

Исследование влияния снятия припуска в процессе фрезерования на изменение динамических характеристик сложнопрофильной детали

© С.А. Воронов, И.А. Киселев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрен алгоритм, входящий в состав имитационной модели динамики пятикоординатного фрезерования тонкостенной податливой заготовки и учитывающий изменение ее динамических характеристик по мере снятия припуска в процессе обработки. Проанализировано влияние снятия припуска на изменение собственных частот и форм колебаний сложнопрофильной детали.

Ключевые слова: *пятикоординатное фрезерование, динамика фрезерования, метод конечных элементов, снятие припуска, собственные частоты заготовки.*

Введение. Вибрации, возникающие при обработке податливых деталей фрезерованием вследствие периодического прерывистого характера резания, могут оказывать негативное влияние на точность геометрии и качество поверхности обрабатываемой детали. Как правило, вибрации при фрезеровании имеют вынужденный или автоколебательный характер. Автоколебательный характер вызван возбуждением при резании поверхности, образованной во время предыдущего прохода режущей кромки инструмента — *регенеративный механизм возбуждения, механизм запаздывания*. Второй тип вибраций является наиболее опасным с точки зрения ухудшения качества обработанной детали. Характер динамического поведения системы зависит от режимов обработки, таких как скорость подачи и вращения инструмента, глубина фрезерования, кинематические параметры инструмента, и существенно влияет на качество обработки. При обработке тонкостенных деталей сложной формы (например, лопаток газотурбинных двигателей) из труднообрабатываемых материалов вопрос борьбы с нежелательными вибрациями выходит на первое место. Поэтому выбор режимов пятикоординатного фрезерования сложнопрофильных податливых деталей требует особого, тщательного подхода, учитывающего динамическое поведение системы фреза — деталь и ее комплексный, нелинейный характер, в том числе механизм запаздывания. Для выбора рациональных режимов обработки целесообразно применять математические численные модели процесса фрезерования, позволяющие заранее (до обработки) предсказать характеристики вибрационного процесса.

Методика построения такой имитационной модели предложена в работах [1–3], которая включает динамическую модель заготовки, динамическую модель фрезы, численный алгоритм геометрического моделирования, учитывающий механизм запаздывания в системе, и феноменологическую модель сил резания. Имитационная модель позволяет оценить уровень вибраций, отклонение формы и качество поверхности обработанной детали, а также значения сил резания при различных сочетаниях параметров технологического процесса. Кроме того, в работе [1] приведен подробный обзор публикаций, посвященных проблеме моделирования процесса фрезерования.

В случае моделирования обработки податливых тонкостенных деталей наиболее существенное влияние на точность имитационной модели в целом оказывает ее блок, связанный с моделированием динамики обрабатываемой детали. Рассмотрению данного вопроса и посвящена настоящая работа. Далее описано построение динамической модели обрабатываемой детали на основе метода конечных элементов (МКЭ) с учетом изменения ее динамических характеристик по мере снятия материала.

1. Методы учета динамики обрабатываемой детали при моделировании процесса фрезерования. Учитывая сложность геометрической формы обрабатываемых деталей, для построения адекватной динамической модели целесообразно использовать МКЭ. В этом случае начальную конечно-элементную модель заготовки можно построить с помощью соответствующих программных комплексов с использованием твердотельной модели заготовки.

Одними из первых работ, использующих конечно-элементные модели обрабатываемой детали, являются работы [4, 5], где рассматривалось фрезерование тонкой алюминиевой пластины цилиндрической фрезой с винтовыми режущими кромками. При этом авторы указанных работ использовали итерационный алгоритм учета влияния отклонений размеров детали на значения сил резания, т. е. динамика обрабатываемой детали не моделировалась с помощью МКЭ напрямую. В работах [6, 7] конечно-элементная модель заготовки применялась для расчета и компенсации статических отжатий. В работе [8] автор использует конечно-элементную модель для определения передаточных функций в различных точках поверхности заготовки, при этом для анализа устойчивости применяется линейная модель плоского фрезерования. В работе [9] описан аналогичный подход, но построение зон динамической неустойчивости осуществляется отдельно для каждой собственной формы (СФ) колебаний. Кроме того, в этой работе приведен анализ влияния снятия материала заготовки на ее динамические характеристики. Подход, в котором совместно используются алгоритм геометрического моделирования

для определения сил резания и учета регенерации поверхности, а МКЭ — для моделирования динамики детали, представлен в работах [10, 11].

Однако все упомянутые работы не могут быть адаптированы к моделированию многокоординатной обработки вследствие особенностей применяемых алгоритмов. Этот недостаток был устранен в работах [12–14], где в качестве алгоритма геометрического моделирования использовался метод конструктивной твердотельной геометрии (Constructive Solid-body Geometry, CSG), а для моделирования динамики заготовки — полная конечно-элементная модель.

