

Моделирование сил резания и определение вибродиагностических признаков дефектов концевых фрез

Д.П. Алейников^{1 a}, А.В. Лукьянов^{2 b}

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова 83, Иркутск, Россия

²Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского 15, Иркутск, Россия

^aaleynikov@istu.edu, ^bloukian@inbox.ru

Статья поступила 29.12.2016, принята 18.01.2017

В статье рассматриваются возможности вибродиагностики цилиндрических фрез в режиме реального времени по результатам спектрального анализа сигналов вибрации. Наиболее подверженный отказам элемент станка — это инструмент, его состояние определяет работоспособность оборудования в целом. Диагностика в реальном времени позволяет избежать поломки инструмента, а значит, предотвратит возможное забраковывание детали и снизить опасные динамические нагрузки на технологическую систему станка. Представлена аналитическая модель расчета проекций сил резания при механообработке цилиндрической фрезой с учетом винтовой линии закручивания (спирали) режущих кромок. Разрабатываемая на основе уравнений сил резания динамическая модель позволяет, с учетом выявленных закономерностей изменений формы силовых импульсов при различных дефектах, создавать временной ряд сигналов для их последующего спектрального анализа, а в дальнейшем и учитывать динамику станка. Показаны возможности получения параметров сил резания за счет применения современного программного обеспечения, позволяющего выполнять конечно-элементное моделирование процесса фрезерования. По результатам спектрального анализа временных сигналов сил резания получены вибродиагностические признаки дефектов инструмента для случаев износа и поломки его режущей кромки. Полученные результаты способствуют увеличению функциональных возможностей систем мониторинга и диагностики станочного оборудования, значительно повышают эффективность работы станков и дают возможность перехода к обслуживанию по фактическому состоянию. Подход может быть распространен на системы мониторинга и диагностики с возможностью адаптивного управления режимами резания.

Ключевые слова: конечно-элементное моделирование фрезерования; моделирование сил резания; дефекты инструмента; вибродиагностика инструмента.

Cutting forces modeling and vibration diagnostics of signs of end mills defects

D.P. Aleynikov^{1 a}, A.V. Lukyanov^{2 b}

¹Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia

²Irkutsk State Transport University, 15, Chernyshevskiy St., Irkutsk, Russia

^aaleynikov@istu.edu, ^bloukian@inbox.ru

Received 29.12.2016, accepted 18.01.2017

The article deals with possibility of vibration diagnostics of end mills in real time. Vibration diagnostics is carried out by spectral analysis of vibration signals. Most affected by failures of the machine element is a tool. Its condition determines the state of health of the whole equipment. Real-time diagnostics allows to avoid breakage of the tool and, thus, prevent possible rejection of the parts and reduce harmful dynamic loads on technological system of the metal working machine. The equations of cutting forces with coefficients of tool defects allow to develop a time series of signals for subsequent spectral analysis and further tool dynamics. The article deals with possibility of obtaining the parameters of the cutting forces through the use of modern software which allows to perform finite element modeling of the milling process. Spectral analysis of the waveform cutting forces made it possible to determine vibrodiagnostic signs of the tool wear defects and damage of its cutting edge. The results allow to increase the functionality of the systems for monitoring and diagnostics of machine tools, significantly increase the efficiency of the machine and make it operate on the actual state. The approach can be extended to monitoring and diagnostic systems with adaptive control of cutting process.

Keywords: finite element modeling of milling; cutting forces modeling; cutting tool defects; tool vibrodiagnostics.

Введение

Особо важным объектом технологической системы станка является инструмент. Разнообразные условия эксплуатации и, следовательно, различная нагрузка на его режущую часть вызывает многообразие дефектов и отказов. Процесс износа режущих пластин концевых

фрез является неизбежным фактором при механической обработке авиационных деталей. На сегодняшний день одним из критериев необходимости замены режущих пластин является параметр стойкости инструмента. Понятие стойкости инструмента связано со временем работы инструмента до критического износа [1–3].

Данный критерий является усредненным и не способен учитывать фактическое состояние оборудования, на котором производится механообработка. Износ режущих кромок, в отличие от других повреждений станков, обязательно приводит к отказу всего технологического оборудования в целом, если не выполняется его предупредительная замена. До 60 % от общего количества отказов станков вызвано износом инструмента [4]. Износ инструмента происходит значительно быстрее износа деталей и узлов станка, является труднопрогнозируемым и описывается комплексом взаимосвязанных процессов пластической деформации, локальных разрушений, возникновения новых поверхностей [5].

Известные методы определения степени износа связаны с необходимостью дополнительных затрат времени на выполнение специальных измерений геометрических параметров режущих кромок [4–6]. Основная задача диагностирования процесса резания и инструмента состоит в своевременном выявлении его предельного состояния для замены и восстановления работоспособности автоматизированных станков и станочных комплексов. Поэтому надежность инструмента как главного элемента, определяющего работоспособное состояние станочного оборудования, изучается не только в комплексе со всеми другими его элементами, но и независимо от них.

При фрезерной обработке возникают периодические импульсы силы резания, возбуждающие колебания системы «инструмент – станок» [7; 8]. Известно, что текущий контроль вибрационных параметров машинного оборудования и диагностика развивающихся дефектов

позволят поэтапно перейти на систему обслуживания и ремонта по фактическому состоянию [9; 10].

