

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ НА ДИНАМИКУ ПОДАТЛИВОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ПЛОСКОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ

И.И. Иванов, И.А. Киселёв

Проведен расчетный анализ влияния параметров обработки на колебания податливого инструмента и качество получаемой поверхности при фрезеровании. Описан алгоритм учета динамических характеристик инструмента при моделировании фрезерования. На примере концевой двузубой фрезы численно получены и качественно объяснены основные колебательные режимы, возникающие при фрезеровании.

Ключевые слова: динамика фрезерования, деформация инструмента.

Введение

Фрезерование — широко распространенный в машиностроении процесс механической обработки, применяемый при производстве деталей сложной формы. Для снижения затрат производства наиболее целесообразно использовать максимально допустимые оборудованием параметры обработки. Однако в этом случае часто возникают высокоамплитудные вибрации инструмента и заготовки, приводящие к порче фрезы и обрабатываемой поверхности. Вибрации при резании обусловлены взаимодействием инструмента и заготовки при резании.

Для выбора наиболее благоприятных режимов, обеспечивающих высокие значения параметров обработки при сохранении допустимого уровня вибраций, необходимы теоретические и экспериментальные исследования динамики процесса фрезерования.

Большинством исследователей основной причиной значительного нарастания амплитуд колебаний при резании признается механизм «резания по следу» [1, 2]. Вибрации, возникающие по такому механизму, носят автоколебательный характер и не могут быть смо-

делированы без учета нелинейного характера зависимости сил резания от взаимных перемещений инструмента и детали.

Возникающие при обработке резанием силы зависят от свойств обрабатываемого материала, режимов обработки, геометрии инструмента и других параметров. Как показывают исследования [1, 2], наибольшее влияние на силы резания оказывает толщина срезаемого слоя. Последняя, в свою очередь, определяется не только взаимным положением инструмента и обрабатываемой детали в текущий момент времени, но и поверхностью детали, полученной на предыдущих проходах. Таким образом, для моделирования динамики фрезерования необходимы программные модули, моделирующие вибрации инструмента и детали под действием приложенных сил резания, а также программа для определения сил резания и изменения геометрической модели обрабатываемой поверхности с учетом деформаций инструмента и детали.

В настоящее время все больше работ [3, 4, 5] ориентировано на моделирование динамики процесса фрезерования с учетом сложной пространственной геометрии инструмента

и детали, с одной стороны, и влияния деформаций заготовки на силы резания – с другой. Однако вопрос учета динамических характеристик станка и инструмента в этих работах решен лишь приближенно.

В публикациях [6, 7] авторами представлен алгоритм, позволяющий с приемлемыми вычислительными затратами учитывать динамические характеристики податливого инструмента при моделировании фрезерования. Алгоритмы вычисления сил резания и изменения поверхности детали при обработке приведены в работах [3, 4].

В данной работе с использованием разработанного авторами программного комплекса проведен анализ влияния режимов обработки на колебания концевой двузубой фрезы и качество получаемой поверхности детали при фрезеровании. Задача решается в нелинейной нестационарной постановке.

Алгоритм решения задачи

На инструмент действуют силы резания, зависящие от толщины срезаемого слоя, которая, в свою очередь, определяется относительным положением режущих кромок фрезы и обрабатываемой поверхности детали, построенной с учетом ранее срезанного материала. Формирование обработанной поверхности и определение толщины срезаемого слоя вдоль режущих кромок инструмента в настоящей работе осуществляется с использованием алгоритма трехмерного геометрического моделирования 3MZBL [3, 4], являющегося модификацией метода буфера глубины.

Динамика деформирования инструмента моделируется с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Для моделирования колебаний фрезы проводится редукция конечно-элементной модели (КЭ-модели) методом Гайана [8] в программном комплексе *NASTRAN* [6, 7]. Суть метода редукции состоит в сведении полной КЭ-модели фрезы к нескольким узлам на оси, называемым узлами конденсации. В качестве примера в работе рассматривается двузубая концевая фреза, КЭ-модель которой представлена на рис. 1. Каждый из узлов конденсации имеет 6 степеней свободы (3 поступательных, 3 вращательных) и посредством многоточечных связей крепится к узлам трехмерной КЭ-модели. Размерность полной модели инструмента – $3N$, где N – количество

узлов (каждый из них имеет 3 поступательные степени свободы); размерность редуцированной модели – $6N_{cond}$, где N_{cond} – количество узлов конденсации.

