рисунке 2.

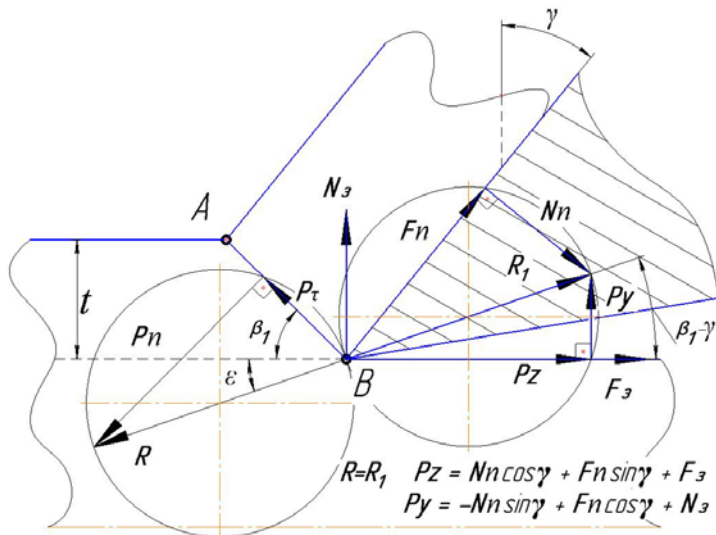


Рис. 2. Распределение сил в зоне резания

При концевом фрезеровании в плоскости сдвига (скалывания) AB , расположенной под углом β_1 к плоскости резания, действует сила сдвига P_τ , а перпендикулярно ей нормальная сила P_n . Равнодействующей этих двух сил является сила R , а её реакцией, направленной в режущий клин – сила R_1 . Определение равнодействующей R сводится к формуле

$$R = \sqrt{P_\tau^2 + P_n^2}.$$

Окружность, описывающая вектора P_n , R , P_τ , называется круговой диаграммой Юджина Мейранта (M. Eugene Merchant). Благодаря данному представлению схемы действия составляющих силы резания,

сила трения стружки о переднюю поверхность режущего клина F_n и нормальная сила N_n могут быть легко определены. Также просто возможно определить составляющие силы резания по осям Z, Y (P_z, P_y). Однако представленная схема действия составляющих силы резания справедлива только для ортогонального точения. Кроме этого схема предполагает случай идеального режущего клина, не имеющего скругления на кромке и площадки контакта по задней поверхности с заготовкой. То есть схема не учитывает действия силы упруго-пластического взаимодействия задней поверхности режущего клина с заготовкой N_3 и силу трения задней поверхности режущего клина с заготовкой F_3 . Таким образом, определение сил P_z и P_y может быть сведено к следующим формулам:

$$P_z = N_n \cdot \cos \gamma + F_n \cdot \sin \gamma + F_3,$$

$$P_y = -N_n \cdot \sin \gamma + F_n \cdot \cos \gamma + N_3.$$

Исходя из рекомендаций, опубликованных в работе [8] А.Н. Резниковым, силу упруго-пластического взаимодействия задней поверхности режущего клина с заготовкой N_3 допускается принимать равной силе трения задней поверхности режущего клина с заготовкой F_3 . В той же работе, вычисление силы трения F_3 предложено вычислять по следующей зависимости:

$$F_3 \approx 0,252 \cdot \sigma_B \cdot b \cdot l_3,$$

где σ_B – предел прочности обрабатываемого материала, b – ширина срезаемого слоя, l_3 – длина участка контакта задней поверхности режущего клина с заготовкой. Из приведенной формулы произведение $b \cdot l_3$ обозначает собой площадь контакта задней поверхности режущего клина с заготовкой.