По мнению же авторов настоящей работы, применение полной конечно-элементной модели детали нерационально ввиду существенных вычислительных затрат и зависимости машинного времени, необходимого для моделирования движения заготовки, от числа степеней свободы модели. Поэтому нами предлагается другой подход, основанный на применении редуцированной динамической модели заготовки.

2. Модель динамики сложнопрофильной обрабатываемой детали. В настоящей работе предлагается использовать конечно-элементную модель заготовки, построенную из 10 квадратичных узловых тетраэдральных элементов. Как известно [15], применение МКЭ приводит к системе линейных дифференциальных уравнений движения относительно вектора узловых перемещений всей конечно-элементной модели:

$$\mathbf{M}_d \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}_d \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}_d \mathbf{q} = \mathbf{f}, \quad (1)$$

где \mathbf{q} — вектор узловых перемещений конечно-элементной модели; \mathbf{f} — вектор узловых сил; $\mathbf{M}_d, \mathbf{C}_d, \mathbf{K}_d$ — матрицы масс, демпфирования и жесткости обрабатываемой детали соответственно.

Движение детали целесообразно моделировать с помощью метода разложения по собственным формам колебаний, что позволяет существенно снизить вычислительные затраты и уменьшить зависимость от числа степеней свободы конечно-элементной модели. При этом допустимо ограничиться несколькими низшими собственными частотами заготовки, перекрывающими с запасом интересующий частотный диапазон возможных технологических вибраций. По опыту авторов, отправной точкой для выбора величины этого запаса является десятикратное превышение максимальной частоты прохождения режущих кромок инструмента через тело детали при моделировании обработки. На первом этапе моделирования движения методом разложения по собственным формам необходимо определить собственные частоты и формы колебаний заготовки. Для решения

этой задачи может быть применен метод итераций подпространства [16], допускающий высокую степень параллельности вычислений

$$\mathbf{K}\mathbf{q} = \omega^2\mathbf{M}\mathbf{q}, \quad (2)$$

где ω — круговая частота колебаний.

Из решения задачи на собственные значения для выражения (2) можно определить несколько первых собственных частот $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ и соответствующие им собственные векторы $\{\mathbf{q}_1\}, \{\mathbf{q}_2\}, \dots, \{\mathbf{q}_n\}$. Относительно небольшие погрешности при определении собственных частот и форм колебаний модели заготовки, допустимые в других расчетах, могут оказывать существенное влияние на моделирование динамики процесса фрезерования в целом и приводить к смещению зон динамической неустойчивости. Поэтому особое внимание следует уделять настройке динамической модели обрабатываемой детали (в равной степени это относится и к динамической модели инструмента) с целью наиболее точного соответствия реальным динамическим характеристикам заготовки.

В настоящей работе для снижения погрешностей моделирования динамики предлагается использовать методику автоматизированной корректировки конечно-элементной модели по результатам экспериментального модального анализа на основе алгоритма эволюционной оптимизации [17].

В силу ортогональности собственных векторов i и j можно записать

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_i^T \mathbf{K} \mathbf{q}_j &= 0, \quad \mathbf{q}_i^T \mathbf{M} \mathbf{q}_j = 0 \quad \text{при } i \neq j; \\ \mathbf{q}_i^T \mathbf{M} \mathbf{q}_i &= m_i, \quad \mathbf{q}_i^T \mathbf{K} \mathbf{q}_i = k_i = \omega_i^2 m_i. \end{aligned} \quad (3)$$

Представим решение уравнения (1) в виде разложения по собственным векторам с неизвестными временными функциями $a_i(t)$, ограничившись учетом n собственных форм:

$$\mathbf{q}(t) = a_1(t)\mathbf{q}_1 + \dots + a_n(t)\mathbf{q}_n. \quad (4)$$

Учитывая соотношения (3), получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений (СДУ) (5) относительно функций $a_i(t)$ [18]:

$$m_i \ddot{a}_i(t) + [c_{i1} \dot{a}_i(t) + \dots + c_{in} \dot{a}_n(t)] + k_i a_i(t) = f_i(t), \quad i = 1, \dots, n, \quad (5)$$

$$c_{ij} = \{q_i\}^T C \{q_j\}; \quad f_i(t) = \{q_i\}^T \{Q(t)\}, \quad (6)$$

где c_{ij} — коэффициент демпфирования модальной модели.

Для того чтобы произвести численное интегрирование, необходимо дополнить систему начальными условиями:

$$a_i(t=0) = \mathbf{q}_i^T \mathbf{M} \mathbf{q}_0 \quad \dot{a}_i(t=0) = \mathbf{q}_i^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{q}}_0,$$

где $\mathbf{q}_0, \dot{\mathbf{q}}_0$ — векторы узловых перемещений и узловых скоростей, определяющие начальные условия.

