

ВЫСОКОСКОРОСТНАЯ ЛЕЗВИЙНАЯ ОБРАБОТКА В МАШИНОСТРОЕНИИ

В.Н. Мирошниченко, доц., канд. техн. наук;
А.С. Бурлаченко, магистрант

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

Аннотация. Показаны достижения технологии машиностроения при использовании высокоскоростной обработки. Рассмотрены условия выполнения процесса и некоторые проблемы внедрения высокоскоростной обработки в практику.

Ключевые слова. высокоскоростная обработка, многооперационные станки, цельный твердосплавный инструмент, технология «Look Ahead».

Анотация. Показані досягнення технології машинобудування при використанні високошвидкісної обробки. Розглянуті умови виконання процесу та деякі проблеми впровадження високошвидкісної обробки в практику.

Ключові слова. високошвидкісна обробка, багатоопераційні верстати, суцільний твердосплавний інструмент, технологія «Look Ahead».

Abstract. Showing achieve mechanical engineering technology with using high-speed machining, considered the conditions of a process and some problems in implementing high-speed machining in practice.

Keywords. high-speed machining, multioperational machines, solid carbide tools, technology «Look Ahead».

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Задачи, выполняемые современными машинами, непрерывно усложняются: возрастают скорости, ускорения, нагрузки, температура, уменьшаются масса, объем, снижаются показатели шума и вибрации. Все это приводит к усложнению конструкции машин, ужесточению требований к точности обработки, шероховатости поверхностей, к применению новых сверхпрочных, жаростойких и специальных материалов. Производство точных деталей требует решения сложных технологических задач, применения новых видов обработки и привлечения для этого как сложной взаимосвязанной техники, так и высококвалифицированных работников в сфере подготовки производства и непосредственно при изготовлении деталей.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью данной статьи является уточнение основных факторов, влияющих на эффективность внедрения высокоскоростной лезвийной обработки (ВСО) при производстве деталей газотурбинных двигателей и редукторов, определение необходимых технических средств и режимов их работы для успешной реализации ВСО в конкретных условиях.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

До недавнего времени точность обработки автомобильных деталей составляла 10 мкм, а у сверхточных деталей — 1 мкм. Сегодня точность возросла до 0,1 мкм, а в некоторых особо точных изделиях, таких как цифровые видеоманитофоны, плееры, приводы жестких дисков компьютеров, — до 0,01 мкм.

Все более широко используются малооперационные гибкие технологии, осуществляется интенсификация процессов механической обработки деталей за счет применения высокопроизводительных режущих инструментов. В настоящее время передовыми фирмами выпускается оборудование, обеспечивающее возможность обработки со скоростями резания 800 м/мин и более.

Экспериментально установлено, что существует некоторая область сверхвысоких скоростей резания, при которых температура в зоне резания перестает увеличиваться, снижается крутящий момент, необходимый для выполнения резания, нагрузка на режущий инструмент уменьшается, а качество обработанной поверхности улучшается. В технологии машиностроения метод лезвийной обработки в данной области скоростей получил название высокоскоростной обработки. Для каждого сочетания обрабатываемого материала и режущего инструмента область ВСО определяется опытным путем.

Высокоскоростная обработка используется во многих отраслях промышленности: электротехнической, электронной, автомобильной, аэрокосмической и др. При реализации данного метода на практике необходимо учитывать его особенности.

В настоящее время передовые фирмы ведут разработки по внедрению и усовершенствованию ВСО. В Исследовательском центре по созданию опытных образцов технологии управления фирмы SIEMENS имеется пятиосевой высокоскоростной обрабатывающий центр, на котором можно обрабатывать детали размером 2200×1100×4500 мм [1]. Существует стандартная тестовая деталь для высокоскоростного фрезерования, разработанная Обществом по созданию числового программного управления (ЧПУ). Шведская фирма SECO TOOLS предложила программу TORNADO по производству инструментов и разработке рекомендаций по выбору режимов резания при ВСО [2, 10].