3. ВОЗНИКНОВЕНИЕ СИЛЫ P_τ В ЗОНЕ СДВИГА

Схема распределения сил, показанная на рисунке 2 справедлива для модели зоны сдвига, представленной в виде прямоугольной плоскости, имеющей грани равные по длине AB и b . В данной плоскости возникают касательные напряжения $\tau_{сд}$, определяющие величину силы P_τ , которая может быть представлена в виде формулы:

$$P_\tau = AB \cdot b \cdot \tau_{сд}.$$

Тогда согласно работе [2] определение сил P_z и P_y , без учета сил N_3 и F_3 следует проводить с помощью следующих зависимостей:

$$P_z = \frac{P_\tau \cdot \cos(\beta_\mu - \gamma)}{\cos(\beta_1 + \beta_\mu - \gamma)},$$
$$P_y = \frac{P_\tau \cdot \sin(\beta_\mu - \gamma)}{\cos(\beta_1 + \beta_\mu - \gamma)},$$

где β_μ – угол действия силы давления, необходимого для преодоления силы трения. Для определения данного угла рекомендуется пользоваться зависимостью, выведенной Эмре Озлу (Emre Özlü), Аланом Молинари (Alain Molinari) и Эрханом Будак (Erhan Budak)

$$\tan(\beta_\mu) = \frac{\tau_{сд}}{P_o} \left[1 + \xi \left(1 - \left(\frac{\tau_{сд}}{\mu \cdot P_o} \right)^{\frac{1}{\xi}} \right) \right],$$

где μ – коэффициент трения скольжения для пары инструмент-заготовка, ξ – экспоненциальная постоянная, характеризующая распределение давления (обычно $\xi = 3$), P_o – величина нормального давления, действующая на кромку режущего клина, которая может быть определена по формуле:

$$P_o = 4 \cdot \frac{\xi + 1}{\xi + 2} \cdot \frac{\cos^2 \beta_\mu}{\sin[2(\beta_1 + \beta_\mu - \gamma)]} \cdot \tau_{сд}.$$

Угол сдвига β_1 можно определить, используя зависимость из работы [2], а также по формуле А.Н. Резникова [8]:

$$\sin \beta_1 = \frac{\cos \gamma}{\sqrt{k^2 - 2k \sin \gamma + 1}}$$

где k – коэффициент усадки стружки.

4. КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ

Модель свободного ортогонального резания выполнена в программе ANSYS. В модуле «Geometry» созданы два виртуальных тела заготовки и режущего клина. Заготовка имеет параметры: высота 5 мм, ширина 2 мм, длина 10 мм. Режущий клин имеет передний угол $\gamma = 12^\circ$, задний угол $\alpha = 12^\circ$, ширина режущего клина 4 мм, а радиус скругления режущей кромки составляет 0,025 мм. С целью корректного разбиения режущего клина на конечные элементы, скруглены оставшиеся две кромки с радиусом 0,25 мм. Модуль Geometry имеет связь с модулем «Explicit Dynamic», где режущему клину задается движение со скоростью v . Во всех других направлениях резец лишен возможности перемещения, ровно, как и лишен возможности вращения вокруг всех возможных осей.

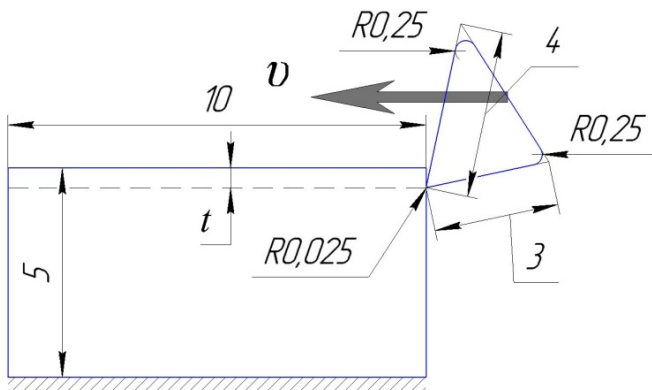


Рис. 3. Кинематическая схема компьютерной модели

Заготовка зафиксирована согласно рисунку 3. Режущий клин выставлен на глубину резания t .

Структура модели и этапы

Компьютерная модель разработана под обработку алюминиевого сплава Д16 (дюралюминий). Режущий клин представляет собой идеально твердое тело. Поведение материала заготовки задано с помощью моделей эластичности, пластичности и модели разрушения. Модель пластичности и модель разрушения представлены уравнениями Джонсона-Кука двух видов (“Johnson-Cook flow stress model” и “Johnson-Cook Fracture Model”).

