

УДК 621.91.01

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ЗАГОТОВКИ В ПРОЦЕССЕ ФРЕЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

© 2011 М.А. Болотов, А.Н. Жидяев, А.В. Кузнецов, О.С. Сурков, Д.Е. Яшин

Самарский государственный аэрокосмический университет

Поступила в редакцию 16.11.2010

Выполнено исследование зависимости деформаций при обработке заготовки при её консольном закреплении при изменении скорости обработки, подачи инструмента и припуска на обработку.

Ключевые слова: механическая обработка, сила резания, деформация.

В процессах механической обработки важным вопросом является точность. Исследовались и продолжают исследоваться вопросы о погрешностях обработки и путях повышения точности. Одной из причин, вызывающих погрешности геометрических параметров деталей, являются деформации упругой технологической системы. В аэрокосмической технике детали изготавливаются тонкостенными и ажурными [1], что обуславливает их низкую жесткость и соответственно большие деформации при обработке.

Деформации могут быть вызваны усилиями закрепления деталей, действующими силами резания и т.д. В данной работе будут рассматриваться деформации от усилий резания. В результате деформаций после обработки поверхность детали будет иметь отклонение профиля, ориентировочно равное величине деформации при обработке.

Разные виды механической обработки можно охарактеризовать разными схемами действия сил резания. Например, при точении цилиндрических поверхностей действующая сила колеблется незначительно и может быть принята постоянной. При фрезеровании (при съеме металла одним зубом) сила возрастает от 0 до наибольшего значения, а затем снова падает до 0. Происходит так называемое импульсное воздействие. При рассмотрении шлифования одним зерном, также происходит импульсное воздействие силы на деталь. Однако это воздействие

Болотов Михаил Александрович, аспирант, инженер кафедры производства двигателей летательных аппаратов. E-mail: maikl_bol@rambler.ru.

Жидяев Алексей Николаевич, аспирант, инженер кафедры производства двигателей летательных аппаратов. E-mail: bududai@mail.ru.

Кузнецов Антон Владимирович, аспирант, инженер кафедры производства двигателей летательных аппаратов. Сурков Олег Станиславович, кандидат технических наук, доцент кафедры производства двигателей летательных аппаратов. E-mail: pdla@ssau.ru.

Яшин Дмитрий Евгеньевич, студент факультета двигателей летательных аппаратов.

сглаживается, т.к. в контакте находится большое количество абразивных зерен.

Далее в работе будем рассматривать процессы фрезерования маложестких деталей. Для этого нужно будет определить как значение силы резания, так и график изменения её во времени.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ РЕЗАНИЯ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ

Силы резания могут быть определены экспериментальным путем или рассчитаны с помощью аналитических зависимостей. В данной работе сила резания определялась только аналитически. Методики расчета или экспериментальные зависимости можно найти в разных источниках [2, 3]. Предлагаются различные адаптированные модели для расчета сил резания [4, 5, 7].

Рассмотрим схему изменения силы резания при фрезеровании, которая основывается на исследованиях [2].

Сила резания изменяется согласно графику, изображенному на рис. 1. Кривая изменения