В настоящее время активно разрабатываются системы мониторинга и защиты обрабатывающих центров от значительных динамических воздействий, возникающих при обработке. Датчики пространственной вибрации и сил фрезерования в таких системах размещаются на шпинделе в зоне крепления инструмента — фрез [11]. Сигналы вибрации и силы в реальном времени обрабатываются и анализируются в системе виброударозащиты и диагностики мотор-шпинделей станков (СВУЗ ДМШ) [11; 12]. В случае ударных воздействий при превышении некоторого заданного порога уровня вибрации или сил при фрезеровании выдается предупреждение либо производится остановка подачи или станка. При этом возможна диагностика дефектов станка.

В перспективе результаты анализа вибрационных сигналов могут быть использованы при разработке алгоритмов определения предельного состояния инструмента, что позволит эксплуатировать его по фактическому состоянию и сократит время простоя станка для замены инструмента.

В процессе фрезерования режущие кромки инструмента поочередно врезаются в заготовку, создавая при этом импульс силы. При таких видах износа режущих пластин, как выкрашивание, износ по задней поверхности, лунообразование, наросты на режущей кромке, пластическая деформация и термические трещины, происходит изменение параметров воздействующих силовых импульсов [4]. Основные виды износа режущих пластин фрез представлены на рис. 1.

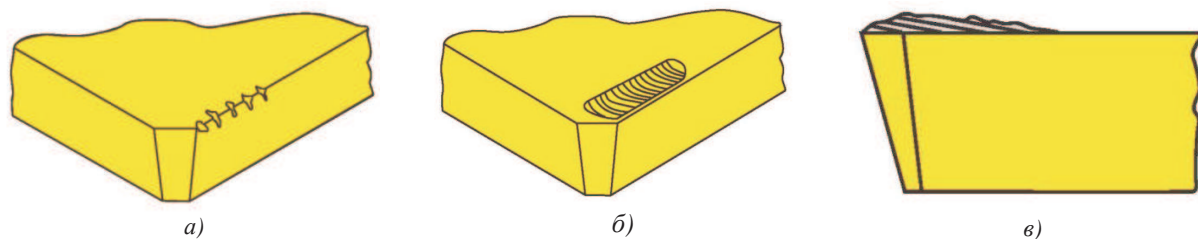


Рис. 1. Основные виды износа режущих пластин: *а* — выкрашивание; *б* — лунообразование; *в* — наростообразование

Амплитуда, форма, частота и спектральный состав силовых импульсов при обработке косвенно описывают состояние режущих кромок инструмента. Возникающие периодические импульсы сил воздействуют на упруго-инерционную систему станка, вызывая в ней стационарные и переходные колебательные процессы. Результирующие вибрации на шпинделе зависят также от собственных форм и резонансных свойств станка [7; 8]. Таким образом, при измерении вибрационного состояния станка в процессе обработки имеется потенциальная возможность контролировать состояние режущих кромок инструмента, т. е. его текущее состояние, путем анализа нелинейных вибрационных процессов, возникающих при обработке.

Для изучения особенностей данного процесса, выявления некоторых закономерностей влияния износа инструмента на параметры и спектральный состав вибраций, наряду с проведением полномасштабных натурных экспериментов, необходимо провести конечно-

элементное моделирование процесса фрезерования для определения формы силовых импульсов при фрезеровании, а также их изменений при возникновении дефектов режущих кромок [13; 14].

В то же время, известны алгоритмы и программы расчета силовых зависимостей, возникающих при использовании фрез разного типа и конфигураций [15; 16].

Для концевых сборных фрез наиболее адекватными являются аналитические уравнения зависимости генерируемых сил от конфигурации фрез и режимов обработки, полученные в работах [17–20]. Разрабатываемая на их основе динамическая модель позволит, с учетом выявленных конечно-элементным моделированием закономерностей изменений формы силовых импульсов при различных дефектах, создавать временной ряд сигналов для их последующего спектрального анализа и выявления закономерностей спектрального состава силовых импульсов при различных дефектах фрез, а в дальнейшем и учесть динамику станка.

Конечно-элементное моделирование. Конечно-элементное (КЭ) моделирование силового процесса фрезерования проведено в программной среде «Деформ». Заготовка из Al20%Si, имеющая размеры 10x10x50 мм, включает в себя 69 305 тетраидных элементов со сгущением в зоне резания, минимальная длина стороны которых составляет 0,1 мм. Конечно-элементная модель процесса фрезерования включает также модель концевой фрезы диаметром 32 мм с тремя сменными твердосплавными пластинами, на которых можно задавать дефекты, например случай выкрашивания режущей кромки пластины (рис. 1 а).

На рис. 2 представлена трехмерная визуальная схема КЭ моделирования сил, возникающих при обработке заготовки с помощью концевой фрезы со сменными пластинами.

Моделирование выполнялось согласно параметрам резания, представленным в табл. 1. По результатам моделирования фрезерования получены зависимости сил резания по координатам станка.



Рис. 2. Моделирование процесса фрезерования

На рис. 3 приведены временные характеристики силы резания по координате, направленной вдоль подачи инструмента (ось X), для случая отсутствия износа (рис. 3 а), при дефекте выкрашивания одной режущей кромки (рис. 3 б) и отсутствии (поломке) одной пластины (рис. 3 в).