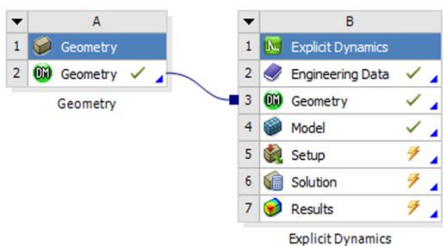


Рис. 4. Структура модели ANSYS

Для запуска компьютерной модели необходимо запустить программу ANSYS Workbench и в открывшемся окне слева в верхнем углу нажать «File» далее «Open...» и выбрать файл согласно той глубине резания, которая указана в варианте:

«Cut_Forces_047.wbpj» (0,47 мм) или «Cut_Forces_100.wbpj» (1 мм). После чего откроется структурное дерево модели (рисунок 4).

Если два раза кликнуть на «Engineering Data», то откроется библиотека материалов. В ней присутствуют два материала «Aluminum» и «Steel» (не путать с «Structural Steel»), которые определяют свойства виртуальных геометрий. Если нажать на какой либо из этих материалов, то откроется таблица «Properties of Outline Row», где материал имеет свое описание. Пример для материала «Structural steel» приведен на рисунке 5.

Outline of Schematic A2: Engineering Data				
	A	B	C	D
1	Contents of Engineering Data			Description
2	Material			
3	Structural Steel			Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material			

Properties of Outline Row 3: Structural Steel				
	A	B	C	D
1	Property	Value	Unit	
2	Density	7850	kg m ⁻³	
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
6	Isotropic Elasticity			
12	Alternating Stress Mean Stress	Tabular		
16	Strain-Life Parameters			

Рис. 5. Кинематическая схема компьютерной модели

Материалы «Aluminum» и «Steel» имеют следующую структуру в своем описании (строки в таблице «Properties of Outline Row»):

- 1) Density (плотность материала).
- 2) Isotropic Elasticity (модель эластичности).

Модель состоит из модуля Юнга, коэффициента Пуассона, объемного модуля упругости, жесткости при сдвиге.

- 3) Johnson Cook Strength (модель пластичности)

Модель представлена в виде феноменологической зависимости Джонсона-Кука:

$$\sigma_o = \left[A + B(\dot{\varepsilon}^P)^n \right] \cdot \left[1 + C \log \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_o} \right) \right] \cdot (1 - \hat{T}^m), \quad (1)$$

$$\hat{T} = \begin{cases} 0 & \text{при } T < T_c \\ \frac{T - T_c}{T_{nl} - T_c} & \text{при } T_c \leq T \leq T_{nl} \\ 1 & \text{при } T > T_{nl} \end{cases},$$

где σ_o – напряжения пластического течения материала; ε^P – эквивалентная пластическая деформация; $\dot{\varepsilon}^P$ – скорость пластической деформации материала; $\dot{\varepsilon}$ – справочная скорость пластической деформации (обычно, перед тем как определять коэффициенты зависимости (1), данное значение принимается равным $1c^{-1}$), что упрощает вычисление напряжений пластического течения по уравнению (1); T_c – справочная температура (принимается обычно равной комнатной температуре); T_{nl} – температура плавления обрабатываемого материала; A – предел текучести материала, соответствующий справочным скоростям деформации и температуры; B – модуль деформационного упрочнения; n – показатель степени деформационного упрочнения; m – экспонента термопластичности; C – показатель чувствительности к скорости деформирования.

4) Johnson Cook Failure (модель разрушения)

Модель представлена в виде феноменологической зависимости Джонсона-Кука:

$$\bar{\varepsilon}_f = \left[D_1 + D_2 \exp \left(D_3 \cdot \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} \right) \right] \cdot \left[1 + D_4 \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_o} \right) \right] \cdot (1 + D_5 \hat{T}),$$

где σ_m является средней величиной по трем главным напряжениям, $\bar{\sigma}$ – эквивалентные напряжения, полученные по критерию пластич-

ности фон Мизеса, ε_f – эквивалентная деформация при разрушении, а D_i – это коэффициенты, получаемые по результату экспериментов.