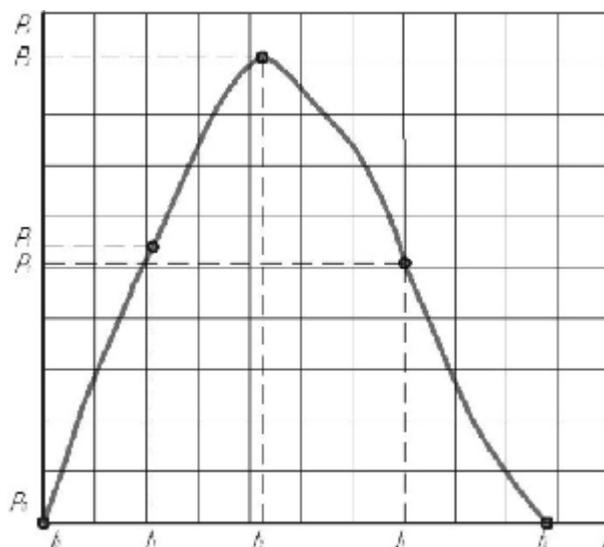


Рис. 1. Схема изменения силы резания при контакте фрезы одним зубом

силы резания разбивается на линейные участки интервалами времени $(t_0; t_1) = (t_1; t_2)$, $(t_2; t_3) = (t_3; t_4)$. Сила резания равна нулю в начальный момент времени t_0 , когда начинается контакт зуба с материалом. Потом происходит возрастание на двух линейных участках до максимума, максимум силы приходится на время t_2 , которое выбирается согласно [2]. Затем сила убывает на двух линейных участках и сводится к нулю в момент времени t_4 , когда фреза выходит из контакта с заготовкой.

Ниже приведен пример расчета силы для различных режимов резания, на основании которого в дальнейшем будет произведена оценка влияния V_c, f_z , а на деформацию заготовки. Так при оценке влияния одного из параметров два других будут оставаться неизменными.

Обороты шпинделя

$$n = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi D}, [\text{об/мин}];$$

Период одного оборота фрезы

$$T = \frac{60}{n}, [\text{сек}];$$

Угол контакта фрезы с заготовкой

$$\omega = 21,994^\circ;$$

Время контакта фрезы с заготовкой

$$\tau = \frac{T \cdot \omega}{360} [\text{сек}];$$

Скорость подачи

$$V_f = n \cdot f_z \cdot z, [\text{мм/мин}];$$

Потребляемая мощность

$$N_e = \frac{a_p a_e v_f}{60000000 \cdot \eta} \cdot k_c,$$

где $k_c = \frac{1 - 0,01\gamma_0}{h_m^{mc}} \cdot k_{c1.1}$ – удельная сила резания;

$\gamma_0 = 30^\circ$ – эффективный угол резания;

$mc = 0,21$ – показатель степени для стали 30ХГСА;

$k_{c1.1} = 1700 \text{ Н/мм}^2$ – удельная сила резания для стали 30ХГСА;

h_m – средняя толщина стружки.

$$h_m = f_z \sqrt{\frac{a_e}{D}} \cdot \sin K_r, [\text{мм}].$$

Сила резания может быть определена следующим образом:

$$P_z = \frac{60 \cdot N_e}{V_c}, [\text{Н}].$$

Следует отметить, что в вышеперечисленной методике при изменении скорости резания не происходит соответствующего изменения силы резания, в связи со структурой расчетных формул, что не полностью отражает физическую суть процесса. В работе сила резания будет рассчитана с помощью данных формул и уточнена в процессе проведения эксперимента.

ПРОВЕДЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проведения исследований необходимо выбрать параметры обрабатываемой детали и режущего инструмента, схему базирования, схему обработки, исследуемые точки, режимы обработки. Для исследования была выбрана пластина с высотой 83 мм, шириной 38 мм, глубиной 5 мм. Материал детали – сталь 30ХГСА. Для обработки выбрана сферическая, концевая, твердосплавная, двузубая фреза с износостойким покрытием диаметром 8 мм.

Схема базирования заготовки на фрезерном станке приведена на рис. 2.

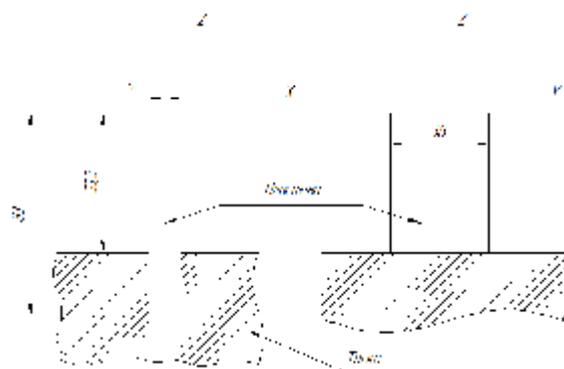


Рис. 2. Схема базирования заготовки

На рис. 3 приведены координаты и номера исследуемых точек. Точки расположены симметрично относительно краев заготовки, через каждые 5