Следует отметить, что полученная СДУ (5) имеет сравнительно низкий порядок, определяемый количеством рассматриваемых собственных форм и не зависящий от размера конечно-элементной модели (при этом число степеней свободы модели влияет на точность вычисления собственных частот и форм колебаний). Данный подход позволяет избежать больших вычислительных затрат и выгодно отличается от прямого интегрирования уравнений движения полной конечно-элементной модели.

Особенно высока эффективность метода при введении демпфирования как внутреннего трения. В этом случае матрица демпфирования пропорциональна матрице масс и, следовательно, в силу свойств (3) СДУ становится развязанной и состоит из n независимых дифференциальных уравнений второго порядка. Узловые силы, приложенные к конечно-элементной модели, необходимо преобразовывать к силам, приведенным к соответствующим собственным формам колебаний по соотношению (6).

3. Методика учета изменения динамических характеристик заготовки по мере снятия припуска в процессе фрезерования.

Удаление припуска с поверхности заготовки при обработке деталей влияет на текущие динамические характеристики (собственные частоты и формы) обрабатываемой детали и может приводить к существенному снижению точности моделирования движения детали. Для тонкостенных деталей даже в процессе чистовой обработки, когда величина снимаемого припуска невелика, изменение низших собственных частот может превышать $\pm 10\%$, а в процессе черновой обработки — в несколько раз больше. Изменение динамических параметров может оказывать влияние на характер движения системы *инструмент — деталь* и соответственно на параметры качества технологического процесса. Для учета этого эффекта по мере снятия материала в процессе обработки необходимо корректировать конечно-элементную сетку заготовки, опираясь на модель ее поверхности, полученную в рамках алгоритма геометрического моделирования [2, 3]. После корректировки модели прежде, чем продолжить моде-

лирование, необходимо заново рассчитать собственные частоты и формы колебаний. Для ускорения расчета в качестве начального приближения к собственным частотам и формам предлагается использовать соответствующие значения, вычисленные на предыдущем этапе корректировки. Частота корректировки конечно-элементной модели определяется требуемой точностью отслеживания изменения динамических характеристик заготовки по мере снятия материала. В случае обработки лопатки газотурбинного двигателя по винтовой траектории может быть проведено до 20–40 перестроений модели на протяжении всей траектории инструмента.

В настоящей работе предлагается следующий алгоритм перестроения конечно-элементной модели:

исходными данными являются текущая конечно-элементная модель заготовки и текущая геометрическая модель детали, полученная в результате моделирования процесса обработки методом 3MZBL. Иллюстрация, поясняющая работу алгоритма по шагам для двумерного случая, приведена на рис. 1;

на основе геометрической модели, описывающей поверхности и объем заготовки, проводится определение «внешних» узлов конечно-элементной модели, которые располагаются вне материала заготовки в ее текущем состоянии (рис. 1, б). Оставшиеся узлы считаются «внутренними»;

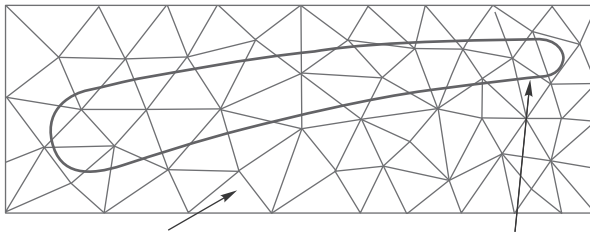
удаление конечных элементов, все узлы которых оказались внешними (на рис. 1, в удаляемые элементы выделены штриховкой);

удаление узлов, которые входят только в удаляемые элементы (удаляемые узлы показаны на рис. 1, в треугольными маркерами). После удаления узлов, требуется осуществить переформирование конечно-элементной модели: составление новой матрицы индексов, координат, а также повторное вычисление матриц жесткости и масс;

определение поверхностных узлов (входящих во внешние грани) новой конечно-элементной модели (показаны маркерами в виде ромбов на рис. 1, г);

определение векторов перемещений поверхностных узлов. Для того чтобы вписать переформированную конечно-элементную модель в текущие контуры детали, требуется задать ее поверхностным узлам перемещения, направленные по кратчайшему расстоянию до поверхности геометрической модели детали (показаны стрелками на рис. 1, г);

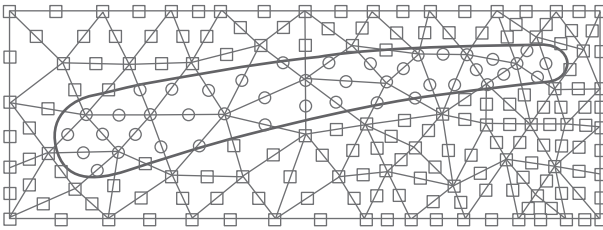
для определения новых положений внутренних узлов конечно-элементной модели, перемещения поверхностных узлов прикладывают к ней как внешнее статическое кинематическое нагружение и решают задачу статики с помощью обычного подхода МКЭ в упругой постановке. После прибавления найденных перемещений узлов