Таблица 1

Параметры обработки

Угловая скорость фрезы $n, \text{мин}^{-1}$	Диаметр фрезы $d, \text{мм}$	Число режущих кромок фрезы, n_z	Глубина фрезерования $a_p, \text{мм}$	Ширина фрезерования, $a_e, \text{мм}$	Подача на зуб $F_z, \text{мм/зуб}$	Вид фрезерования
3 000	32	3	2	2	0,2	Попутное

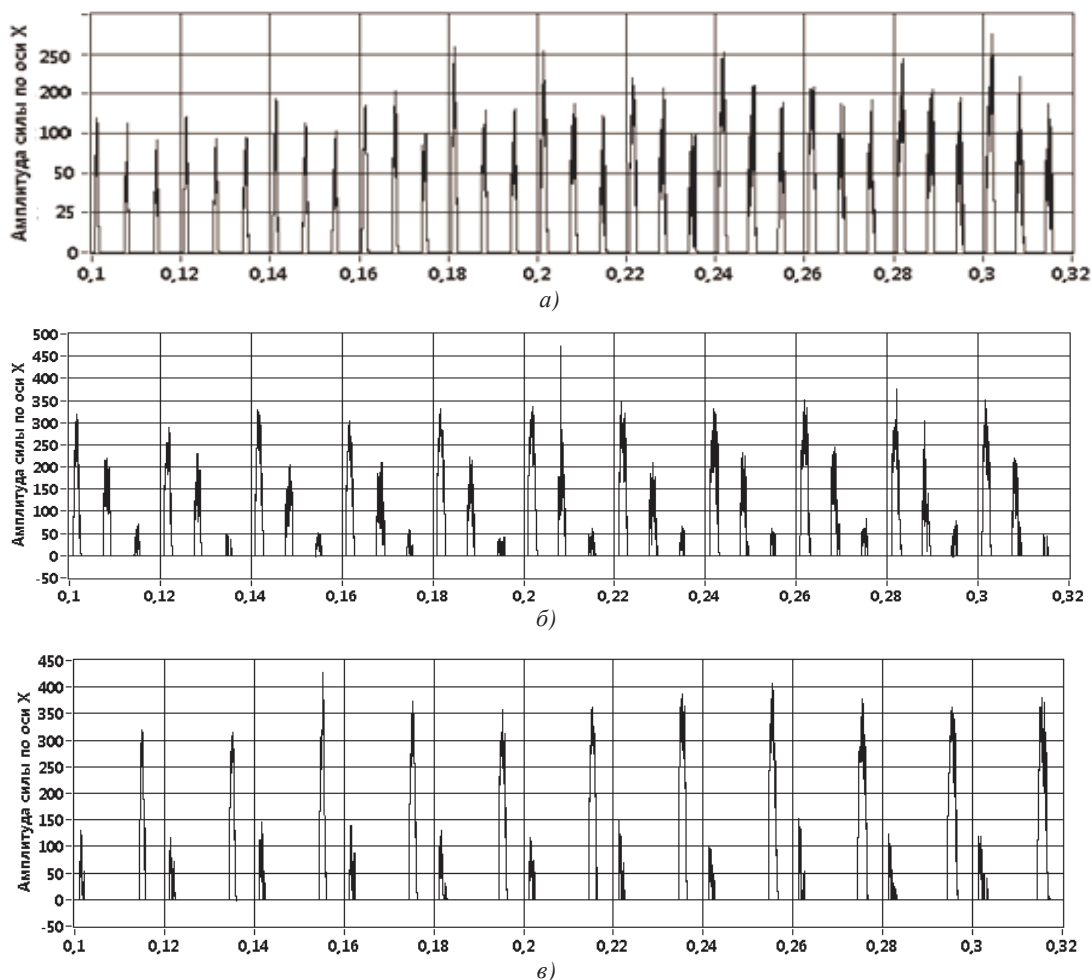


Рис. 3. Временные сигналы сил резания по оси X подачи заготовки: а — отсутствие дефекта; б — дефект выкрашивания одной режущей кромки; в — поломка режущей кромки

На рис. 4 представлен увеличенный фрагмент формы сигнала силы, возникающей при врезании зуба в случае попутной обработки.

Так как в программе КЭ моделирования шаг расчетов по времени переменный, подготовка данных для спектрального анализа сигнала силы проводилась с помощью алгоритма и подпрограммы преобразования полученных данных в массив сигналов с постоянным шагом по времени.

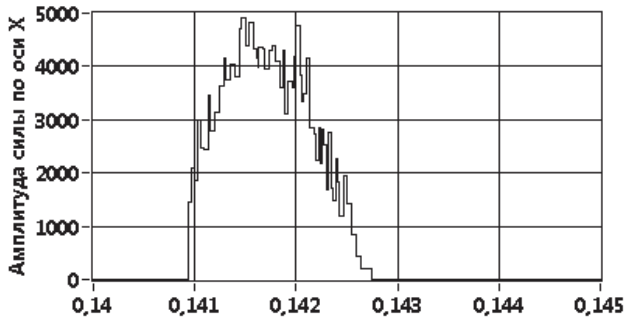


Рис. 4. Фрагмент формы сигнала силы при врезании зуба в обрабатываемый материал (попутная обработка)

Программа преобразования данных создана в программной среде Matlab. Блок-схема алгоритма подпрограммы получения сигнала силы с постоянным шагом по времени представлена на рис. 5.

Для выявления вибродиагностических признаков износа режущих пластин использовался спектральный анализ составляющих сил резания при помощи быстрого преобразования Фурье (БПФ) в программной среде LabView.

