



Ссылка на статью:

// Ученые записки УлГУ. Сер. Математика и информационные технологии. УлГУ. Электрон. журн. 2019, № 1, с. 24-34.

Поступила: 29.04.2019

Окончательный вариант: 05.06.2019

© УлГУ

УДК 621.914.7

Оптимизация режимов резания операционной фрезерования на основании данных инженерных расчётов в системе Ansys

Галицков П.И.¹, Гисметулин А.Р.^{1,*}

* gismetulinar@yandex.ru

¹УлГУ, Ульяновск, Россия

В статье представлены результаты моделирования процесса цилиндрического фрезерования с применением концевой фрезы. Оценка пластических деформаций детали на различных режимах обработки деталей.

Рассмотрены модели статики процесса фрезерования в трехмерной постановке задачи на основе конечно-элементного анализа. Прогнозирование результатов взаимодействия инструмента и обрабатываемой заготовки производится с помощью возможностей программного комплекса Ansys. В качестве инструмента была выбрана концевая фреза диаметром 5 мм из быстрорежущей стали, а заготовкой является тонкостенная деталь из Д16.

Полученные результаты численного моделирования используются для определения оптимальных режимов обработки по критерию максимально допустимых значений деформаций детали и режущего инструмента. Режимы резания используются в процессе подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ. Приводится таблица зависимости сил резания от изменяемых режимов резания.

Ключевые слова: концевое фрезерование, силы резания, деформации, моделирование, конечно-элементный анализ, Ansys, тонкостенные детали.

Введение

При обработке тонкостенных деталей под действием силы резания возникают пластические деформации в конструкции детали и упругие деформации инструмента, что существенно снижает точность обработки. Минимизация возникающих деформаций за счёт режимов резания приводит к тому, что увеличивается длительность обработки.

Компьютерное моделирование процессов резания с применением CAE систем позволит определить оптимальные значения режимов резания.

В работе предлагается использовать модули программы Ansys, для моделирования деформаций в детали и режущем инструменте при операции концевой фрезерования тонкостенных деталей из сплава алюминия Д16.

1. Формулировка задач оптимизации

Оптимизация технологических условий обработки деталей включает решение различных технологических, экономических, конструкторских и организационных задач и при проектировании технологического процесса (операции, перехода) оптимизация базируется на ранее накопленном производственном или научно-экспериментальном опыте, систематизированном в виде нормативов, стандартов, рекомендаций [1,2]. Используемые при оптимизации операций резания издания общемашиностроительных нормативов являются довольно грубым приближением к действительности, а оценка рекомендуемых режимов резания лежит в широком доверительном интервале. В связи с этим в решение задач повышения эффективности фрезерования на основе оптимизации параметров технологических операций входит:

- подбор оптимальных величин ширины и глубины фрезерования;
- подбор оптимальной величины подачи;
- оценка величин пластических деформаций детали;
- оценка упругих деформаций инструмента.

2. Определение исходных данных для численного моделирования операции фрезерования в Ansys

На рис.2 приведена схема, используемая в работе [1], поясняющая расчёт толщин срезаемого слоя и сил резания при концевом фрезеровании. На схеме режущая кромка представлена при обработке уступа с шириной B (размер, параллельный оси фрезерования) и глубиной резания t (размер перпендикулярный оси). Кинематическими параметрами являются величины: частота вращения фрезы n , подача S .

Система координат XYZ с началом в точке 2 имеет ось X по направлению оси фрезы, ось Y по направлению радиуса, ось Z по направлению скорости резания.

Режущая кромка зуба, согласно схеме работы [1] разделена на три участка: винтовая кромка 12 с углом наклона к оси ω_0 на цилиндрической части, радиусная кромка 23 с радиусом $r \rightarrow 0$, торцевая кромка 34 под вспомогательным углом в плане φ_1 .

Наибольшая толщина среза на винтовой канавке в точке определяется формулой и графиком на рис.1:

$$a = s_z \sin \psi_0,$$

где: S_z – подача на зуб фрезы, мм/зуб; ψ_0 - угол поворота фрезы.