Общий алгоритм работы программы представлен на рис. 2. На каждом временном шаге проводится итерационное уточнение сил резания с учетом перемещений фрезы, вызванных ее деформацией под действием сил резания. На каждой итерации проводится вычисление сил резания по текущим координатам точек геометрических моделей режущих кромок и обрабатываемой поверхности, приведение сил резания к узлам конденсации, решение редуцированной динамической задачи и восстановление перемещений точек геометрической модели режущих кромок по перемещениям узлов конденсации. После вычисления сил резания на каждой итерации производится оценка изменения вектора сил по сравнению с предыдущей итерацией. После удовлетворения решения критерию сходимости на данном временном шаге производится изменение обрабатываемой поверхности с учетом деформации фрезы и переход на следующий временной шаг, сопровождающийся перемещением подачи.

Таким образом, данный алгоритм позволяет моделировать динамику инструмента при фрезеровании с учетом влияния деформаций фрезы на силы резания и геометрию получаемой поверхности. Модель способна выявлять автоколебательные режимы, обусловленные механизмами координатной связи и «резания по следу».

На каждой итерации временного шага необходимо решение системы уравнений динамики редуцированной модели инструмента. Проведение решения в неподвижной системе



Рис. 1. Конечно-элементная модель (КЭ-модель) двузубой концевой фрезы

координат (СК) сопряжено с необходимостью регулярного поворота матриц жесткости и масс редуцированной модели фрезы. В данной работе предлагается решение системы уравнений динамики во вращающейся СК.

Уравнение динамики в матричном виде в неподвижной СК имеет вид:

$$\frac{d}{dt}([M_0]\{\dot{u}_0\}) + [B_0]\{\dot{u}_0\} + [G_0]\{\dot{u}_0\} + [K_0]\{u_0\} = \{F_0\}, \quad (1)$$

где $[M_0], [B_0], [K_0]$ – соответственно матрицы масс, диссипации и жесткости, записанные в неподвижной СК; $[G_0]$ – матрица гироскопических сил; $\{u_0\}$ – вектор перемещений редуцированной модели и $\{F_0\}$ – вектор сил в неподвижной СК.

Перемещения узлов редуцированной модели в неподвижной СК выражается через перемещения в подвижной:

$$\{u_0\} = [L]\{u\}, \quad (2)$$

где $\{u\}$ – вектор перемещений редуцированной модели, записанный в подвижной СК; $[L]$ – матрица поворота.

Вектор сил преобразуется по тому же закону:

$$\{F_0\} = [L]\{F\}, \quad (3)$$

где $\{F\}$ – вектор сил в подвижной СК.

Преобразования матриц жесткости, масс и демпфирования при повороте СК:

$$[K_0] = [L][K][L]^T; \quad [M_0] = [L][M][L]^T; \\ [B_0] = [L][B][L]^T, \quad (4)$$

где $[M], [B], [K]$ – соответственно матрицы масс, демпфирования и жесткости, записанные в подвижной СК.

Заметим, что: $[G_0] = [L][G][L]^T = [G]$.

После подстановки (2), (3), (4) в (1) получаем:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [D]\{\dot{u}\} + [C]\{u\} = \{F\}; \\ [D] = [B] + [G] + \omega([L]^T[L']^T[M] + [M][L]^T[L']); \\ [C] = [K] + \omega([B][L]^T[L'] + [L]^T[G][L']) + \\ + \omega^2[L]^T[L']^T[M][L]^T[L'], \quad (5)$$

где $[L']$ – производная матрицы поворота по углу; ω – угловая скорость фрезы.

Матрицы $[C], [D]$ вычисляются в начале расчета, оставаясь затем неизменными. Численное интегрирование уравнения (5) осуществляется по неявной схеме метода конечных разностей.