Далее необходимо с помощью двойного клика перейти в модуль «Explicit Dynamic», нажав пару раз на «Model» (Рисунок 4). Для того, что вернуться из «Engineering Data» к виду, что на рисунке 4, необходимо нажать на вкладку «Project», что указана на рисунке 6

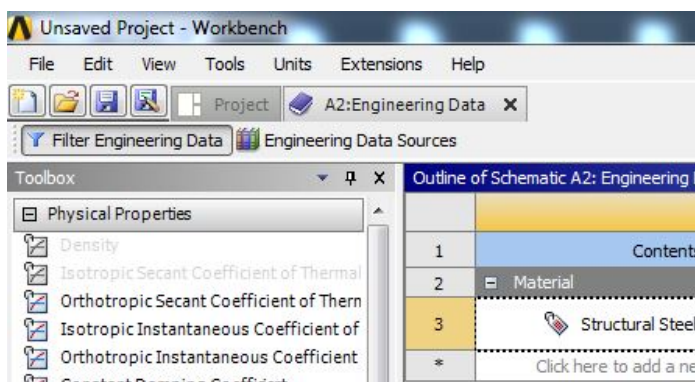


Рис. 6. Вкладки «Project» и «Engineering Data»

В структуре модели «Model» присутствует вкладка «Geometry» и если нажать слева от нее на «+», то откроются геометрические компоненты системы. Например, «Cutter» (геометрия режущего клина) и «Workpiece» (геометрия заготовки), так как показано на рисунке 7

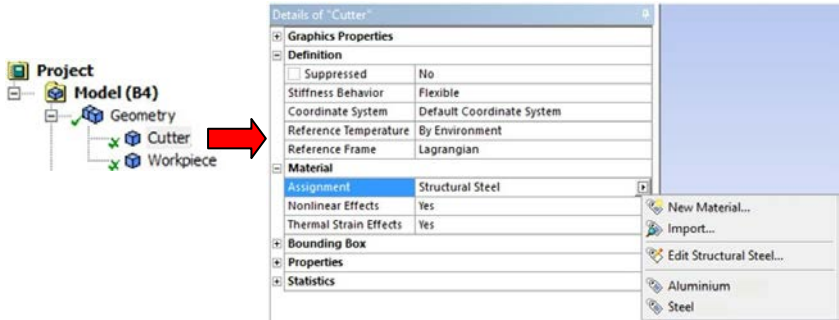


Рис. 7. Таблица Details of Cutter

На том же рисунке указано, что если нажать в дереве, к примеру, на «Cutter», то внизу слева можно будет видеть таблицу «Details of Cutter», где в разделе «Assignment» выбирается материал выделенного элемента. Для «Workpiece» должен быть установлен материал «Aluminium». Вследствие того, что для режущего клина изменена настройка «Flexible» на «Rigid» (строка «Stiffness Behavior»), что обозначает неподверженность режущего клина деформации, выбирать материал для «Cutter» будет излишним. Но при проведении исследований, модель предусматривает возможность выбора для режущего клина материала «Steel».

Далее в дереве раскрывается «Connections», «Contacts», «Body Interactions», так как показано на рисунке 8.

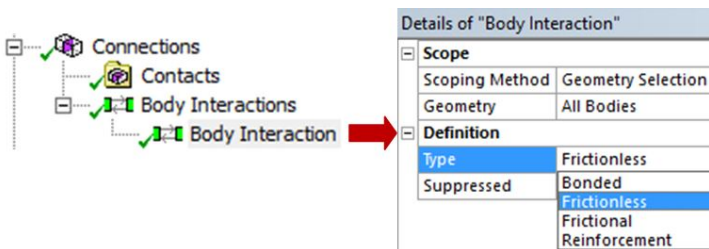



Рис. 8. Таблица Details of Body Interaction

В разделе «Body Interaction» возможно изменить настройку по умолчанию «Frictionless» на «Frictional» и задать коэффициент трения. Последнее действие вводит в учет при расчете силу трения, возникающую при контакте режущего клина с разрушенными элементами (передняя поверхность клина и стружка, задняя поверхность клина и заготовка). Но в рамках лабораторной работы, с целью экономии расчетного времени, делать этого не рекомендуется.