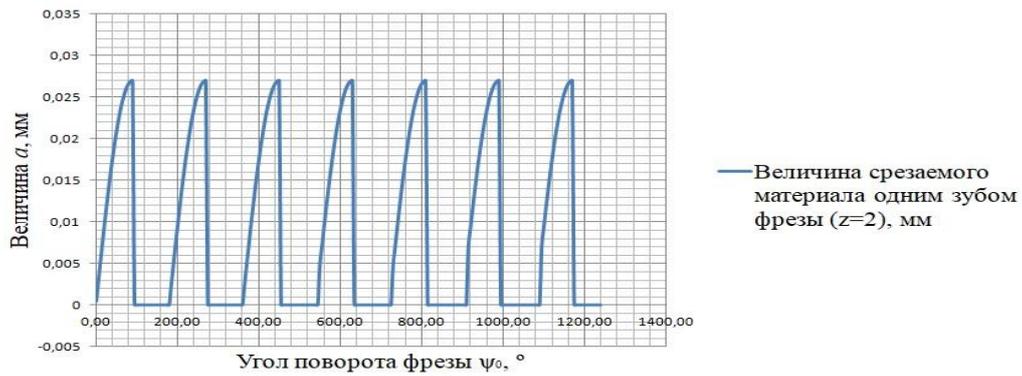


Рис.1. Зависимость между величинами подачи и угла поворота фрезы

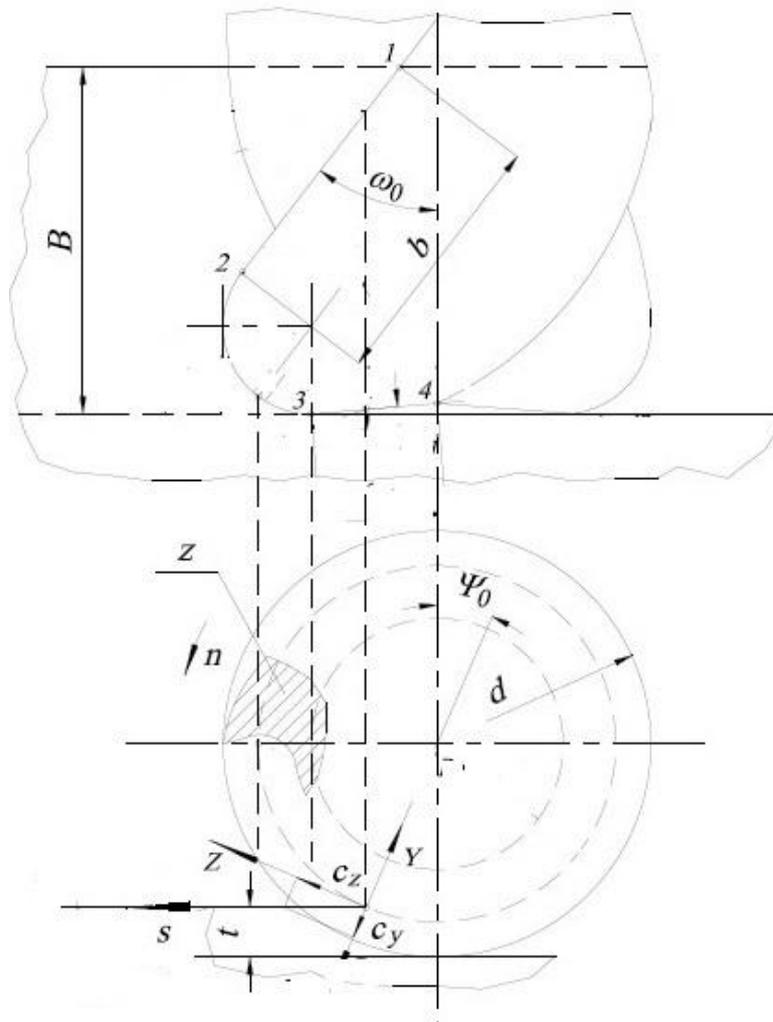


Рис.2. Схема расчёта кинематических параметров и сил резания

Силовые параметры, изображённые на рис.2., по отдельности для каждой режущей кромки, но задача определения сил возникающих при чистовой обработке, допускает рассмотреть величины сил, возникающих на кромке 12, при условии $b \rightarrow B$. [1]

Результирующая сила стружкообразования направлена под углом действия ω к скорости резания и определена через касательную силу в плоскости сдвига P_τ и определяется выражением:

$$R_c = \frac{P_\tau}{\sin(\beta) \cos(\beta + \omega)} = \frac{\tau_p ab}{\sin(\beta) \cos(\beta + \omega)}, \quad (1)$$

где: τ_p - касательные напряжения в плоскости сдвига.