Параметры численного эксперимента

В качестве примера, иллюстрирующего применение предложенного подхода к модели-



Рис. 2. Алгоритм работы программы расчета динамики фрезерования

рованию динамики фрезерования, в настоящей работе рассматривается расчет динамики процесса обработки жесткой детали податливой двузубой концевой фрезой. На рисунке 3 приведена схема процесса фрезерования и система координат детали, используемая для представления перемещений и визуализации моделей обработанных поверхностей в дальнейшем.

Параметры фрезы следующие: диаметр – 20 мм; длина – 150 мм; длина режущей части – 100 мм; количество режущих кромок – 2; угол наклона винтовой режущей кромки к оси вращения составляет 30° ; материал фрезы – сталь; радиальная глубина фрезерования – 0,5 мм; материал заготовки – алюминиевый сплав.

Матрица диссипации задана пропорциональной матрице жесткости и обеспечивает демпфирование в размере 1% от критического на первой собственной частоте колебаний; первые две собственные частоты колебаний: 600 и 724 Гц соответственно.

На рисунке 4 приведена модель обработанной поверхности, полученной без учета деформаций инструмента.

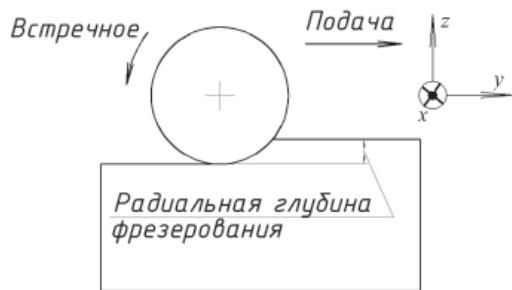


Рис. 3. Схема процесса фрезерования и система координат детали

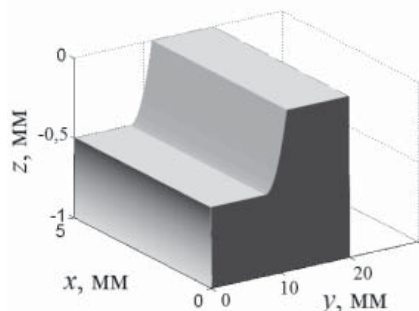


Рис. 4. Модель обработанной поверхности, полученная без учета деформирования фрезы

Представление результатов при исследовании вибраций фрезы

Основным параметром, определяющим поведение вибрации инструмента при фрезеровании, является частота вращения фрезы. Для ее исследования введем безразмерный параметр k :

$$k = \frac{p_1}{(h_z \omega)},$$

где ω – угловая скорость фрезы, с^{-1} ; p_1 – первая собственная частота колебаний фрезы, с^{-1} ; $n_z = 2$ – количество режущих кромок.

Одним из основных способов графического представления результатов моделирования поведения системы при различных значениях k в работе является диаграмма Пуанкаре. Ее построение осуществляется следующим образом:

- 1) на диаграмме Пуанкаре по оси абсцисс отложен исследуемый параметр процесса (параметр k), по оси ординат – перемещения;
- 2) первая половина интервала времени, на котором моделируются вибрации фрезы, отбрасывается из рассмотрения, поскольку интересуют только установившиеся колебания;
- 3) на оставшейся части моделирования определяются все экстремумы функции перемещения фрезы в вертикальном направлении u_z ;
- 4) в соответствие каждому экстремуму на диаграмме ставится точка, ордината которой равна его величине, а абсцисса – параметру процесса.

В некоторых случаях расчетные значения амплитуд колебаний инструмента достигают недопустимо больших величин. Расчетное получение таких значений обусловлено линейностью модели фрезы, пластические деформации не учитываются. В таких случаях полные величины амплитуд на диаграмме Пуанкаре не откладываются, а ограничиваются 1 мм. Если при нарастании вибраций силы резания превышают заданный порог (1000 Н), решение прекращается, и на диаграмме откладывается одна точка со значением амплитуды равной 0.

При исследовании вибраций важно выявить форму получаемой поверхности. Используются два способа ее представления:

- изображение трехмерной модели поверхности, получаемой при обработке детали;
- профиль детали в среднем ее сечении (в дальнейшем просто профиль).