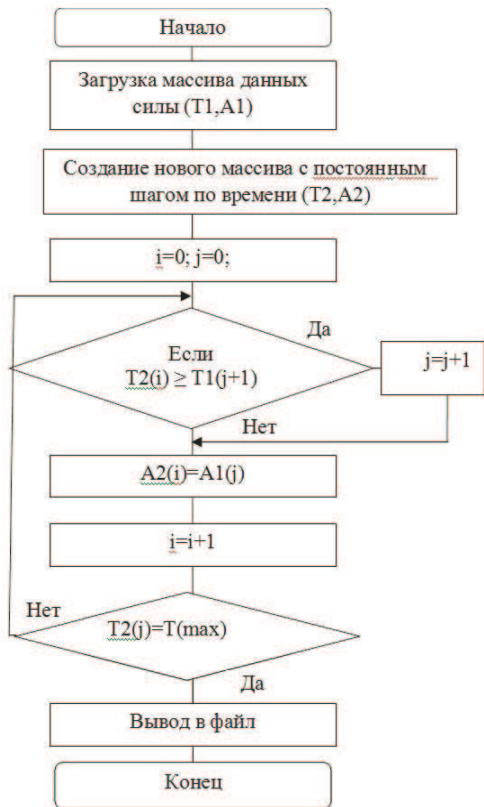


Рис. 5. Блок-схема программы преобразования сигналов силы

Аналитический расчет сил фрезерования и программа моделирования. Аналитический расчет сил резания основывается на методике, предложенной в работах [16–20]. Определим выражения тангенциальной и радиальной сил резания, действующих на j зуб:

$$dF_{t,j}(\varphi_j, z) = [K_{tc} \cdot h(\varphi_j(z)) + K_{te}] \cdot dz,$$

$$dF_{r,j}(\varphi_j, z) = [K_{rc} \cdot h(\varphi_j(z)) + K_{re}] \cdot dz,$$

где K_{tc} , K_{te} — постоянные коэффициенты тангенциальной силы резания; K_{rc} , K_{re} — постоянные коэффициенты нормальной силы резания; dz — дискретный шаг по оси инструмента.

Динамическая толщина срезаемого зубом j слоя определяется по формуле:

$$h(\varphi_j(z)) = f_t \cdot \sin \varphi_j(z),$$

где f_t — подача на зуб; $\varphi_j(z)$ — текущий угол режущей кромки j относительно оси инструмента ($j = 1, \dots, n$); n — число режущих кромок.

Расчет текущего угла режущей кромки j выполняется по формуле:

$$\varphi_j(z) = \varphi_{(j-1)} + j \cdot \varphi_p - \psi,$$

где φ_p — центральный угол между режущими кромками инструмента, определяющийся как $\varphi_p = 2\pi/n$.

При фрезеровании инструментом, имеющим угол наклона винтовой линии режущей кромки β , точка на ее поверхности будет отставать от точки на предыдущем шаге по оси инструмента, т. е. иметь запаздывание (рис. 6). Угол запаздывания ψ при шаге dz по оси инструмента диаметром d определяется из условия:

$$\tan(\beta) = \frac{d \cdot \psi}{2 \cdot dz}, \text{ отсюда } \psi = \frac{2 \cdot \tan(\beta)}{d} \cdot dz.$$

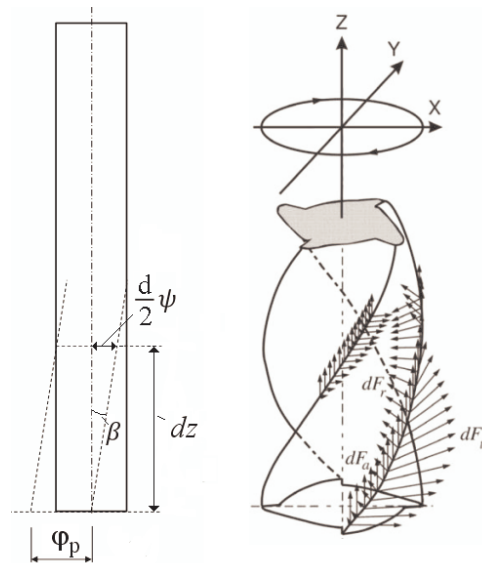


Рис. 6. Угол закручивания режущей кромки и схема сил резания

Проекции сил резания на оси x и y определяются по формулам:

$$dF_{x,j}(\varphi_j, z) = -dF_{t,j} \cos \varphi_j(z) - dF_{r,j} \sin \varphi_j(z);$$

$$dF_{y,j}(\varphi_j, z) = dF_{t,j} \sin \varphi_j(z) - dF_{r,j} \cos \varphi_j(z).$$

Принимается, что процесс динамического формирования толщины стружки активен, когда соблюдается следующее условие:

$$F_x(\varphi), F_y(\varphi), F_z(\varphi) > 0,$$

когда $\varphi_s \leq \varphi_j(z) \leq \varphi_{ex}$,

где φ_s — угол входа и φ_{ex} — угол выхода режущих кромок.

Схема формирования толщины стружки при фрезеровании представлена на рис. 7.