В результате для вычисления касательной и нормальной составляющих силы на передней поверхности инструмента, определяются из геометрических соотношений:

$$F_1 = R_c \sin(\omega + \gamma); P_n = R_c \cos(\omega + \gamma)$$

Составляющие силы стружкообразования для осей Y и Z имеют вид:

$$R_{cz} = R_c \cos \omega; R_{cy} = R_c \sin \omega \quad (2)$$

Используя результаты моделирования в работе [2], принимаем гипотезу, что максимальное значение контактного давления распределяется по всей режущей кромке одинаково, выражая через нормальную силу напряжения и площадь контакта:

$$\sigma_m = \frac{P_n(n_1+1)}{l_1 b}, \quad (3)$$

где: $n_1=1$ – показатель степени выражения для эпюры контактного давления; l_1 – длина контакта стружки.

Максимальное значение контактного напряжения распределяется по длине дуги AB и определяется глубиной подминаемого слоя $h \leq A$. Результирующая сила, действующая по всей длине дуги AB, определяется с помощью $P_m = \sigma_m b \overline{AB}$, которая направлена под углом ψ к оси Y. При разложении результирующей силы вдоль осей Y,Z получаются выражения:

$$P_{mz} = P_m \sin \psi; P_{my} = P_m \cos \psi \quad (4)$$

Нормальная сила P_2 на площадке износа h_z определяется через площадь контакта и контактное давление, а касательная сила F_2 рассчитывается через средний коэффициент трения:

$$P_2 = \sigma_m h_z b; F_2 = P_2 f_{tr} \quad (5)$$

В соответствии со схемой, изображённой на рис. 2 лезвие зуба концевой фрезы оказывает силовое воздействие на обработанную поверхность по площадке износа, равно величиной h_z , по дуге режущей кромки - равномерно-распределённое контактное давление σ_m . Величина этого давления является одним из выходных параметров расчётного алгоритма. Из этого следует, что величина использована для моделирования деформаций тонкостенных деталей.

Результаты расчёта сил резания при концевом фрезеровании представленные на рис. 3 показывают влияния величин ширины и глубины резания на величины действующим на передней поверхности R_{cz} , дуге округления кромки P_{mz} и на задней поверхности зуба фрезы F_2 , которые являются одними из составляющих расчетных параметров является главной (тангенциальной) составляющей силы резания на цилиндрической части, которая определена суммированием по соответствующим направлениям сил:

$$P_{\text{общ}} = R_{cz} + P_{mz} + F_2 \quad (6)$$

Условия расчёта сил резания: подача на зуб 0,008 мм/зуб, ширина фрезерования $B=\{1,5..8\}$ мм, глубина фрезерования $t=\{0,2; 0,3\}$ мм, $n=9000 \text{ мин}^{-1}$, $h_z \rightarrow 0$; цельная быстрорежущая фреза, $d=5$ мм, $z=2$, $\omega_0=35^\circ$.