Рассмотрим два случая обработки:

- на малую осевую глубину – режет часть

фрезы, прилегающая к ее концу и имеющая протяженность 5 мм;

- на большую осевую глубину – режет часть фрезы, расположенная в интервале 50–90 мм от ее конца (или в интервале 60–100 мм от закрепления).

Подача в обоих случаях принята равной 0,02 мм/зуб.

Фрезерование на малую осевую глубину

Диаграмма Пуанкаре, соответствующая встречному фрезерованию на малую осевую глубину, приведена на рис. 5.

На диаграмме видны области повышенных амплитуд колебаний A при $k = 0,4...0,5; 0,8...0,9; 1,25; 1,55; 1,7...1,8; 2,35...2,7; 2,95...3,5$. Наиболее благоприятными режимами по критерию наименьших амплитуд колебаний представляются: $k = 0,58; 1,0; 1,95$.

На рисунке 6 приведена зависимость вертикального смещения u_z от времени для режима $k=0$.

Из рисунка видно, что характер колебаний практически моногармонический, что подтверждается спектром перемещений, приведенным на рис. 7 (p – частота, A – амплитуда

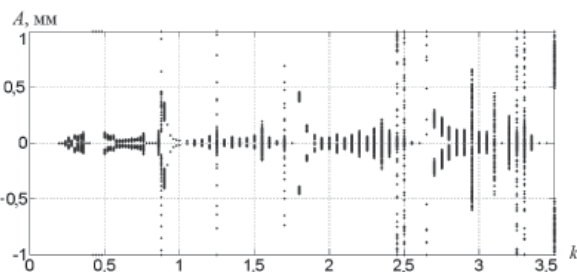


Рис. 5. Диаграмма Пуанкаре для случая обработки на малую осевую глубину 5 мм

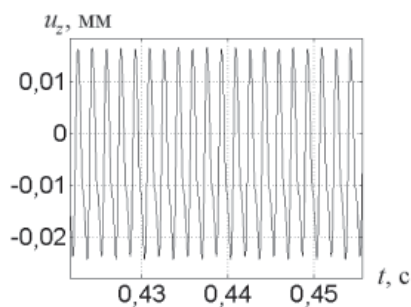


Рис. 6. Зависимость вертикального смещения конца фрезы от времени при $k = 1,0$:

t – время моделирования, u_z – вертикальное перемещение конца фрезы

колебаний; $p_1 = 600$ Гц – первая собственная частота колебаний фрезы). На рисунке 8 представлены зависимости сил резания F от времени t в системе координат фрезы. Видно, что резание имеет регулярный характер, на последовательно проходящие режущие кромки действуют одинаковые силы. В спектре сил резания также присутствуют только гармоники, кратные частоте прохождения зубьев. В данном случае частота прохождения режущих кромок инструмента совпадает с первой собственной частотой фрезы, которая доминирует в спектре. Колебания носят вынужденный характер.

На рисунке 9 представлена трехмерная визуализация полученной поверхности и ее разрез в плоскости движения подачи фрезы. Рисунок показывает, что качество поверхности лишь незначительно отличается от полученного при моделировании без учета податливости инструмента. Отклонение положения поверхности вверх на 0,014 мм может быть компенсировано при задании маршрута обработки.