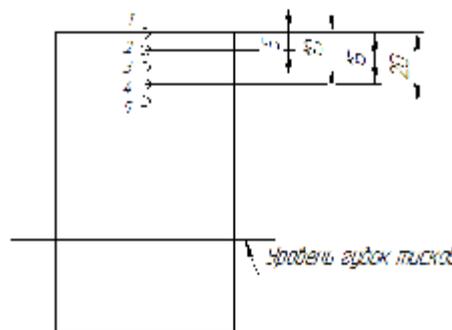


Рис. 3. Расположение исследуемых точек

Таблица 1. Податливость и жесткость пластины и исследуемых точках

	Номер точки				
	точка 1	точка 2	точка 3	точка 4	точка 5
Податливость пластины, мм/Н	7,13e-07	6,01e-07	5,06e-07	4,17e-07	3,53e-07
Жесткость пластины, Н/мм	1,40e+06	1,66e+06	1,98e+06	2,40e+06	2,83e+06

Таблица 2. Режимы резания для проведения исследований

Номер режима	Кол-во пластин	V, м/мин	n, об/мин	f, мм/зуб	Подача минутная, мм/мин	Припуск, мм
1	2	75	2 995	0,15	899	1
2	2	100	3 994	0,15	1 198	1
3	2	125	4 992	0,15	1 498	1
4	4	150	5 991	0,15	1 797	1
5	2	175	6 989	0,15	2 097	1
6	2	200	7 988	0,15	2 396	1
7	2	150	5 991	0,05	599	1
8	2	150	5 991	0,15	1 797	1
9	2	150	5 991	0,25	2 995	1
10	2	150	5 991	0,3	3 594	1
11	2	150	5 991	0,15	1 797	0,5
12	2	150	5 991	0,15	1 797	1
13	2	150	5 991	0,15	1 797	1,5
14	2	150	5 991	0,15	1 797	2

мм, начиная с наиболее удаленной от губок тисков точки, и лежат на обрабатываемой поверхности.

Для возможности применения результатов исследований необходимо перейти от координат точек к относительным параметрам. В качестве такого параметра может быть использована жесткость пластины. Результаты расчета жесткости пластины приведены в табл. 1.

Далее необходимо определить режимы резания для проведения исследований. Первоначально режимы подбираются по каталогам инструмента [8]. В дальнейшем на этих режимах были проведены исследования непосредственно на станке, которые показали, что данные режимы можно применять при обработке выбранной фрезой.

В номерах опытов с 1 по 6 происходит изменение скорости резания, в номерах с 7 по 10 – изменение подачи на зуб, в номерах с 11 по 14 – изменение припуска на обработку.

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Схема обработки на фрезерном станке приведена на рис. 4. Обработка будет вестись на пяти-

координатном фрезерном обрабатывающем центре Mikron UCP 800 Duo. Наклон обрабатываемой поверхности под углом 5 градусов к оси фрезы возможен за счет поворота осей A и C станка и необходим для исключения контакта ножки фрезы с уже обработанной частью поверхности.

Для обработки заготовок использовались режимы, приведенные в табл. 2. Во втором столбце указано количество пластин, обработанных на данном режиме. Режимы 4, 8 и 12 одинаковые. Из

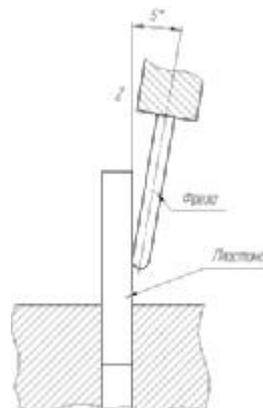


Рис. 4. Схема обработки

таблицы следует, что на этих режимах было обработано 8 пластин. Это необходимо для исследования повторяемости измеренных значений.