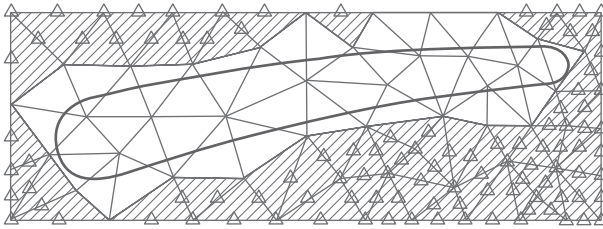
Исходная конечно-элементная модель заготовки

Контур детали, полученный в результате работы геометрического алгоритма

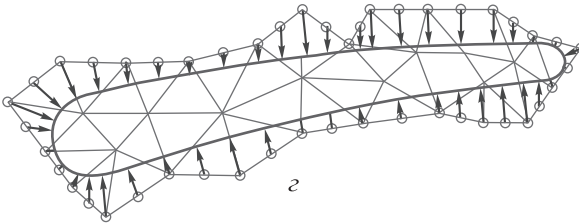
a



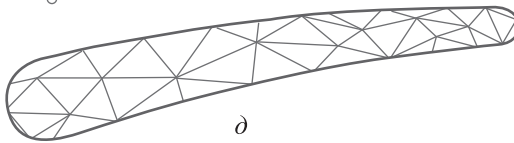
б



в



г



д

Рис. 1. Изменение конечно-элементной модели заготовки по мере снятия припуска в процессе обработки:

a — исходная конечно-элементная и геометрическая модель; *б* — определение внешних (□) и внутренних (○) узлов; *в* — определение удаляемых узлов (△) и элементов (▲); *г* — задание перемещений для поверхностных узлов (◇); *д* — конечно-элементная модель после преобразования

конечно-элементной модели к их координатам находят новую конечно-элементную модель детали с учетом снятия припуска на выбранном этапе маршрута обработки. Такой прием позволяет получить более равномерную сетку конечных элементов и в большинстве практически значимых случаев избежать «перекручивания» отдельных конечных элементов при существенных перемещениях поверхностных узлов (рис. 1, д);

формирование новой динамической модели: составление новых матриц жесткости и масс, вычисление собственных частот и форм колебаний, подготовка к интегрированию уравнений движения в соответствие с п. 2.

Описанный алгоритм без существенных изменений может быть использован и для преобразования трехмерных моделей.

4. Моделирование динамики сложнопрофильной обрабатываемой детали. В качестве примера проанализируем изменение собственных частот и форм колебаний заготовки в процессе обработки пятикоординатным фрезерованием лопатки газотурбинного двигателя. Изображение поверхности лопатки, полученное в результате работы алгоритма геометрического моделирования [1–3], а также траектория обработки и геометрическая модель инструмента представлены на рис. 2.

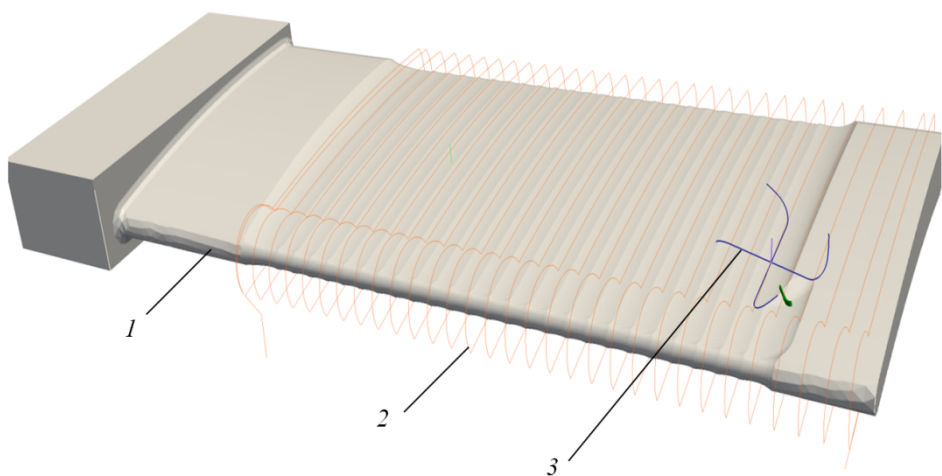


Рис. 2. Поверхность детали (1), траектория обработки (2) и режущие кромки (3) инструмента при моделировании процесса обработки фрезерованием в соответствии с методикой [1–3]

В процессе моделирования обработки в геометрической модели изменяется форма поверхности заготовки. Эти изменения учитываются в конечно-элементной модели (рис. 3) с помощью алгоритма, описанного выше.