Если нажать на иконку  Mesh, все в той же структуре «Model» то внизу слева откроется таблица «Details of Mesh», где после открытия строки «Sizing» в строке «Element Size» можно задать размер конечного элемента для всех виртуальных объектов. Выбирая «Sizing» в «Mesh Control», внизу слева откроется таблица «Details of Sizing». Там возможно указать, плоскость или тело и задать в строке «Element Size» размер конечного элемента для выбранной геометрии. Таким образом было выполнено создание грубой сетки для режущего клина, с целью экономии расчетного времени. В рамках лабораторной работы вносить изменения в сетку конечных элементов не рекомендуется. Стоит отметить, что при проведении полноценного исследования рекомендуется, чтобы по толщине стружки было распределено не менее пяти конечных элементов.

Для того, чтобы задать время протекания процесса, необходимо в дереве нажать на «Analysis settings» и в открывшейся таблице внизу слева «Details of Analysis settings» необходимо в строке «End Time» указать это время. Для нашей модели необходимо время подобрать так, чтобы режущий клин успел пройти ориентировочно 5-7 мм, для того, чтобы процесс резания считался более-менее установившемся с точки зрения возникающих сил в зоне резания (температурный фактор в модели не учитывается). Чем больше время, тем дольше расчет и, чтобы успеть за занятие выполнить лабораторную работу, приходится

отходить от рекомендуемых настроек модели. При скоростях резания, предусмотренных в данной работе, следует установить время из диапазона 0,004 – 0,008 с. Из-за того, что скорость расчета зависит от мощности компьютера, на котором он выполняется, может возникнуть ситуация, в которой для того чтобы уложиться в график выполнения лабораторной работы, необходимо будет прервать расчет. Осуществить это возможно, нажав на «Stop Solution» в окне прогресса. На саму возможность получения графиков сил P_z и P_y это не повлияет.

Следующая строка в дереве «Velocity», нажав на нее, внизу слева откроется таблица «Details of Velocity», где по X, Y, или Z координате необходимо задать скорость движения режущего клина (скорость резания). Необходимо записать скорость таким образом, чтобы вектор скорости был направлен в сторону заготовки и был перпендикулярен режущей кромки резца. Пример показан на рисунке 9.

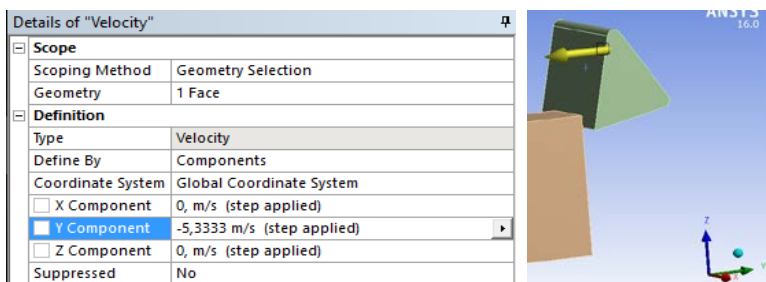


Рис. 9. Окно ввода скорости резания

Следующая строка в дереве «Fixed Support», нажав на нее, необходимо проверить, что зафиксирована именно та поверхность заготовки, что указана на рисунке 3.

Далее в дереве нажимается строка «Solution» и слева от строки «+» меняется нажатием на «-». Таким же образом раскрывается строка «Solution Information». Под данной строкой откроются две других

«Contact Force» и «Contact Force 2». Внесение данных элементов в структуру модели необходимо для записи контактных сил, действующих на режущий клин в процессе резания. Для каждой из этих строк необходимо удостовериться, нажав на них и открыв внизу слева сперва таблицу «Details of Contact Force», затем «Details of Contact Force 2», что в строке «Orientation» в «Details of Contact Force» указана одна из осей, перпендикулярных режущей кромке, соответственно для второй таблицы «Details of Contact Force 2», в строке «Orientation» должна быть указана вторая ось. В строке «Geometry», что в одной таблице, что в другой, должен быть указан режущий клин. Пример можно увидеть на рисунке 10.