Для обработки заготовок использовались режимы, приведенные в табл. 2. Во втором столбце указано количество пластин, обработанных на данном режиме. Режимы 4, 8 и 12 одинаковые. Из таблицы следует, что на этих режимах было обработано 8 пластин. Это необходимо для исследования повторяемости измеренных значений.

Пластины для исследований были вырезаны из одной заготовки на проволочном электроэрозионном станке.

После обработки измерения проводились на к координатно-измерительной машине DEA Global Performance. Были получены координаты точек в двух сечениях (по координатам $Y = 2$ и $Y = -2$ мм, рис. 2) для определения отклонения формы профиля. По этим точкам было построено осредненное значение, которое соответствует среднему значению по координате $Y = 0$.

СПОСОБЫ ЗАДАНИЯ СИЛЫ РЕЗАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ

Работа [6] посвящена моделированию и оптимизации различных процессов резания. Рассмотрены деформации как детали так и инструмента под действием сил резания, но не рассматривается динамичность приложения силы, например, при фрезеровании.

В расчете использовалось два способа задания силы резания для определения деформации: динамическое нагружение и статическое нагружение. Рассмотрим отличия в способах задания ста-

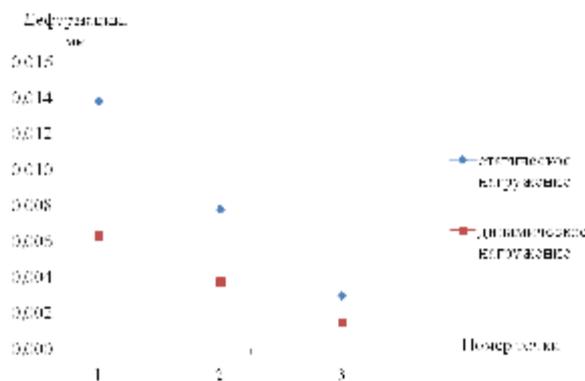


Рис. 5. Сравнение статической и динамической нагрузок

тической и динамической нагрузки, а также сравним деформации, полученные от этих нагрузок.

Для сравнения деформаций приложим статическую и динамическую нагрузки в точках 1, 3, 5, полученные деформации сведем в табл. 3.

По данным табл. 3 построим график для сравнения статической и динамической нагрузок (рис. 5).

Теоретически динамическое приложение нагрузки может увеличить деформации в несколько раз. Из графика видно, что деформации при динамическом нагружении примерно в двое ниже, чем при статическом. Это можно объяснить тем, что время контакта фрезы с заготовкой очень мало и деталь не «успевает» деформироваться. В дальнейших исследованиях будет применяться модель динамического нагружения.

ВЫБОР РАЗМЕРА КОНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА

От выбора размера конечного элемента зависит точность и продолжительность расчета. Для

Таблица 3. Деформации при статическом и динамическом нагружении

Вид нагрузки	Номер точки		
	1	3	5
Статическое нагружение	0,014	0,008	0,003
Динамическое нагружение	0,006	0,004	0,001

Таблица 4. Время расчета и деформации при различных размерах КЭ

Размер, мм	Время расчета	Деформация, мм	Погрешность
2,0	12 сек	6,07e-03	-
1,3	37 сек	6,14e-03	1,14%
1,0	1 мин 29 сек	6,16e-03	0,32%
0,8	4 мин 37 сек	6,18e-03	0,32%
0,7	11 мин 40 сек	6,19e-03	0,16%

выбора оптимального размера конечного элемента проведем небольшое сравнение, будем разбивать пластину сеткой каждый раз с разным размером конечного элемента, постепенно уменьшая размер. При этом сравним время расчета, размер конечного элемента и деформации, получаемые в результате.

Сведем полученные в результате расчетов данные в табл. 4.

Как видно, при разных размерах конечного элемента деформации отличаются друг от друга. Учитывая погрешности измерения деформации, а также длительность расчета при каждом разбиении, сделаем вывод об оптимальном размере конечного элемента.