На рисунке 10 приведен спектр перемеще-

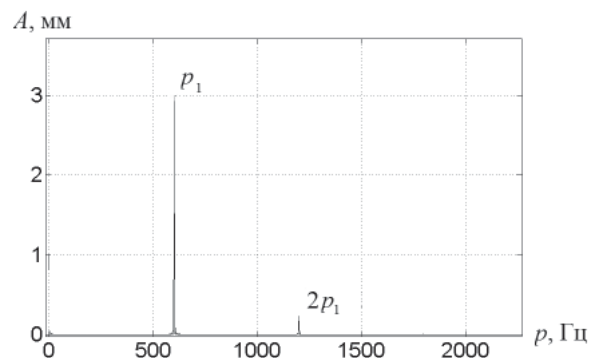


Рис. 7. Спектр вертикальных перемещений конца фрезы при $k = 1,0$

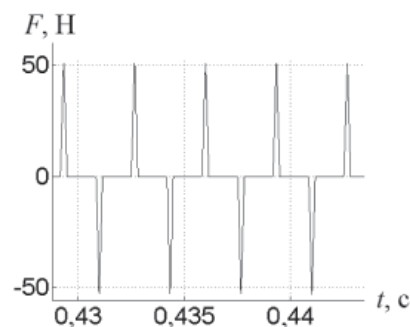
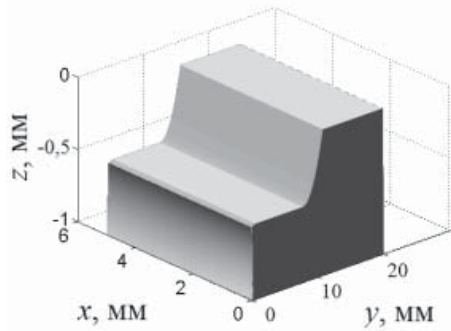


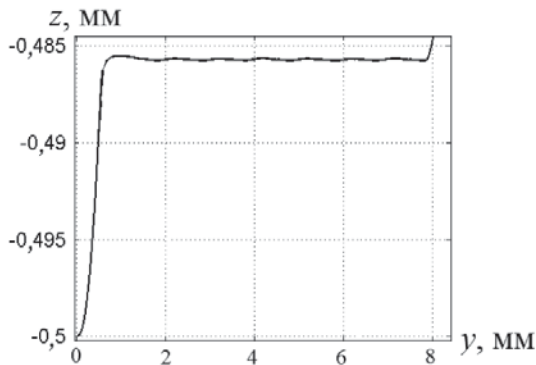
Рис. 8. Зависимости окружных составляющих сил резания F от времени, полученные в СК фрезы при $k = 1,0$

ний в вертикальном направлении для режима $k=1,5$ (соответствует частоте прохождения зубьев 400 Гц).

В представленном на рис. 10 спектре наибольшие по амплитуде составляющие наблюдаются на частоте прохождения режущих кромок и ее второй гармонике. Однако наи-



а



б

Рис. 9. Модель обработанной поверхности (а) и ее профиль в плоскости движения подачи фрезы (б) при $k = 1,0$

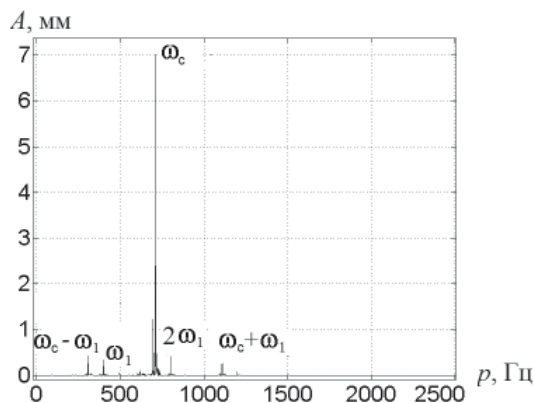


Рис. 10. Спектр вертикальных перемещений при $k = 1,5$:

p – частота, A – амплитуда,
 $\omega_c = 709$ Гц – основная частота автоколебаний,
 $\omega_1 = n_2 \omega = p_1/k = 400$ Гц – частота прохождения режущих кромок

большой пик, соответствующий частоте 709 Гц, расположен вблизи второй собственной частоты. Возникновение значительных вибраций на частоте вблизи собственной и не совпадающей с основной частотой возбуждения является одним из основных признаков возникновения регенеративных вибраций в системе, возбуждаемых по механизму «резания по следу» [2]. На спектре также видны пики, удаленные на частоту прохождения режущих кромок от частоты чаттера.

На рисунке 11 приведены зависимость от времени окружных составляющих сил резания F , полученная в системе координат фрезы. Из рисунка видно, что резание имеет нерегулярный характер. Силы резания, действующие на последовательно проходящие режущие кромки, существенно различаются.

На рисунке 12 представлена трехмерная визуализация полученной модели поверхности детали и ее разрез в плоскости движения подачи фрезы. У обработанной поверхности низкое качество и большая величина отклонения положения.

Анализ расчетных данных позволяет заключить, что в области низких частот вращения (больших k) значительная часть режимов является автоколебательными. Для режимов, свободных от возбуждения регенеративных вибраций, характерны высокие значения частот вращения.