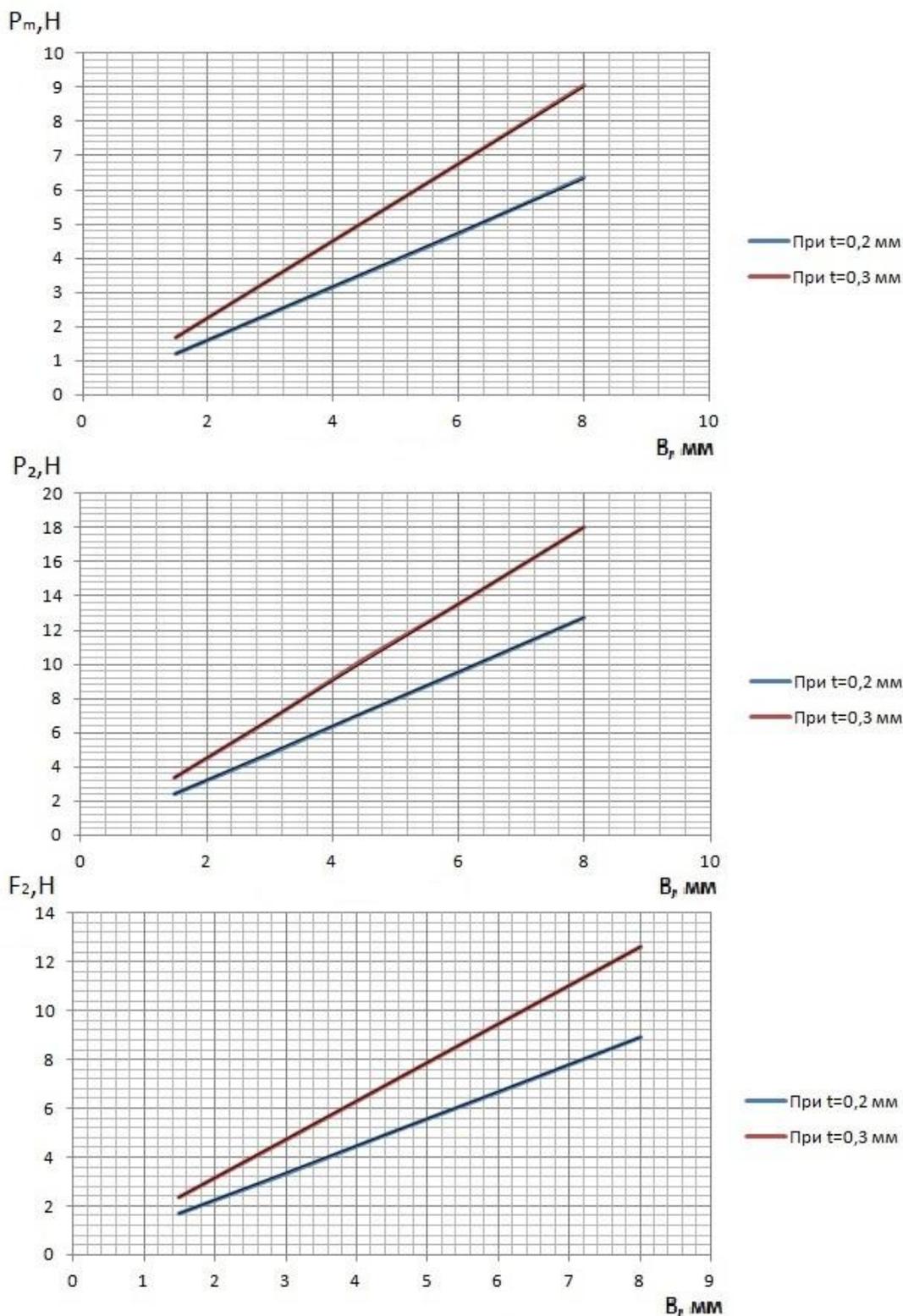


Рис.3. Влияние ширины и глубины фрезерования на силы резания

3. Моделирование процесса деформации заготовки на операции концевого фрезерования

Допустимое упрощение детали, построение сетки для обеспечения снижения времени расчёта представлено на рис.4.

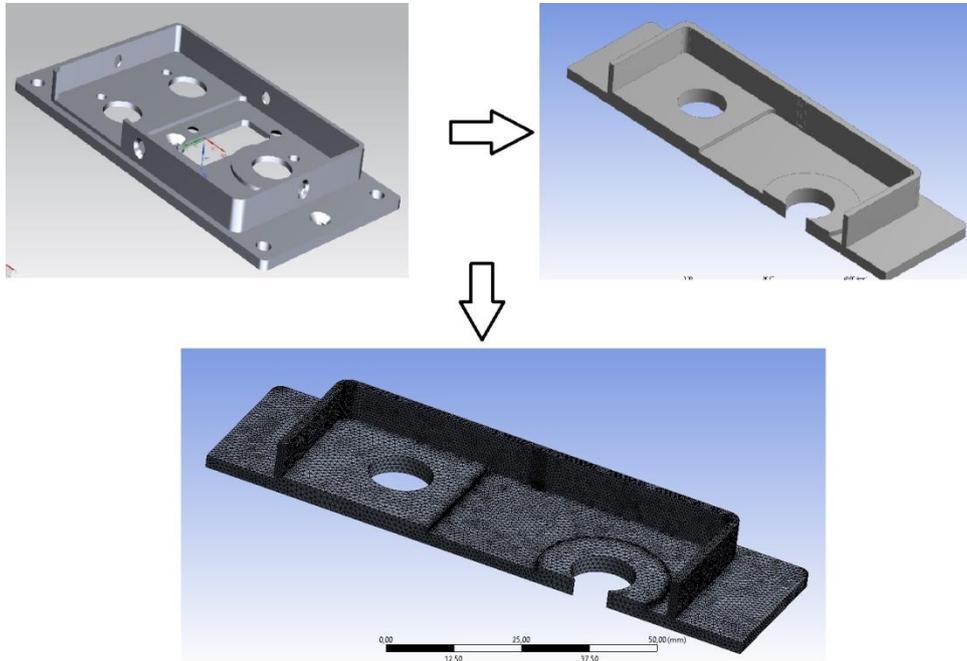


Рис.4. Упрощение геометрии при подготовке к эксперименту

На рис. 5 представлены значения параметров материалов и граничных условий.