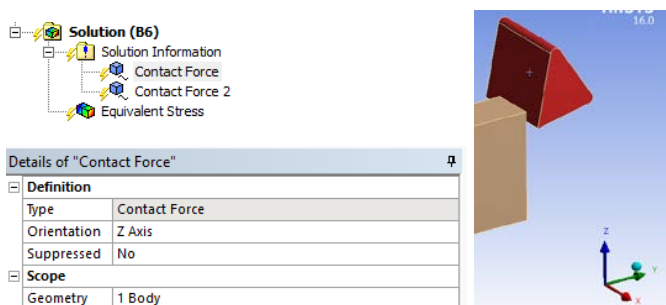


Рис. 10. Окно настроек трекера сил

Запуск на расчет выполняется с помощью кнопки  Solve .

5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Этап первый:

1) Запускается компьютерная модель, согласно той глубине резания, что указана в варианте («Cut_Forces_047.wbpj» (0,47 мм) или «Cut_Forces_100.wbpj» (1 мм)).

- 2) Проверяется структура компьютерной модели и правильность настроек, согласно описанной выше инструкции.
- 3) Согласно варианту устанавливается скорость резания.
- 4) Выполняется запуск на расчет.

Этап второй:

В то время, пока ведется расчет необходимо ориентировочно оценить величину сил P_z и P_y по тем аналитическим зависимостям, что приведены выше. Согласно схеме, представленной на рисунке 2, необходимо учесть силы, возникающие на задней поверхности режущего клина $P'_y = P_y + N_3$, $P'_z = P_z + F_3$. Подсчет величины касательных напряжений предлагается провести с помощью компьютерной программы, выполненной в «MathCad» (запустить файл «Shear_Stress.xmcd» и задать согласно варианту значения оборотов шпинделя, глубины срезаемого слоя и коэффициента усадки стружки).

Этап третий:

Полученные графики изменения составляющих силы резания в процессе прохождения режущим клином участка заготовки необходимо проанализировать и записать в бланк установившиеся величины составляющих силы резания P_z и P_y .

Для того, чтобы отобразить полученный график изменения сил P_z и P_y следует выполнить следующие действия:

- 1) Открыть блокнот, в нем «файл», далее «открыть». В проводнике указать путь до файла «file.nlh», который расположен в .../Cut_Forces_047(или 100)_files/dp0/SYS/MECH. После того как информация откроется в блокноте, необходимо все выделить (CTRL+A) и скопировать (CTRL+C).
- 2) Открыть Excel и вставить таблицу данных (CTRL+V). Зачастую подобная таблица имеет большое количество строк, по этому, при построении графика, необходимо выбрать каждое тысячное или двухты-

сячное число (возможны и другие варианты шага). Для этого нужно выполнить следующие действия:

Выделить всю таблицу данных в Excel (CTRL+A). Далее во вкладке «Главная» найти и нажать на «Условное форматирование». После чего выбрать «Создать правило», где для строки «Использовать формулу для определения форматируемых ячеек» вписать в строку «Изменить описание правила:» следующее «=ОСТАТ(СТРОКА();2000)» (число 2000 в строке будет обозначать каждую 2000ю строку). Ниже, все там же, открыть «Формат» и во вкладке «Заливка» выбрать, например, красный цвет. Далее окно «Создание правила форматирования» закрывается и во вкладке «Главная» нужно нажать «Сортировка и фильтр», где выбирается «Фильтр». После чего над каждой колонкой данных появляется стрелка. Нажать следует на любую, далее «Фильтр по цвету», «нет заливки».

Левый столбец имеет данные времени, столбец, что по середине, имеет данные по силе P_y , а третий, правый столбец имеет данные по силе P_z .

Пример результатов съема результатов по графикам сил P_y и P_z показан на рисунке 11.

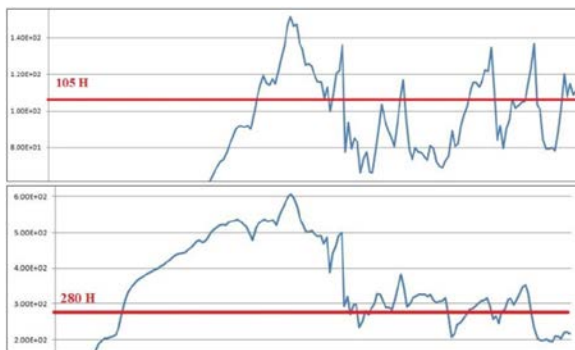


Рис. 11. Графики сил P_y и P_z

Пример отображения расчета, с распределенными по виртуальным телам полями напряжений, возможно видеть на рисунке 12.