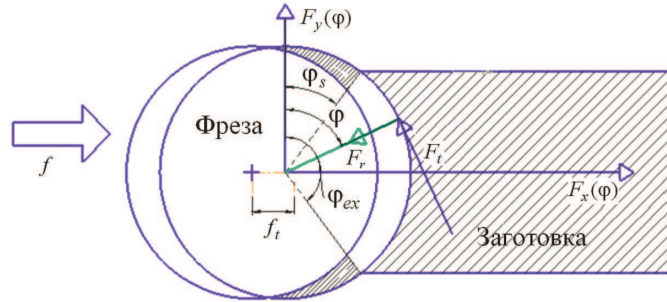


Рис. 7. Схема формирования толщины стружки при фрезеровании

Согласно геометрическим параметрам резания (рис. 8), определение углов входа φ_s и выхода режущих кромок φ_{ex} для встречного и попутного фрезерования соответственно выполняется по формулам (1),

(2). На рис. 8 введены обозначения: ω — направление угловой скорости фрезы; V — направление линейного движения фрезы или стола с заготовкой; $d = 2r$ — диаметр фрезы; b — ширина области фрезерования.

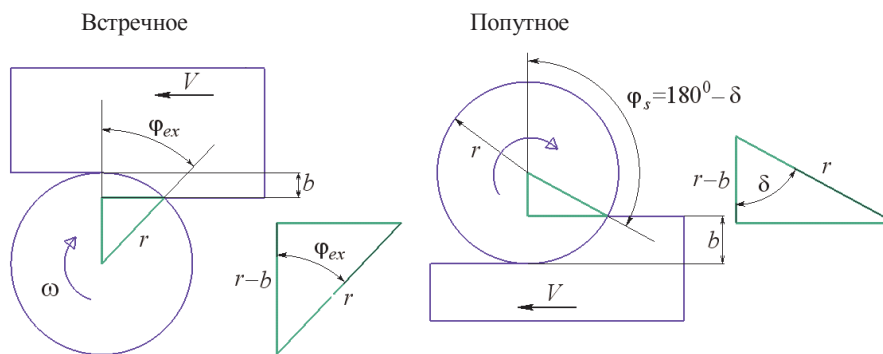


Рис. 8. Схема определения углов входа и выхода при попутном и встречном фрезеровании

$$\varphi_s = 0; \varphi_{ex} = \arccos\left(\frac{r-b}{r}\right), \quad (1)$$

$$\varphi_s = 2\pi - \arccos\left(\frac{r-b}{r}\right); \varphi_{ex} = 2\pi. \quad (2)$$

Введем дополнительные коэффициенты, определяющие износ режущих кромок в формуле расчета толщины срезаемого слоя (3):

$$h(\varphi, z) = k_{ed} \cdot f_t \cdot \sin \varphi_j(z), \quad (3)$$

где k_{ed} — коэффициент износа режущих кромок фрезы.

Представленная аналитическая методика использована при разработке программы динамического моделирования сил резания при фрезеровании в программной среде Matlab. Программа производит динамический расчет сил резания при различных дефектах режущих кромок фрезы и позволяет проводить спектральный анализ сил резания с целью выявления закономерностей изменения спектральных составляющих. Псевдокод программы моделирования сил резания при фрезеровании представлен в табл. 2.

Входными параметрами для программы являются угол наклона винтовой линии, осевая глубина резания a , количество режущих кромок, подача, частота вращения шпинделя, постоянные коэффициенты силы резания. В программе производится расчет сил на каждом шаге поворота фрезы $\Delta\varphi$ и осевом расстоянии от вершины инструмента Δa . Выходными параметрами программы являются силы резания с учетом коэффициентов износа инструмента и их спектральный анализ.

С использованием представленной математической модели резания и реализующей ее программы проведен расчет сил резания при фрезеровании с различными состояниями режущих кромок сменных пластин фрезы (табл. 3). В первом случае моделировалась обработка при отсутствии износа пластин ($k_{ed} = 1$ — коэффициент износа), во втором случае на одной режущей пластине создавались следы выкрашивания ($k_{ed} = 0,3$, см. рис. 1 а), в третьем случае одна из режущих кромок полностью отсутствовала ($k_{ed} = 0$). При этом дополнительная нагрузка от уменьшения сил резания на дефектных кромках передавалась на следующие по направлению вращения фрезы сменные пластины.

Псевдокод программы моделирования сил резания при фрезеровании

Входные параметры	
Условия резания	a, F_t
Геометрия инструмента	d, N, β
Постоянные коэффициенты	$K_{tc}, K_{rc}, K_{te}, K_{re}$
Дискретный угол поворота	$\Delta\varphi$
Дискретный шаг по оси	Δa
Выходные параметры	
Силы резания	$F_x(\varphi), F_y(\varphi), F_z(\varphi)$
Спектр сигналов силы	S_x, S_y
Переменные	
$\varphi_p = 2\pi/n$	Угол между режущими кромками
$K = 2\pi / \Delta\varphi$	Количество угловых шагов
$L = a / \Delta a$	Количество осевых шагов
$i = 1 \rightarrow K$	Цикл поворота фрезы
$\varphi(i) = \varphi_{st} + i \cdot \Delta\varphi$	Текущий угол режущей кромки
$F_x(i) = F_y(i) = F_z(i) = 0$	Инициализация переменных силы
$k = 1 \rightarrow N$	Цикл расчета силы по каждой реж кромке
$\varphi_1 = \varphi(i) + (k - 1) \cdot \varphi_p$	Угол режущей кромки k
$\varphi_2 = \varphi_1$	Запоминание текущего угла
$j = 1 \rightarrow L$	Цикл дискретного шага по оси
$a(j) = j \cdot \Delta a$	Осевая позиция
$\varphi_2 = \varphi_1 - \frac{2 \cdot \tan\beta}{d} \cdot a(j)$	Текущий угол с учетом угла закручивания
$IF \varphi_s \leq \varphi_2 \leq \varphi_{ex}$	Если процесс резания активен, тогда:
$h = f_t \cdot \sin\varphi_2$	Расчет динамической толщины стружки
$\Delta F_t = \Delta a \cdot (K_{tc} \cdot h + K_{te})$	Тангенциальная сила
$\Delta F_r = \Delta a \cdot (K_{rc} \cdot h + K_{re})$	Радиальная сила
$\Delta F_x = -\Delta F_t \cdot \cos\varphi_2 - \Delta F_r \cdot \sin\varphi_2$	Проекция силы резания на ось x
$\Delta F_y = \Delta F_t \cdot \sin\varphi_2 - \Delta F_r \cdot \cos\varphi_2$	Проекция силы резания на ось y
$F_x(i) = F_x(i) + \Delta F_x$	Суммирование сил резания по оси x
$F_y(i) = F_y(i) + \Delta F_y$	Суммирование сил резания по оси y
else	
next j	
nextk	
next i	
$S_x = \text{fft}(f_x) / K$	Спектральный анализ силы по оси X
$S_y = \text{fft}(f_y) / K$	Спектральный анализ силы по оси Y
Plot F_x, F_y, S_x, S_y	Вывод графиков на экран
stop	
end	