	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Density	2780	kg m ⁻³
3	Isotropic Elasticity		
4	Derive from	Young's M...	
5	Young's Modulus	7,31E+10	Pa
6	Poisson's Ratio	0,3	
7	Bulk Modulus	6,091E+10	Pa
8	Shear Modulus	2,811E+10	Pa
9	Field Variables		
10	Temperature	Yes	
11	Shear Angle	No	
12	Degradation Factor	No	
13	Bilinear Isotropic Hardening		
14	Yield Strength	3,1E+08	Pa
15	Tangent Modulus	9E+08	Pa
16	Specific Heat	875	J kg ⁻¹ ...

→

Details View

Details of Import8

Import	Import8
Source	C:\Users\kazim\D1.x_t
Base Plane	YZPlane
Operation	Add Frozen
Solid Bodies	Add Frozen
Surface Bodies	Add Material
Line Bodies	Cut Material
Simplify Geometry	Imprint Faces
Simplify Topology	Slice Material
Clean Bodies	Normal

↓

Details of "Solid"

Graphics Properties

Definition

Suppressed	No
Stiffness Behavior	Flexible
Coordinate System	Default Coordinate System
Reference Temperature	By Environment

Material

Assignment	Aluminum Alloy NL 2
Nonlinear Effects	Yes
Thermal Strain Effects	Yes

Bounding Box

Properties

Statistics

Рис.5. Исходные данные для проведения моделирования

Расчетные значения сил резания по зависимостям (1-5) представлены в таблице 1.

Таблица 1. Исходные данные для моделирования

Номер эксперимента	Величина глубины фрезерования t , мм	Величина ширины фрезерования B , мм	Нормальная сила на дуге округления кромки P_{mz} , Н	Нормальная сила на передней поверхности R_{cz} , Н	Касательная сила на задней поверхности F_2 , Н
1	0,2	1,5	1,19	2,38	1,66
2		3	2,38	4,76	3,33
3		4,5	3,57	7,15	5,05
4		6	4,7	9,53	6,67
5		8	6,35	12,71	8,89
6	0,3	1,5	1,68	3,37	2,36
7		3	3,37	6,75	4,72
8		4,5	5,066	10,31	7,09
9		6	6,75	13,51	9,45
10		8	9,05	18,05	12,61

Занесение сил резания прикладываемых к срезу слою определяется по вектору направления каждой из сил. В результате формируется вектор результирующей силы, см. рис. 6.