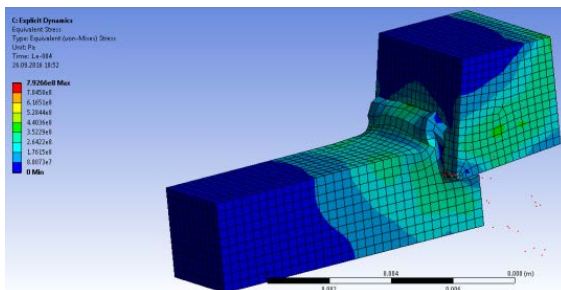


Рис. 12. Поля напряжений в виртуальной системе

На рисунке демонстрируется то качество визуальной схожести с реальным процессом резания, которое возможно достичь путем уменьшения размера конечных элементов виртуальных тел и как следствие увеличением времени, необходимого для расчета.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Для чего рассчитывать величину силы резания? На что она влияет?
2. Как повлияет увеличение площади зоны сдвига на величину силы резания?
3. Какие силы действуют в зоне резания?
4. Какие преимущества предоставляет виртуальный эксперимент перед реальным?
5. Каким образом влияет величина конечных элементов на точность вычислений?

6. Какие данные необходимо определить для материала, чтобы провести симуляцию процесса резания?
7. Какие дополнительные силы возникают при рассмотрении режущего клина, который имеет площадку контакта с заготовкой по задней поверхности?
8. Какие параметры влияют на время вычисления?
9. Что представляет собой сила F_n ?
10. Что представляет собой сила N_3 ?
11. Что представляет собой сила F_3 ?
12. Почему данная модель не предусматривает определение P_x ?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кравченко, Б. А. и К. Ф. Митряев. Обработка и выносливость высокопрочных материалов. – Куйбышев: Куйбышевское книжное издательство, 1968. – 132 с.
2. Zhongtao, F., Y. Wenyu, W. Xuelin and L. Jürgen. Analytical modelling of milling forces for helical end milling based on a predictive machining theory // *Procedia CIRP*, 2015. – V. 31. – P. 258-263.
3. Majzoobi, G. H., F. Freshteh-Saniee, S. Faraj et al. Determination of materials parameters under dynamic loading. Part I: Experiments and simulations // *Computational Materials Science*, 2010. – V. 49. – Is. 2. – P. 192-200.
4. Shrot, A. and M. Bäker. Determination of Johnson-Cook parameters from machining simulations // *Computational Materials Science*, 2012. – V. 52. – Is. 1. – P. 298-304.
5. Šlais, M., I. Dohnal and M. Forejt. Determination of Johnson-Cook equation parameters // *Acta Metallurgica Slovaca*, 2012. – V. 18. – No. 2-3. – P. 125-132.
6. Rajendran, R., M. Venkateshwarlu, V. Petley and S. Verma. Strain hardening exponents and strength coefficients for aeroengine isotropic metallic materials – a reverse engineering approach // *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 2014. – V. 23. – Is. 3-4. – P. 47-128.
7. Ozel, T. and Y. Karpat. Identification of constitutive material model parameters for high-strain rate metal cutting conditions using evolutionary computational algorithms // *Materials and manufacturing processes*, 2007. – V. 22. – Is. 5. – P. 659-667.
8. Резников А. Н. Теплофизика резания. – М.: Машиностроение, 1969. – 288 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ
ДЛЯ РАСЧЕТА СОСТАВЛЯЮЩИХ СИЛЫ РЕЗАНИЯ