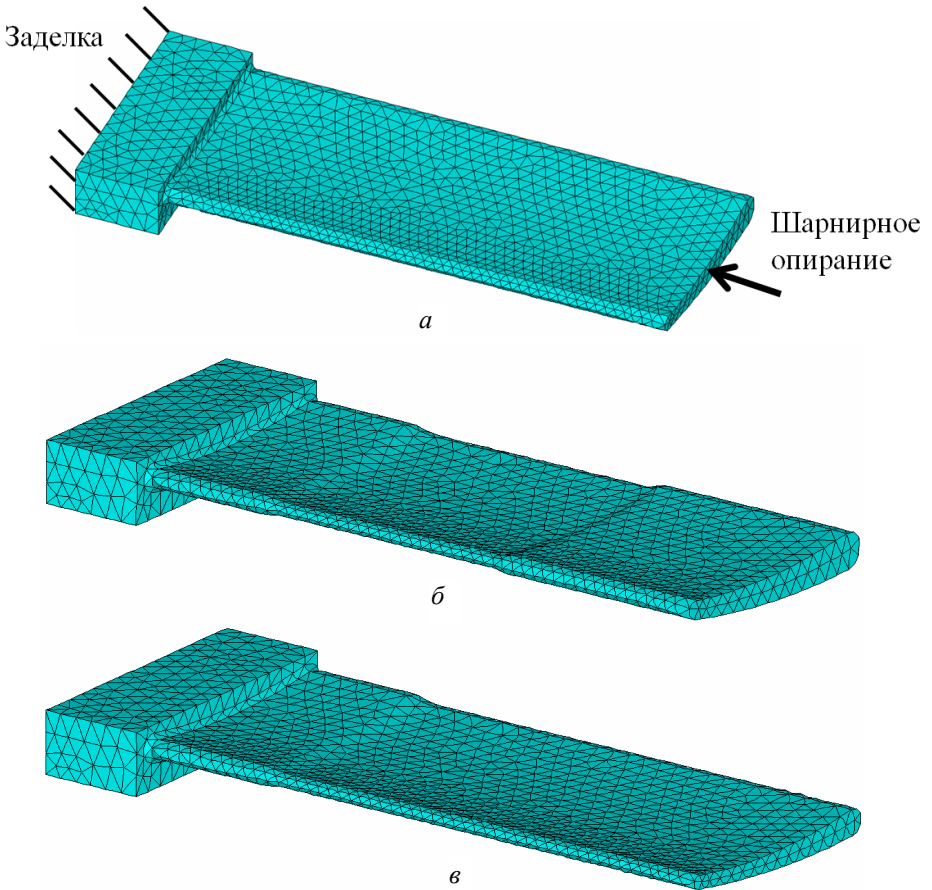


Рис. 3. Перестроение сетки конечно-элементной модели по мере снятия материала в геометрической модели:
a — исходная модель и ее закрепление; *б* — измененная сетка в середине маршрута обработки; *в* — измененная сетка после обработки

Перестроение сетки осуществляется один раз на каждом витке траектории обработки. Таким образом, в данном случае за весь цикл обработки динамические характеристики рассчитываются с учетом изменения геометрии модели более 30 раз. На рис. 3, *a* представлена конечно-элементная модель заготовки и ее закрепления в исходном состоянии, на рис. 3, *б* — в процессе обработки, а на рис. 3, *в* — по ее окончании. Первые пять форм колебаний заготовки в исходном состоянии показаны на рис. 4.

Несмотря на то что абсолютные значения припуска в рассматриваемом примере невысоки, они составляют существенную часть толщины профиля детали, что часто наблюдается при обработке тонкостенных деталей. В результате динамические характеристики заготовки в процессе обработки значительно изменяются. В качестве