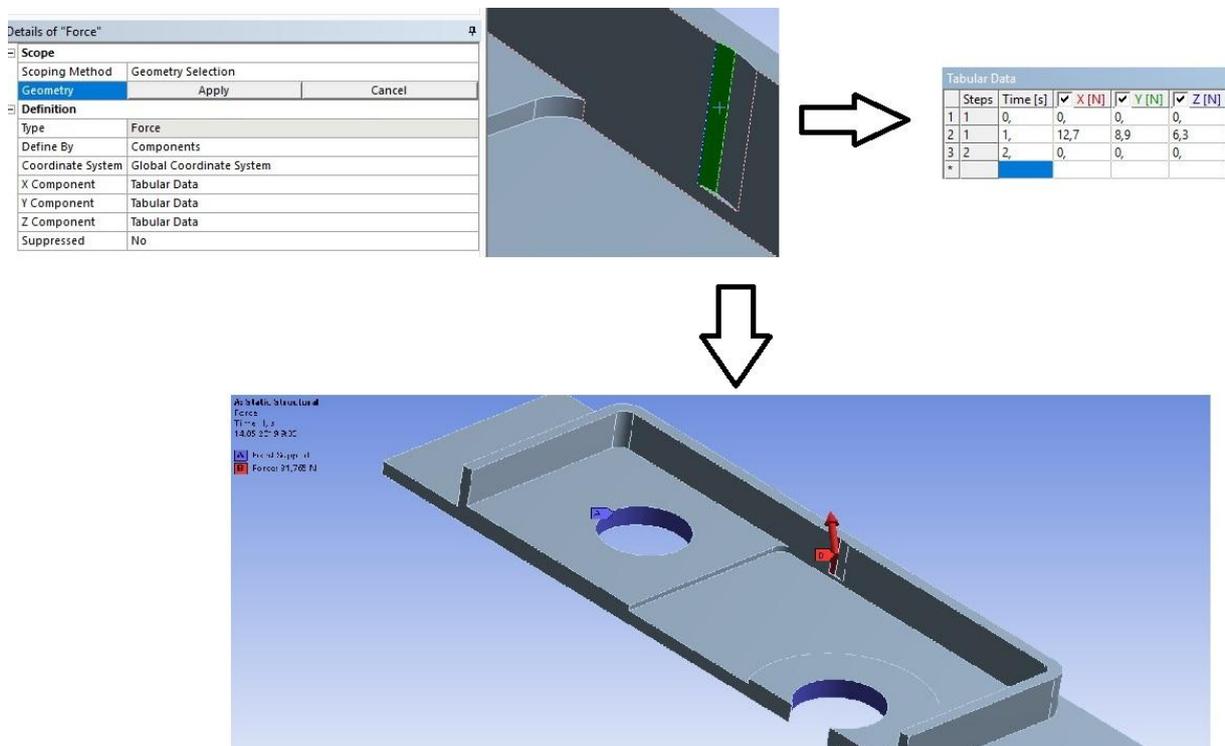


Рис. 6. Задание точек крепления детали и действия силы резания

Расчёт деформаций показал, что величины деформаций в некоторых случаях превышают условный предел текучести алюминиевого сплава Д16. Это приводит к пластическим деформациям, см. рис. 7.

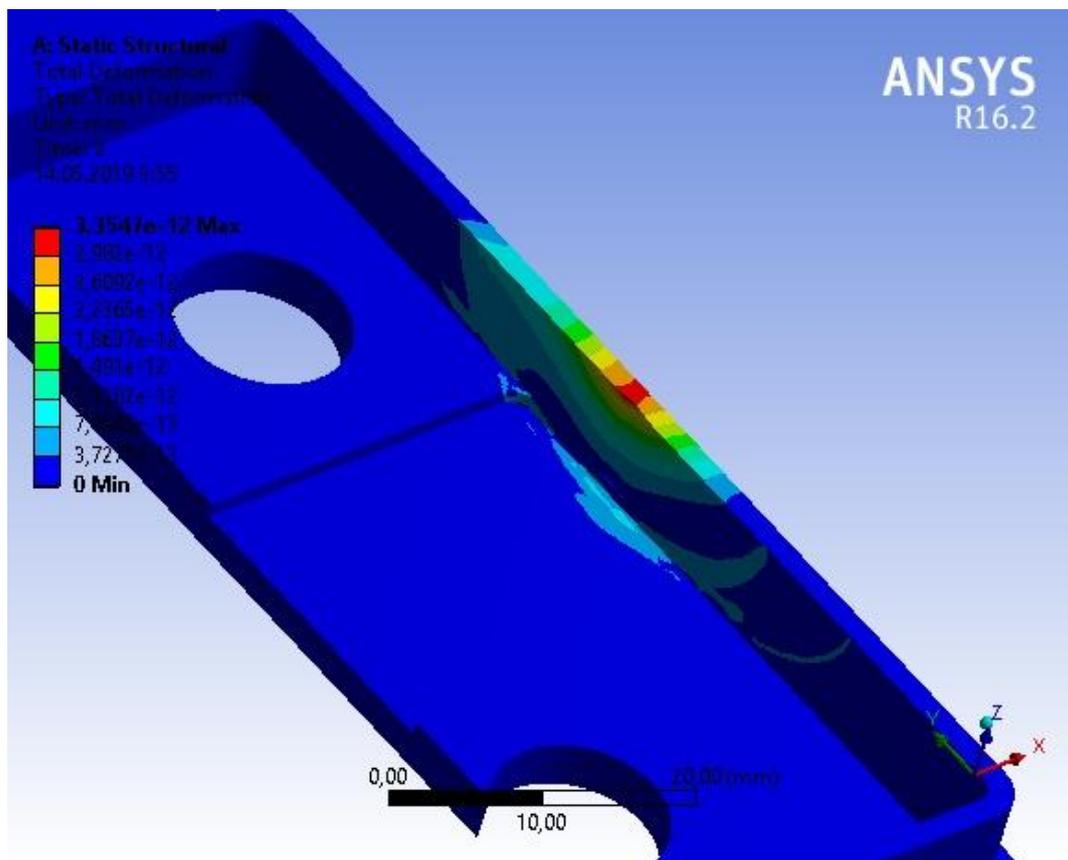


Рис. 7. Величины деформаций стенки детали в процессе резания

Результаты компьютерного моделирования были занесены в таблицу 2, в которой дополнительно приведены расчетные и экспериментальные величины упругих деформаций.