№ вар.	t , мм	n , Об/мин	d , мм	k	b , мм	σ_B , МПа	l_3 , мм	μ	γ
1	0,47	50	96	0,9	2	400	0,1	0,6	12
2	0,47	63	96	0,9	2	400	0,1	0,6	12
3	0,47	80	96	0,9	2	400	0,1	0,6	12
4	0,47	100	96	0,9	2	400	0,1	0,6	12
5	0,47	125	96	1,3	2	400	0,1	0,6	12
6	0,47	160	96	0,9	2	400	0,1	0,6	12
7	0,47	200	96	1,1	2	400	0,1	0,6	12
8	0,47	250	96	1	2	400	0,1	0,6	12
9	1	50	96	1	2	400	0,1	0,6	12
10	1	63	96	1	2	400	0,1	0,6	12
11	1	80	96	1	2	400	0,1	0,6	12
12	1	100	96	1,1	2	400	0,1	0,6	12
13	1	125	96	1,2	2	400	0,1	0,6	12
14	1	160	96	1,3	2	400	0,1	0,6	12
15	1	200	96	1,4	2	400	0,1	0,6	12
16	1	250	96	1,4	2	400	0,1	0,6	12

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
ОБРАЗЕЦ БЛАНКА ОТЧЕТА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Студент _____

Кафедра _____
технологий производства Группа _____ Дата _____
двигателей

О Т Ч Е Т
По лабораторной работе

**ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛ РЕЗАНИЯ
 ПРИ ОРТОГОНАЛЬНОМ ТОЧЕНИИ
 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
 И ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
 ПЛАСТИЧНОСТИ И РАЗРУШЕНИЯ ДЖОНСОНА-КУКА**

1. Исходные данные к выполнению работы

№ вар.	t, мм	n, Об/мин	k,	b, мм	μ	γ	ϑ м/мин	τ _{сд} , МПа

2. Определение величин составляющих силы резания P_z и P_y .

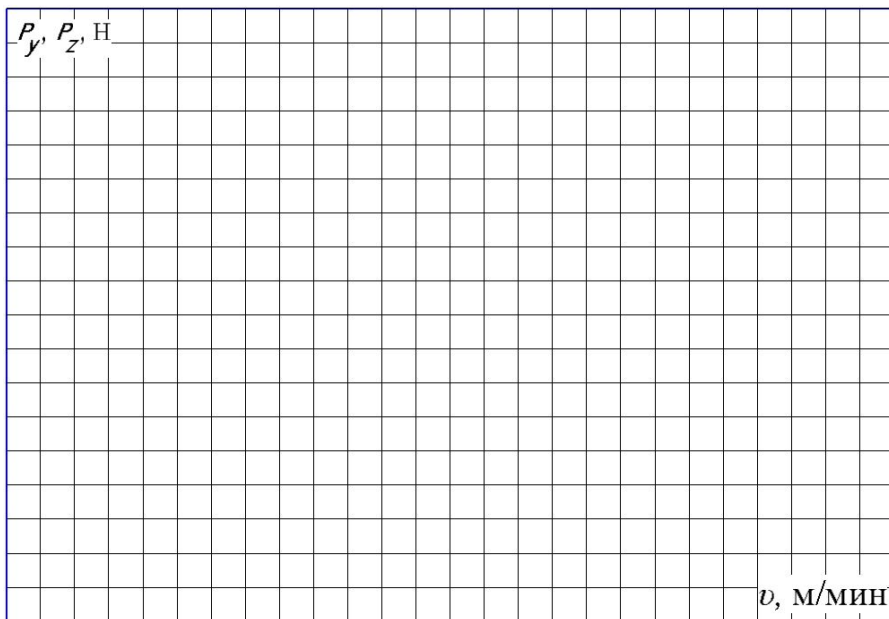
P _τ , Н	β ₁	β _μ	F ₃ , Н	N ₃ , Н	P _y , Н	P _z , Н	P' _y , Н	P' _z , Н

где $P'_y = P_y + N_3$, $P'_z = P_z + F_3$.

3. Результат компьютерного вычисления (при возможности к бланку отчета приложить распечатанные графики сил)

$P_y,$ Н	$P_z,$ Н

4. Ниже необходимо построить графики зависимости составляющих силы резания от скорости резания (используются данные всей группы).



8. Индивидуальное задание

9. Выводы по работе

Преподаватель _____