Целесообразно для данной пластины при разбиении принимать размер конечного элемента 1,3 мм, так как погрешность измерения незначительна, а время расчета сильно сокращается.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ДЕФОРМАЦИЙ ЗАГОТОВОК ПРИ ФРЕЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ

При проведении исследований было обработано 30 пластин на пятикоординатном обрабатывающем центре Mikron UCP 800 Digo на режимах резания из таблицы 2. Сначала было обработано по одной пластине на каждом режиме в порядке, приведенном в таблице. Затем ещё по одной в том же порядке, за исключением режимов 4, 8 и 12, на которых было обработано большее количество пластин. Обработка проходила с вибрациями на нескольких первых пластинах. Следы вибраций заметны по середине высоты пластины. Вибрации также происходили на высоких режимах, например на скорости 200 м/мин, на подаче 0,3 мм/зуб и т.д. Некоторые обработанные пластины приведены на рисунке 6. На обработанной поверхности в нижней части видна зона перехода. Предположительно данная зона появляется из-за различной жесткости заготовки и фрезы. В зоне перехода жесткость фрезы и заготовки становятся равными, ниже жесткость заготовки больше жесткости пластины. По результатам исследований видно, что происходит утолщение пластины, связанное с тем, что возрастают деформации фрезы, т.к. её жесткость меньше, чем у пластины. Выше зоны перехода картина обратная, т.к. жесткость фрезы больше жесткости пластины.

Жесткость фрезы была рассчитана ориентировочно, т.к. известны только приблизительный модуль упругости и коэффициент Пуассона.

Данный вопрос необходимо дополнительно изучать для оценки влияния на погрешность формы обработанной поверхности жесткости детали и инструмента.



Рис. 6. Пластины после обработки

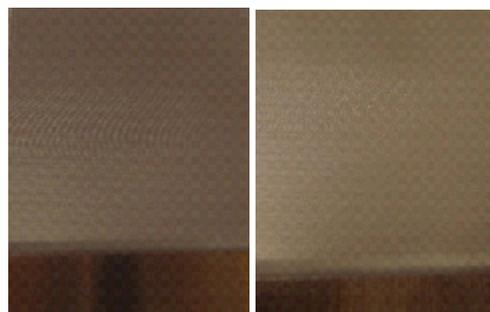


Рис. 7. Следы вибраций на обработанных поверхностях пластин

Для всех пластин были получены графики отклонения от плоскостности, каждый из которых имел большую дисперсию. Это можно объяснить процессами вибрации заготовки и инструмента. Влияние шероховатости и волнистости поверхности на процесс координатного контроля. На рис. 7 видны следы вибраций на обработанных поверхностях двух пластин.

По точкам, полученным на координатно-измерительной машине DEA Global Performance, с помощью программы MathCAD были построены аппроксимированные кривые, наиболее подходящего вида. Повторяемость формы аппроксимированных кривых высокая. Т.о. точно судить об отклонении от плоскостности по точкам, в которых проводились теоретические исследования деформаций, было бы невозможно. Точка 0 находится в корневом сечении пластины, точка 42 – наиболее удалена от места закрепления в приспособлении

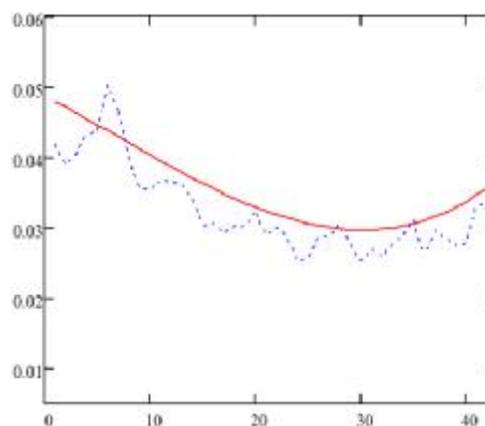


Рис. 8. График отклонения профиля пластины от плоскостности, построенный по точкам и аппроксимированная кривая