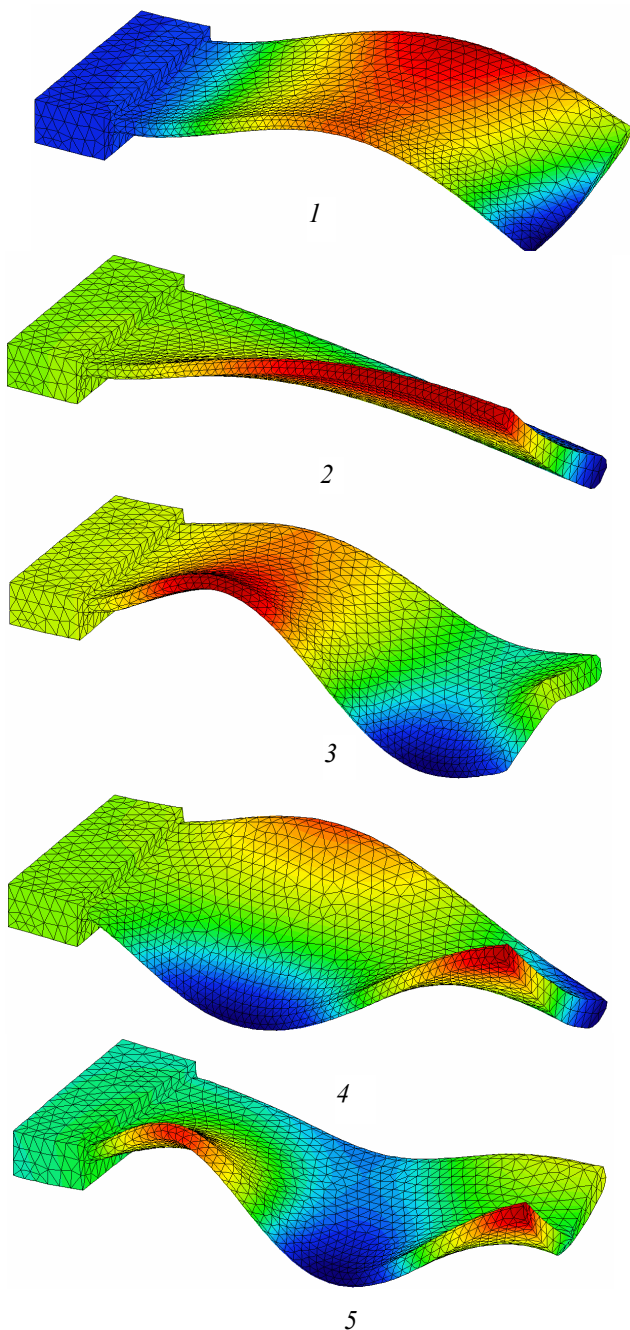


Рис. 4. Первые пять собственных форм колебаний заготовки

иллюстрации данного эффекта на рис. 5 приведены графики изменения первых пяти собственных частот (СЧ) заготовки в процессе обработки, а в таблице — параметры изменения собственных частот в процессе обработки. Их изменение в процессе обработки составляет 15...20 %, что может оказать существенное влияние на процедуру

выбора виброустойчивых режимов фрезерования. Изменение собственных частот заготовки сопровождается изменением форм ее колебаний, при этом в рассматриваемом примере особенно значительно изменяется конфигурация первой и второй собственных форм. К середине маршрута первая и вторая формы колебаний практически «меняются местами», а в конце обработки принимают вид, подобный первоначальному (до обработки), как показано на рис. 6 и 7.