Фрезерование на большую осевую глубину

На рисунке 13 приведена диаграмма Пуанкаре, соответствующая встречному фрезерованию на большую осевую глубину. Большее количество режимов обработки с приемлемым уровнем вибраций в данном случае можно объяснить тем, что обработка ведется участком

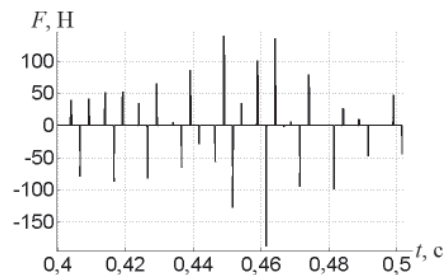


Рис. 11. Зависимость окружных составляющих сил резания F от времени t , полученные в системе координат фрезы при $k = 1,5$

фрезы, расположенном ближе к ее креплению, чем при построении диаграммы, показанной на рис. 6.

Ниже, на рисунках 14, 15, приведены трехмерные визуализации полученной поверхности и ее разрез в плоскости движения подачи фрезы при $k = 1,0$ и $k = 1,7$ соответственно. В первом случае получаемая поверхность практически идеальна. Во втором – обработанная поверхность существенно искажена из-за значительных вибраций фрезы. При этом вид искажений поверхности изменяется вдоль оси x , т.е. вдоль оси инструмента, что свидетельствует о его значительном изгибе.

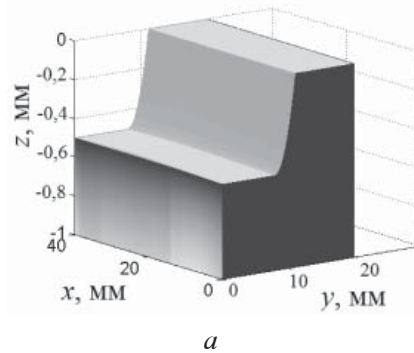
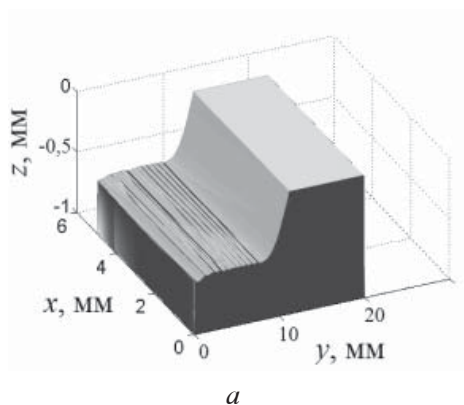


Рис. 14. Модель обработанной поверхности (а) и ее профиль в плоскости движения подачи фрезы (б) при $k = 1,0$

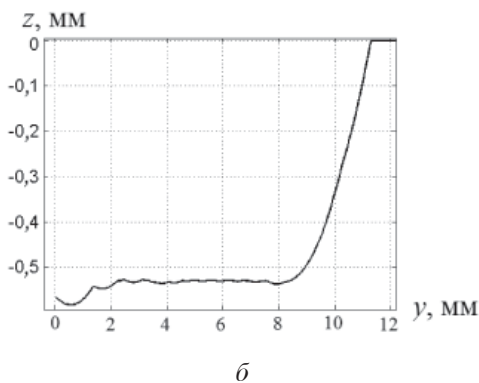


Рис. 12. Модель обработанной поверхности (а) и ее профиль в плоскости движения подачи фрезы (б) при $k = 1,5$