на станке. На координатно-измерительной машине измерение проводилось в 42 точках для получения более достоверного профиля обработанной поверхности. График, построенный по точкам (синяя пунктирная линия), и аппроксимированная кривая приведены на рис. 8. На рисунке видно отклонение от плоскости ближе к корневому сечению, вызванное меньшей жесткостью инструмента, по сравнению с жесткостью пластины, что было описано выше. Большее значение отклонения профиля пластины от плоскости соответствует большим деформациям.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ДЕФОРМАЦИЙ ЗАГОТОВОК ОТ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ ПРИ ФРЕЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ

По режимам 1..6 из табл. 2 была рассчитана сила резания по методике описанной выше. Эта методика использовалась для отражения изменения силы резания. Например, при изменении подачи существует прямопропорциональная связь между подачей и силой резания. Сила резания для режима №4 из табл. 2 была определена на основании методики. Далее эта сила уточнялась с помощью экспериментальных данных. При переходе на другие режимы сила корректировалась. Например, при увеличении подачи прямопропорционально возрастала сила резания и наоборот.

Далее в программном комплексе Ansys проводились расчеты деформаций обрабатываемых заготовок под действием силы резания для различных режимов резания.

Графики зависимости деформаций от скорости резания для 5 рассматриваемых точек приведены на рис. 9.

При скоростях 100 м/мин и 125 м/мин имеются локальный максимум и локальный минимум соответственно. Однако деформации при скоро-

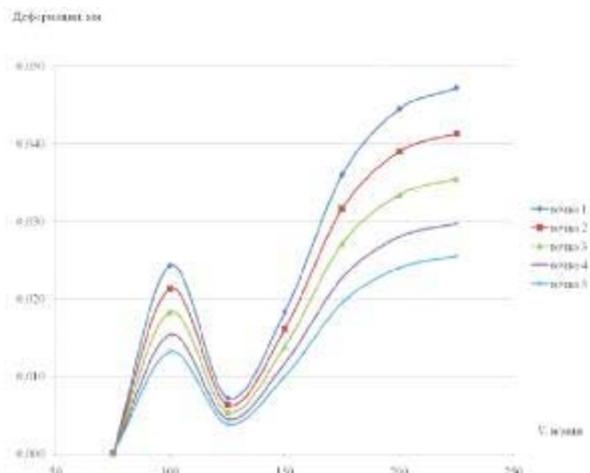


Рис. 9. Зависимость деформаций от скорости резания в пяти исследуемых точках

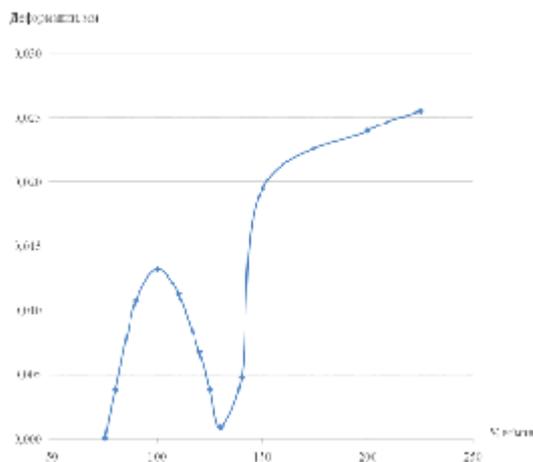


Рис. 10. Зависимость деформаций от скорости резания в точке 5

сти 100 м/мин можно также рассматривать как ошибочно определенные. Проведем расчет по большему количеству значений скоростей резания для более подробного определения зависимости. Результаты такого расчета приведены на рис. 10 для точки 5. График подтверждает, что при скоростях 100 м/мин и 125 м/мин имеются локальный максимум и локальный минимум.