Износ режущих кромок

№ прохода	1	2	3
Износ режущей кромки	Без износа	Одна режущая кромка имеет выкрашивание	Отсутствие одной режущей кромки (поломка)
Коэффициент износа $k_{ed}(z)$	$k_{ed}(1) = 1$ $k_{ed}(2) = 1$ $k_{ed}(3) = 1$	$k_{ed}(1) = 1$ $k_{ed}(2) = 0,3$ $k_{ed}(3) = 1,7$	$k_{ed}(1) = 1$ $k_{ed}(2) = 0$ $k_{ed}(3) = 2$

Параметры обработки брались те же, что и при КЭ моделировании (см. табл. 1). По результатам расчета получены зависимости сил резания от времени при состоянии режущих кромок в соответствии с табл. 3.

Спектральный состав сигналов силы, полученных аналитически и с использованием конечно-элементного моделирования, представлен на рис. 9.

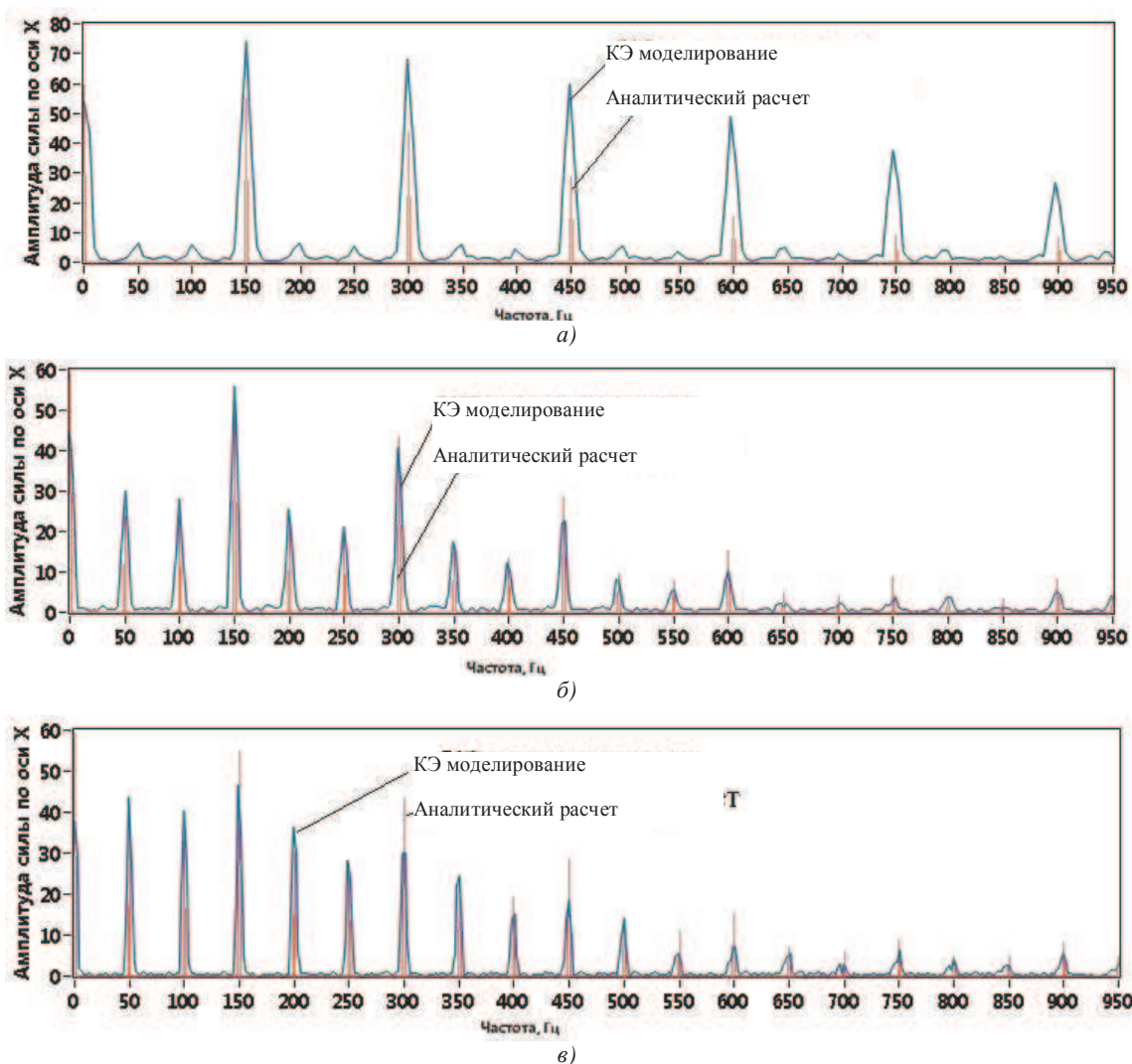


Рис. 9. Наложение спектров сигналов силы по оси X вдоль подачи заготовки, полученных аналитически и с помощью КЭ моделирования: а — без дефекта; б — дефект выкрашивания; в — поломка режущей кромки

Полученные результаты аналитического расчета сил фрезерования с использованием программы динамического моделирования при моделировании различных дефектов режущих кромок концевой фрезы показали хорошую сходимость с результатами КЭ моделирования сил фрезерования при снижении на 1-2 порядка времени расчета. Разработанная программа динамиче-

ского моделирования сил фрезерования при различных дефектах позволяет использовать ее в исследовании динамики шпинделя станка и учета влияния форм и собственных частот колебаний последнего на режимы обработки и уровень вибрации системы «шпиндель – инструмент», что влияет на чистоту обработки и ресурс станка и инструмента.

Программа динамического моделирования позволит проводить исследование вибродиагностических признаков дефектов инструмента с учетом прохождения полезного диагностического сигнала через динамическую систему шпинделя, что обеспечит своевременное распознавание дефектов и проведение замены инструмента до его поломки.

Выводы

На основании данных, полученных в результате аналитического расчета и конечно-элементного моделирования фрезерования, выявлено, что дополнительно введенный в аналитическую модель коэффициент износа позволяет достоверно отражать физико-механические процессы, происходящие при фрезеровании. Различия в значениях сил, полученных разными способами, несущественны, следовательно, в целях многократного увеличения производительности расчетов рекомендуется использовать при исследовании динамики системы «шпиндель – инструмент» предложенную аналитическую модель и программу динамического моделирования сил при фрезеровании.

Спектральный анализ силовых воздействий, полученных методом конечно-элементного моделирования и аналитического расчета, позволяет выявить следующие вибродиагностические признаки режущего инструмента:

1) Бездефектному состоянию фрезы соответствует преобладание спектральных составляющих на зубцовой частоте f_z и ее гармониках. $f_z = \frac{n}{60} \cdot z$, где n —

частота вращения фрезы, *об/мин*; z — число режущих кромок фрезы. Для рассматриваемого случая зубцовая частота $f_z = 150$ Гц.

2) Износ одной из кромок (пластины) фрезы увеличивает спектральные составляющие на оборотных частотах $f_1 = \frac{n}{60}$; $2 \cdot f_1$ и их гармониках.

3) Поломка режущей кромки (пластины) приводит к дальнейшему росту спектральных составляющих на оборотных частотах f_1 , $2 \cdot f_1$ и их гармониках, которые становятся сопоставимы с амплитудами составляющих на зубцовой частоте и ее гармониках.

Литература

1. Савилов А.В., Пятых А.С. Влияние вибраций на точность и качество поверхности отверстий при сверлении // Вестн. ИрГТУ. 2013. № 12. С. 23-25.

2. Савилов А.В., Пятых А.С. Определение коэффициентов сил резания для моделирования процессов механообработки // Изв. Самар. науч. центра Рос. акад. наук. 2015. Т.17, № 2. С. 211-216.

3. Семенов Е.Н., Беломестных А.С., Сидорова А.В. Исследование частотных характеристик робота Kuka kr210 r2700 extra // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: сб. ст. всерос. молод. науч.-практической конф. 2016. С. 252-257.

4. Синопальников В.А., Григорьев С.Н. Надежность и диагностика технологических систем. М.: Высш. школа, 2005. 343 с.

5. Кожевников Д.В., Кирсанов С.В. Резание материалов. М.: Машиностроение, 2007. 304 с.

6. Григорьев С.Н., Гурин В.Д., Козочкин М.П. Диагностика автоматизированного производства / под ред. С.Н. Григорьева. М.: Машиностроение, 2011. 600 с.

7. Алейников Д.П., Лукьянов А.В. Мониторинг динамического состояния обрабатывающих центров // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: сб. ст. VII Всерос. науч.-практической конф., Иркутск, 13-16 апр. 2016, Иркутск, 2016. С. 197-200 с.

8. Лукьянов Д.А., Алейников Д.П., Лукьянов А.В. Вычисление параметров и визуализация пространственных колебаний шпинделя обрабатывающего центра по результатам виброизмерений // Вестн. Иркут. гос. техн. у-та. 2013. № 12 (83). С. 92-99.

9. Лукьянов А.В. Классификатор вибродиагностических признаков дефектов роторных машин. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 1999. 230 с.

10. Лукьянов А.В. Управление техническим состоянием роторных машин (система планово-диагностического ремонта). Иркутск, Изд-во ИрГТУ, 2000. 230 с.

11. Алейников Д.П., Лукьянов А.В. Исследование динамики крепления датчиков вибрации шпинделей обрабатывающих центров // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2015. № 2. С. 28-35.