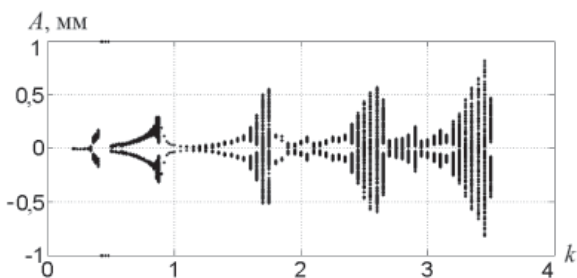


Рис. 13. Диаграмма Пуанкаре для случая обработки на большую осевую глубину 40 мм

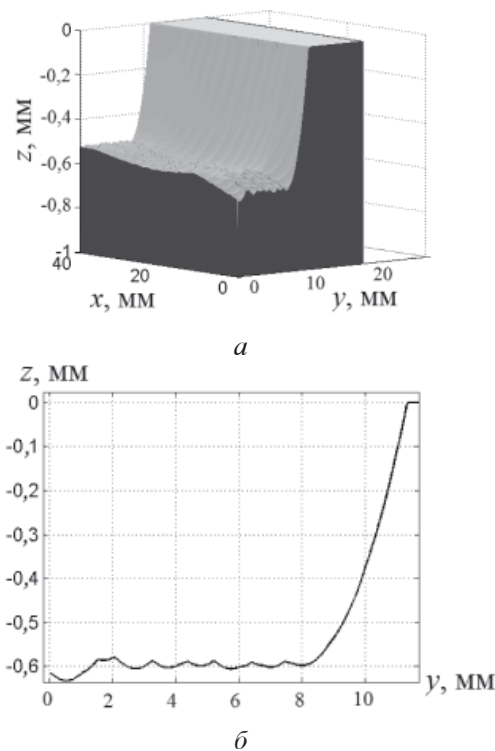


Рис. 15. Модель обработанной поверхности (а) и ее профиль в плоскости движения подачи фрезы (б) при $k = 1,7$

Заключение

В работе представлен алгоритм моделирования динамики фрезерования с учетом жесткостных и инерционных характеристик податливого инструмента. Особенностью предложенного подхода является совместное использование редуцированной модели динамики фрезы, учитывающей ее изгиб, и трехмерного алгоритма геометрического моделирования в рамках итерационного процесса уточнения сил резания с учетом текущих перемещений фрезы.

Проведенные в работе расчеты на тестовом примере выявили наличие благоприятных и неблагоприятных режимов обработки с точки зрения уровня и характера вибраций. Результаты расчетов позволяют сделать вывод о значительном влиянии изгиба инструмента на форму обработанной поверхности при большой осевой глубине обработки. Следовательно, можно сделать заключение о целесообразности применения предложенного в работе подхода к моделированию динамики фрезерования.

Список литературы

1. Кудинов В.А. Динамика станков. – М.: Машиностроение, 1967. – 357 с.
2. Altintas Y. Manufacturing automation. – New York: Cambridge University Press, 2012. – 366 p.
3. Киселев И.А. Геометрический алгоритм 3MZBL для моделирования процессов обработки резанием. Методика описания поверхности заготовки // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. 2012. № 6. С. 158–175.
4. Воронов С.А., Киселев И.А. Геометрический алгоритм 3MZBL для моделирования процессов обработки резанием. Алгоритм изменения поверхности и определения толщины срезаемого слоя // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. 2012. № 6. С. 70–83.
5. Biermann D., Kersting P., Surmann T. A general approach to simulating workpiece vibrations during five-axis milling of turbine blades // CIRP Annals. Manufacturing Technology. 2010. Vol. 59. P. 125–128.
6. Иванов И.И., Киселев И.А. Разработка методики учета деформаций инструмента при моделировании динамики фрезерования // Сборник трудов МИКМУС 2013. – М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2013. С. 119–123.
7. Воронов С.А., Иванов И.И., Киселев И.А. Исследование процесса фрезерования на основе редуцированной динамической модели инструмента // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014 (в печати).
8. Bathe K-J. Finite element procedures. – New Jersey: Prentice Hall, 1996. – 1037 p.

Материал поступил в редакцию 4.04.14

ИВАНОВ Илья Игоревич

E-mail: ivanovilig@gmail.com
Тел.: 8(906)0675940

Аспирант, ассистент кафедры прикладной механики МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сфера научных интересов: динамика фрезерования, роторная динамика. Автор одной статьи.

КИСЕЛЁВ Игорь Алексеевич

E-mail: i.a.kiselev@yandex.ru
Тел.: 8(916)8089907

Кандидат технических наук, ассистент кафедры прикладной механики МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сфера научных интересов: численное моделирование, метод конечных элементов, высокопроизводительные вычисления, динамика технологических процессов. Автор 24 статей.