На основании данных зависимостей можно сделать вывод о наиболее производительном режиме при низком уровне деформаций. Может выбран другой более производительный режим, исходя из возможного уровня деформаций заготовок и соответствующего им отклонения профиля.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ДЕФОРМАЦИЙ ЗАГОТОВОК ОТ ПОДАЧИ ПРИ ФРЕЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ

Аналогично были построены зависимости деформаций от изменения подачи на зуб. Графики приведены на рис. 11.

При увеличении подачи вдвое деформации возрастают примерно вдвое. Для снижения уровня деформаций необходимо снижать производительность обработки.

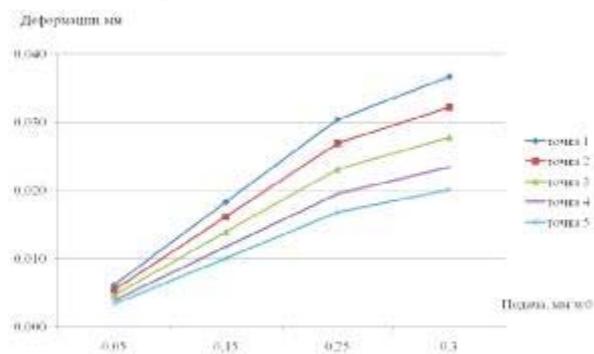


Рис. 11. Зависимость деформаций от подачи в пяти исследуемых точках

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ДЕФОРМАЦИЙ ЗАГОТОВОК ОТБОКОВОГО ПРИПУСКА ПРИ ФРЕЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ

Аналогично были построены зависимости деформаций от изменения припуска на обработку. Графики приведены на рис. 12.

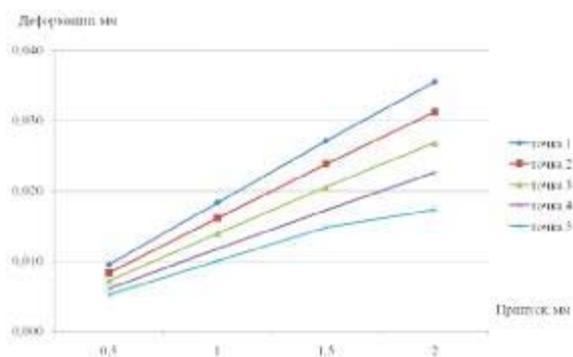


Рис. 12. Зависимость деформаций от припуска в пяти исследуемых точках

При увеличении припуска вдвое деформации возрастают примерно вдвое. Для снижения уровня деформаций необходимо также снижать производительность обработки.

СРАВНЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Сравнение теоретических и экспериментальных данных проводилось для всех пластин и режимов резания из табл. 2. Результаты сравнения для режима №4 приведены на рис. 13. Красная кривая – аппроксимированное отклонение профиля обработанной пластины, точки – значения, полученные с помощью

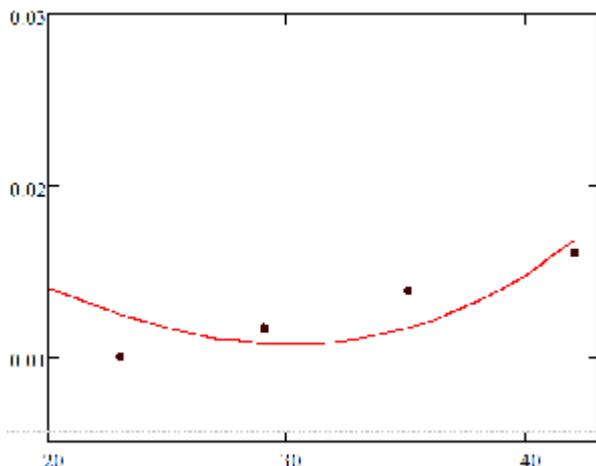


Рис. 13. Сравнение теоретических и экспериментальных данных

Из графика видно, что расхождение между теоретической и экспериментальной кривой составляет порядка 5%, в некоторых точках не более 7%.