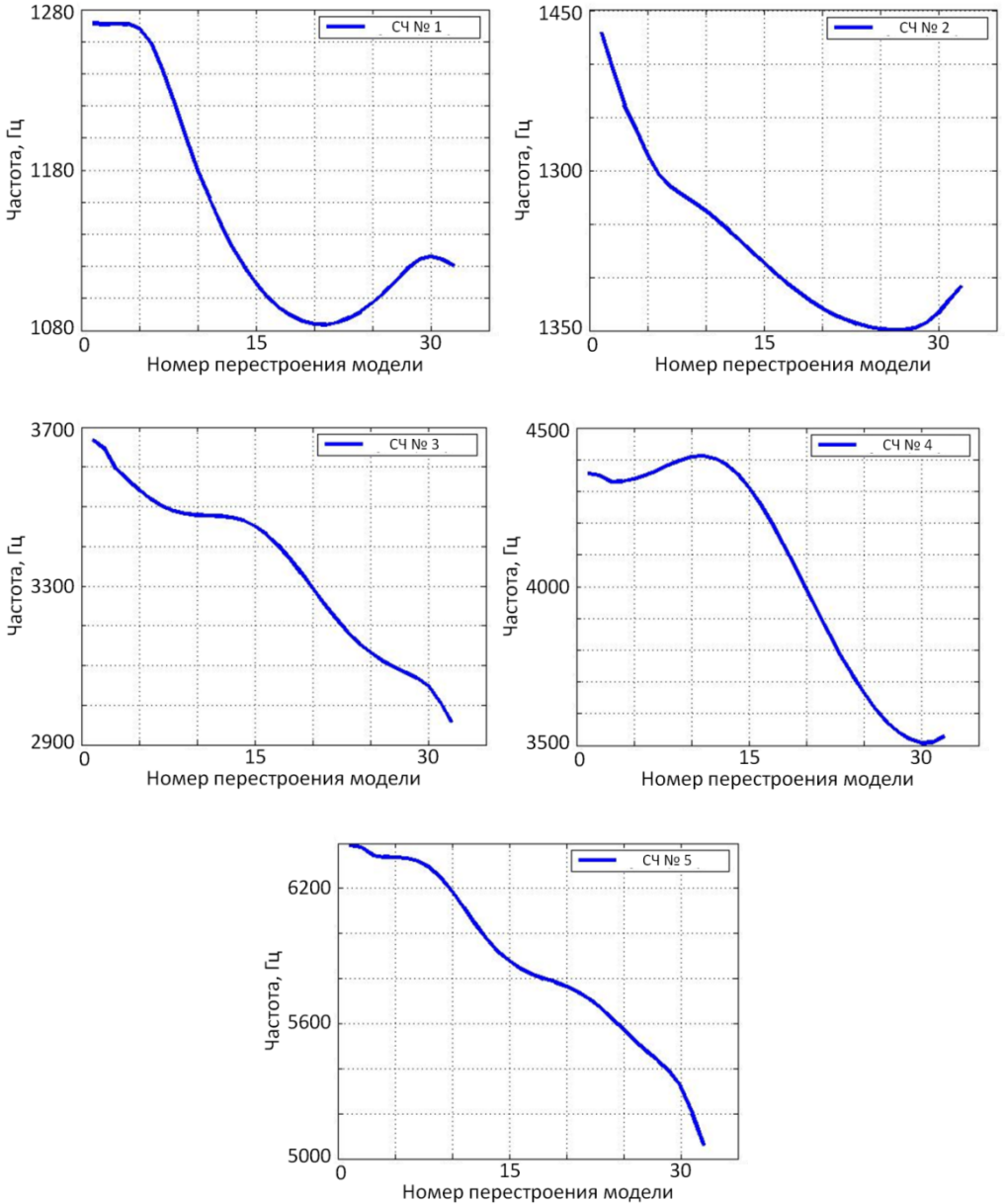


Рис. 5. Изменение пяти низших собственных частот заготовки по мере снятия материала

Степень изменения собственных частот модели заготовки за цикл обработки, Гц

Номер собственной частоты	Значение до обработки	Минимальное значение	Максимальное значение	Изменение частоты, %
1	1271	1084	1271	14,7
2	1429	1151	1429	19,5
3	3667	2953	3667	19,5
4	4357	3507	4411	20,7
5	6393	5054	6393	20,9

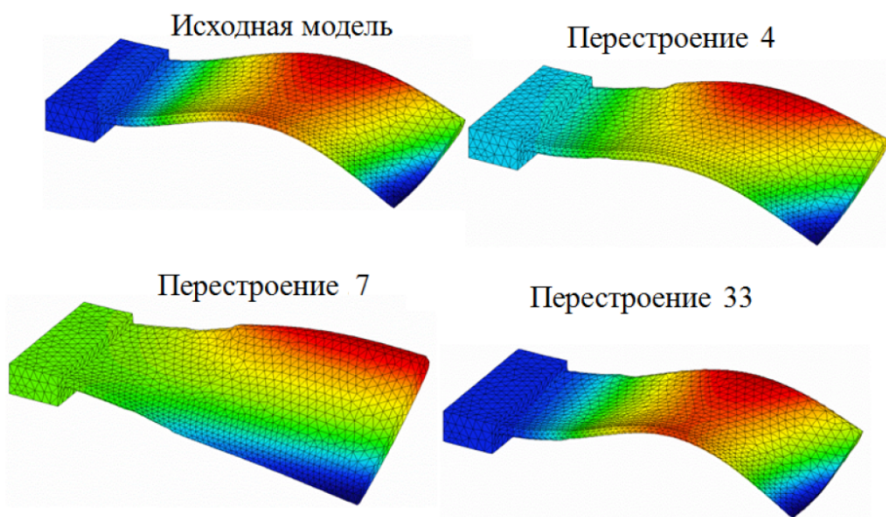


Рис. 6. Изменение первой собственной формы колебаний по мере коррекции модели заготовки

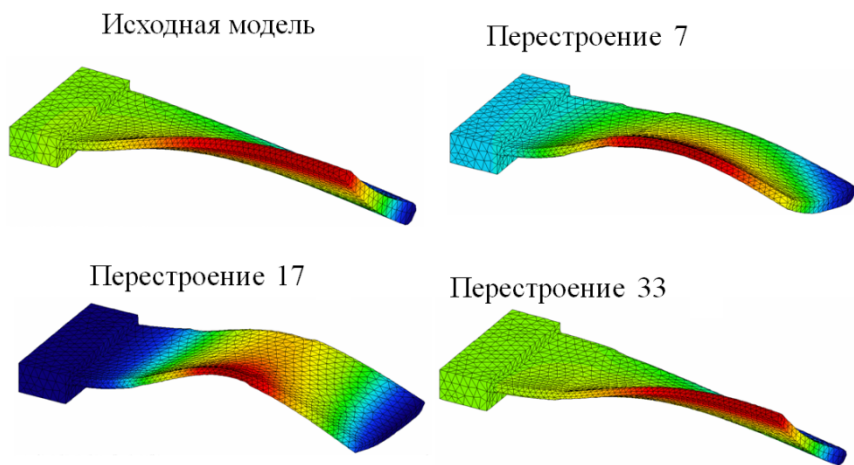


Рис. 7. Изменение второй собственной формы колебаний по мере коррекции модели заготовки