12. Алейников Д.П., Лукьянов А.В. Разработка комплекса защиты обрабатывающих центров от опасных динамических нагрузок // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы Седьмой междунар. науч.-практической конф., 29 марта – 1 апр. 2016 г., г. Иркутск. Иркутск, 2016. Т. 2. С. 600-604.

13. Гуськов А.М., Рыбин А.Г. Численный анализ динамики цилиндрического фрезерования // Проблемы динамики и прочности исполнительных механизмов и машин: материалы науч. конф. Астрахань, 2002. С. 119-122.

14. Криворучко Д.В., Залогов В.А. Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы: моногр. Сумы: Универс. книга, 2012. 496 с.

15. Campatelli G., Scippa A. Prediction of milling cutting force coefficients for Aluminum 6082-T4 // Conference on High Performance Cutting 2012. P. 563-568.

16. Yucesan G., Altintas Y. Prediction of Ball end Milling Force // Journal of Engineering For Industry. 1996. P. 95-104.

17. Altintas Y. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design. Cambridge University Press, 2012. P. 366.

18. Altintas, Y., Engin, S., Budak, E. Analytical Stability Prediction and Design of Variable Pitch Cutters, 1999// ASME J. Manuf. Sci. Eng. 1999. P. 173-178.

19. Altintas Y., Lee P. A General Mechanics and Dynamics Model for Helical End Mills // Journal of Manufacturing Science and Engineering 1998. P. 684-692.

20. Engin S., Altintas Y. Mechanics and Dynamics of general milling cutters. Part 1: helical end mills // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2001. P. 2195-2212.

References

1. Savilov A.V., Pyatykh A.S. Vibration effect on accuracy and quality of hole surface under drilling // Vestnik of Irkutsk State Technical University. 2013. № 12. P. 23-25.

2. Savilov A.V., Pyatykh A.S. The identification cutting force coefficients for simulation of the machining // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2015. T.17, № 2. P. 211-216.

3. Semenov E.N., Belomestnykh A.S., Sidorova A.V. A study of the frequency characteristics of the robot Kuka kr210 r2700 extra // Aviamashinostroenie i transport Sibiri: sb. st. vseros. mlad. nauch.-prakticheskoi konf. 2016. P. 252-257.

4. Sinopal'nikov V.A., Grigor'ev S.N. Reliability and diagnostics of technological systems. M.: Vyssh. shkola, 2005. 343 p.

5. Kozhevnikov D.V., Kirsanov S.V. Cutting materials. M.: Mashinostroenie, 2007. 304 p.
6. Grigor'ev S.N., Gurin V.D., Kozochkin M.P. Diagnosis of computer-aided manufacturing / pod red. S.N. Grigor'eva. M.: Mashinostroenie, 2011. 600 p.
7. Aleinikov D.P., Luk'yanov A.V. Monitoring the state of dynamic machining center // Aviamashinostroenie i transport Sibiri: sb. st. VII Vseros. nauch.-prakticheskoi konf., Irkutsk, 13-16 apr. 2016, Irkutsk, 2016. P. 197-200.
8. Luk'yanov D.A., Aleinikov D.P., Luk'yanov A.V. Calculation of parameters and visualization of spatial vibrations of machining center spindle by vibration measurement results // Vestnik of Irkutsk State Technical University. 2013. № 12 (83). P. 92-99.
9. Luk'yanov A.V. Qualifier vibrodiagnostic signs rotary machines defects. Irkutsk: Izd-vo IrGTU, 1999. 230 p.
10. Luk'yanov A.V. Managing the technical condition of rotating machinery. Irkutsk, Izd-vo IrGTU, 2000. 230 p.
11. Aleinikov D.P., Luk'yanov A.V. Studying fixation dynamics of machining center spindle vibration sensors // Vestnik of Irkutsk State Technical University. 2015. № 2. P. 28-35.
12. Aleinikov D.P., Luk'yanov A.V. Development of protection complex machining centers from dangerous dynamic loads // Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona: materialy Sed'moi mezhdunar. nauch.- prakticheskoi konf., 29 marta - 1 apr. 2016 g., g. Irkutsk. Irkutsk, 2016. T. 2. P. 600-604.
13. Gus'kov A.M., Rybin A.G. Numerical analysis of the dynamics cylindrical milling // Problemy dinamiki i prochnosti ispolnitel'nykh mekhanizmov i mashin: materialy nauch. konf. Astrakhan', 2002. P. 119-122.
14. Krivoruchko D.V., Zaloga V.A. Simulation of the cutting process using finite element method: monogr. Sumy: Univers. kniga, 2012. 496 p.
15. Campatelli G., Scippa A. Prediction of milling cutting force coefficients for Aluminum 6082-T4 // Conference on High Performance Cutting 2012. P. 563-568.
16. Yucesan G., Altintas Y. Prediction of Ball end Milling Force // Journal of Engineering For Industry. 1996. P. 95-104.
17. Altintas Y. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design. Cambridge University Press, 2012. P. 366.
18. Altintas, Y., Engin, S., Budak, E. Analytical Stability Prediction and Design of Variable Pitch Cutters, 1999// ASME J. Manuf. Sci. Eng. 1999. P. 173-178.
19. Altintas Y., Lee P. A General Mechanics and Dynamics Model for Helical End Mills // Journal of Manufacturing Science and Engineering 1998. P. 684-692.
20. Engin S., Altintas Y. Mechanics and Dynamics of general milling cutters. Part 1: helical end mills // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2001. P. 2195-2212.