Таблица 2. Результаты компьютерного, математического и натурального экспериментов

Номер эксперимента	Сила резания $P_{\text{общ}}$, Н	Максимальная величина деформаций Δ при компьютерном эксперименте, мм	Максимальная величина деформаций Δ при математическом эксперименте, мм	Максимальная величина деформаций Δ при натуральном эксперименте, мм
1	3,163	0,00495	0,005181	0,00505
2	6,27	0,00967	0,010363	0,01002
3	9,45	0,014368	0,01544	0,014667

4	12,54	0,01982	0,02072	0,01997
5	16,76	0,0265	0,02763	0,02589
6	4,44	0,00725	0,00734	0,00841
7	8,89	0,01324	0,01468	0,00142
8	13,49	0,02001	0,02202	0,024
9	17,81	0,03152	0,02937	0,03514
10	23,806	0,041554	0,03916	0,04701

4. Моделирование процесса упругих деформаций режущего инструмента

Для оценки погрешности обработки вызываемой деформацией режущего инструмента проведены исследования влияние сил резания и обрабатываемой заготовки на величину упругих деформаций инструмента.

Исходные данные влияния инструментального материала представлены на рис. 8.

Properties of Outline Row 3: Tool			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	 Density	8800	kg m ⁻³ ▾
3	 Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
6	 Isotropic Elasticity		
7	Derive from	Young's M... ▾	
8	Young's Modulus	2,3E+05	MPa ▾
9	Poisson's Ratio	0,3	

Рис.8. Свойства быстрорежущей стали

На рис. 9 и 10 представлены схемы нагружения режущего инструмента и результаты расчетов величин упругих деформаций.