Заключение. Изменение динамических характеристик заготовки в процессе обработки является существенным при обработке тонкостенных деталей, для которых припуск даже на чистовой операции может составлять значительную часть толщины детали. В работе представлена универсальная методика моделирования движения обрабатываемой детали сложной формы с учетом изменения ее динамических характеристик в рамках комплексной имитационной модели процесса пятикоординатного фрезерования. В рассмотренном примере изменение нескольких первых собственных частот заготовки достигает 20 %, что несомненно может оказать критическое влияние на выбор рациональных режимов обработки. Анализ влияния изменения динамических характеристик заготовки на динамику фрезерования авторы надеются представить в одной из своих следующих работ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Воронов С.А., Киселев И.А., Аршинов С.В. Методика применения численного моделирования динамики многокоординатного фрезерования сложнопрофильных деталей при проектировании технологического процесса. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2012, № 6, с. 50–69.
- [2] Киселев И.А. Геометрический алгоритм 3MZBL для моделирования процессов обработки резанием. Методика описания поверхности заготовки. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2012, № 6, с. 158–175.
- [3] 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. Сер. Машиностроение*, 2012, № 6, с. 70–83.
- [4] Altintas Y., Montgomery D., Budak E. Dynamic peripheral milling of flexible structures. *Journal of Engineering for Industry*, 1992, vol. 114, no. 2, pp. 137–145.
- [5] Budak E., Altintas Y. Modeling and avoidance of static form errors in peripheral milling of plates. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1995, vol. 35, no. 3, pp. 459–476.
- [6] Tsai J.S., Liao C.L. Finite-element modeling of static surface errors in the peripheral milling of thin-walled workpiece. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, vol. 94, pp. 235–246.
- [7] Ratchev S. (et al.) Milling error prediction and compensation in machining of low-rigidity parts. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, vol. 44, pp. 1629–1641.
- [8] Bravo U. (et al.) Stability limits of milling considering the flexibility of the workpiece and the machine. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, vol. 45, pp. 1669–1680.
- [9] Thevenot V. [et al.] Influence of material removal on the dynamic behavior of thin-walled structures in peripheral milling. *Machining Science and Technology*, 2006, vol. 10, no. 3, pp. 275–287.
- [10] Arnaud L. (et al.) Simulation of low rigidity part machining applied to thin-walled structures. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, vol. 54, pp. 479–488.
- [11] Paris H., Peigne G., Mayer R. Surface shape prediction in high-speed milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, vol. 44, pp. 1567–1576.

- [12] Weinert K. (et al.) Modeling regenerative workpiece vibrations in five-axis milling. *Production Engineering – Research and Development*, 2008, vol. 2, pp. 255–260.
- [13] Kersting P., Biermann D. Simulation concept for predicting workpiece vibrations in five-axis milling. *Machining Science and Technology*, 2009, vol. 13, no. 2, pp. 196–209.
- [14] 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, pp. 125–128.
- [15] Зенкевич О. *Метод конечных элементов в технике*. Москва, Мир, 1975, 541 с.
- [16] Bathe K.-J. *Finite element procedures*. New Jersey, Prentice Hall, 1996, 1037 p.
- [17] Воронов С.А., Николаев С.М., Киселев И.А. *Расчетно-экспериментальная методика идентификации параметров модели механической системы с помощью модального анализа*. Проблемы механики современных машин: Сб. ст. 5-й Международной науч.-техн. конф. Улан-Удэ, ВСГУТУ, 2012, с. 96–100.
- [18] Еременко С.Ю. *Методы конечных элементов в механике деформируемых тел*. Харьков, «Основа» при Харьк. гос. ун-те, 1991, 273 с.

Статья поступила в редакцию 18.12.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Воронов С.А., Киселев И.А. Исследование влияния снятия припуска в процессе фрезерования на изменение динамических характеристик сложнопрофильной детали. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2014, вып. 2.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/hidden/1199.html>

Воронов Сергей Александрович родился в 1953 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1976 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Прикладная механика», директор НИИ АПП МГТУ им. Н.Э. Баумана, начальник отдела РФФИ. Автор более 50 научных работ в области механики деформируемых тел, динамики процессов обработки резанием, моделирования сложных динамических процессов. e-mail: voronovsa@yahoo.com



Киселев Игорь Алексеевич родился в 1988 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2010 г., ассистент кафедры «Прикладная механика». Автор 17 научных работ. Научные интересы включают вопросы численного моделирования в области механики, разработки параллельных вычислительных программ, методы оптимального проектирования. e-mail: i.a.kiselev@yandex.ru