Необходимо также отметить, что повторяемость значений отклонений профиля для разных пластин была не высокой, что можно связать с погрешностью базирования при установке на станке и на координатно-измерительной машине. Это также связано с процессами вибрации заготовки и инструмента. В результате появляется не только отклонение профиля, но и волнистость поверхности, а также ухудшается шероховатость. Повторяемость формы профиля для разных пластин – высокая.

ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИССЛЕДОВАНИЙ

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1. При обработке деталей малой жесткости необходимо учитывать возможные деформации от сил резания, который повлияют на точность формы поверхностей детали. Для рассматриваемой пластины деформации при обработке достигали 0,035 мм, например при скорости резания 150 м/мин и подаче 0,3 мм/зуб. При увеличении производительности процесса (что важно для повышения конкурентоспособности) до скорости 200 м/мин и подачи 0,3 мм/зуб деформации будут больше. Учитывать деформации особенно актуально для наиболее точных и ответственных деталей.

2. Реальные деформации могут отличаться от получаемых с помощью модели для определения деформаций. Это может быть вызвано износом фрезы, вибрациями при обработке, а также волнистостью и в меньшей степени шероховатостью обработанной поверхности. По полученным данным расхождение составляет 5...7%.

Данная научно-исследовательская работа проводилась в рамках реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Производство газотурбинных двигателей / Крымов, В.В., Елисеев Ю.С., Зудин К.И. [под ред. В.В. Крымова]. М.: Машиностроение / Машиностроение-Полет, 2002. 376., ил.
2. Стебихов В.И. Исследование физических сторон процесса резания при фрезеровании и шлифовании жаропрочных сплавов: дисс. ... канд. техн. наук. Самара: КуАИ, 1968. 268 с.
3. Волков А.Н. Режимы резания авиационных материалов при фрезеровании: учеб. пособие. Самара: СГАУ, 1994. 90 с.
4. Feng H.Y., Su N. A mechanistic cutting force model for

- 3D ball-end milling / Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2001. №123. Pp. 23-29.
5. Simplified and efficient calibration of a mechanistic cutting force model for ball-end milling / *Abdullahil Azeem, Hsi-Yung Feng, Lihui Wang* // Journal of Machine Tools and Manufacture. 2004. №44. Pp. 291–298
 6. *Пестрецов С.И.* Компьютерное моделирование и оптимизация процессов резания : учеб. пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. 104 с.
 7. Prediction of chatter in NC machining based on a dynamic cutting force model for ball end milling / *Seon-Jae Kima, Han Ul Leeb, Dong-Woo Chob* // International Journal of Machine Tools & Manufacture 47 (2007) 1827-1838
 8. Общий каталог металлорежущего инструмента компании Iscar/ URL: http://www.bs11.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=255:iscar&Itemid=108 (дата обращения 12.10.2010)
 9. *Жарков И.Г.* Вибрации при обработке лезвийным инструментом. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1986. 184 с.

COMPUTER AIDED RESEARCH OF PART DEFORMATIONS WHILE MILLING

© 2011 M.A. Bolotov, A.N. Zhidyayev, A.V. Kuznetsov, O.S. Surkov, D.E. Yashin

Samara State Aerospace University

Calculation research of a part supported as a cantilever deformation dependence from cutting speed, feed per tooth and machining allowance has been carried out.

Key words: mechanical machining, cutting force, deformation.

Michael Bolotov, Postgraduate Student, Engineer at the Aircraft Engine Production Department.

E-mail: maikl_bol@rambler.ru.

Aleksey Zhidyayev, Postgraduate Student, Engineer at the Aircraft Engine Production Department.

E-mail: bududai@mail.ru.

Anton Kuznetsov, Postgraduate Student, Engineer of Aircraft Engine Production Department.

Oleg Surkov, Candidate of Technical Science, Associate Professor at the Aircraft Engine Production Department.

E-mail: pdla@ssau.ru.

Dmitriy Yashin, Student of aircraft engine faculty.