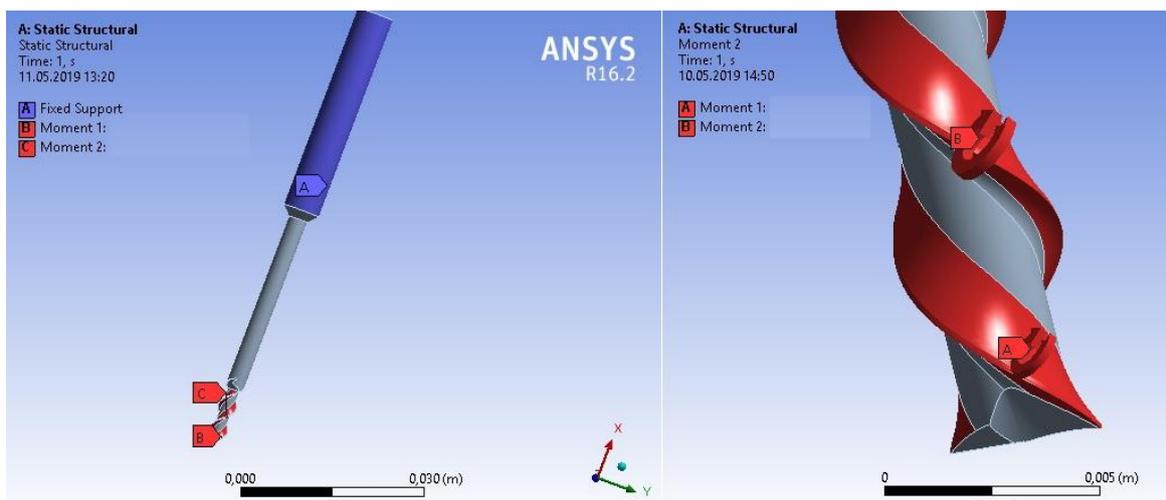


Рис.9. Схема закрепления и нагружения фрезы

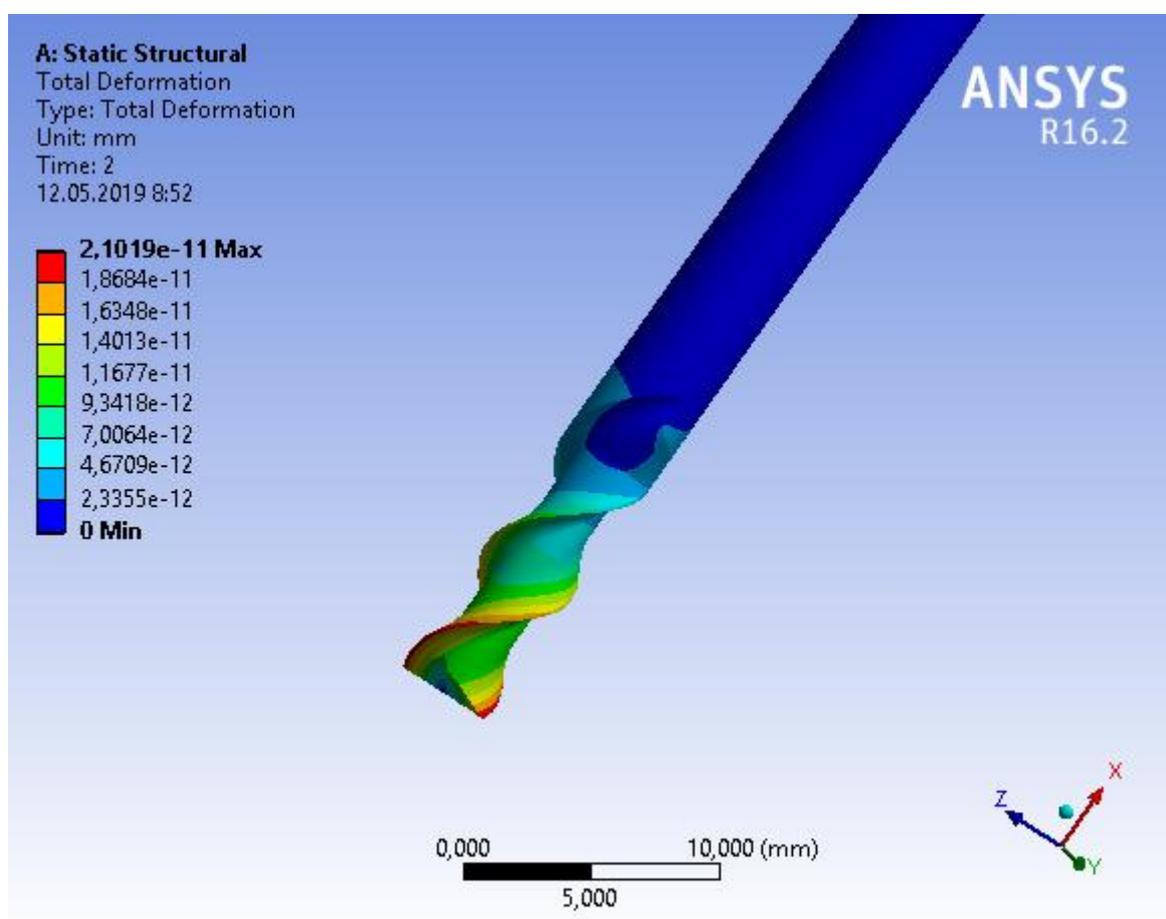


Рис.10. Схема распределения неупругих деформаций на режущей части концевой фрезы

В таблице 3 представлены результаты расчетов упругих деформаций режущего инструмента в зависимости величины подачи на зуб.

Таблица 3. Результаты компьютерного эксперимента

Номер эксперимента	Величина подачи S_z , мм/зуб	Момент силы резания M_{T2} , Н·мм	Величина упругих деформаций Δ , мм
1	0,027	0,031	0,00224
2	0,04	0,042	0,00235
3	0,0525	0,051	0,002431
4	0,065	0,059	0,002531
5	0,027	0,031	0,00224

Заключение

Разработана методика расчёта сил при фрезеровании концевыми фрезами тонкостенных деталей из дюралюминия марки Д16.

Полученная математическая модель позволяет определять допустимые значения пластических деформаций обрабатываемой детали и упругих деформаций режущего инструмента. Получены зависимости влияния режимов резания на точность обрабатываемой детали, которые позволяют определять их оптимальные значения по критериям деформации детали и режущего инструмента и требуемой точности обработки.

Список литературы

1. Грубый С.В., Зайцев А.М. Обоснование условий фрезерования карманов в корпусных деталях из алюминиевых сплавов// *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*. Электрон. журн. Режим доступа: <http://engineering-science.ru/doc/709770.html> (дата обращения 19.02.2019).
2. Старков В.К. *Физика и оптимизация резания материалов*. М.: Машиностроение, 2009.