Для успешного осуществления ВСО необходимы инструмент, способный выдерживать высокие нагрузки в течение длительного времени; станок, обеспечивающий требуемые режимы обработки; система ЧПУ,

которая задает траекторию движения инструмента по управляющей программе (УП) с необходимой скоростью и оптимальными ускорениями.

Инструмент является тем элементом технологической системы, который воспринимает наибольшие силовые и тепловые нагрузки. Он должен обладать высокими твердостью, прочностью, термостойкостью и износостойкостью.

При ВСО большая часть теплоты, выделяемой в процессе резания, сосредоточена в стружке и немедленно удаляется вместе с ней из зоны обработки, при этом фреза и деталь практически не нагреваются. Таким образом, при использовании ВСО появляется возможность с высокой производительностью обрабатывать закаленные конструкционные стали, не опасаясь их термического отпуска. Также возможно на больших подачах обрабатывать состаренные дюралюминиевые сплавы без их термического разупрочнения. При обработке алюминиевых сплавов уменьшение сил резания начинается со скорости резания приблизительно в 700 м/мин, а наиболее эффективная обработка должна проводиться на скоростях порядка 1500 м/мин (25 м/с). При этом оптимальные подачи могут достигать 8000 мм/мин и более.

Особые требования, предъявляемые к режущему инструменту:

- биение не более 0,03 мкм, минимальный вылет и максимальная жесткость;

- возможно минимальная длина контакта с обрабатываемой деталью, что необходимо для снижения риска возникновения вибрации и уменьшения сил резания;

- использование мелкозернистых марок твердых сплавов с многослойным покрытием; наличие специальной геометрии режущей части;

- симметричная форма инструмента, высокая точность и балансировка (2...4 г·мм).

Перечисленным требованиям отвечают далеко не все режущие инструменты. Для ВСО сложных фасонных контуров и поверхностей пресс-форм и штампов, а также для фрезерования с хорошей производительностью закаленных сталей, имеющих высокую

твердость, подойдут цельные твердосплавные концевые фрезы, выпускаемые передовыми фирмами, такими как Sandvik Coromant, HANITA (Израиль), Mitsubishi Carbide (Япония).

Хорошо зарекомендовали себя фрезы компании SECO для высокоскоростной обработки. На рынке инструментов монокристаллический твердосплавный инструмент для ВСО представлен также германо-американской фирмой Kennametal Hertel, немецкой GUNRING, есть и швейцарские компании — Fraisa S.A. и Dihart.

Фирма SECO изготавливает для ВСО цельные концевые фрезы из высококачественного твердого сплава с размером зерна 0,5...0,6 мкм. Твердый сплав — это сплав карбида вольфрама (WC) и кобальта (Co), могут быть добавлены карбид титана (TiC), карбид тантала (TaC), карбид ниобия (NbC). Карбид вольфрама — это основной компонент, он дает твердость, кобальт — связующее вещество, обеспечивающее прочность. Карбиды TiC, TaC, NbC добавляются, чтобы придать термостойкость, химическую стойкость, снизить скорость роста зерен WC.

Добавки типа VC (карбид ванадия) или Cr₃C₂ (карбид хрома) позволяют контролировать рост зерна WC в процессе спекания.

В результате размер зерна составляет менее 1 мкм. Мелкозернистые твердые сплавы используются при обработке жаропрочных сплавов на основе никеля благодаря их возможности работать при температуре до 1200 °С. Добавки рутения в такие сплавы увеличивают и износостойкость, и прочность одновременно.

На поверхности твердосплавных инструментов при ВСО наносят многослойные покрытия, которые увеличивают износостойкость инструмента, обеспечивают диффузионный барьер между твердым сплавом и материалом детали, защищают основу инструмента от окисления при высоких температурах, что позволяет работать с большими скоростями резания [9].

Для ВСО применяют покрытия, нанесенные методом PVD (физическое осаждение из паровой фазы): нитрид титана (TiN), карбонитрид титана (TiCN), титано-алюминиевый

нитрид (TiAlN). Полировка режущего клина инструмента уменьшает шероховатость поверхностей и способствует увеличению износостойкости.

При ВСО применяют концевые фрезы со сферическим концом, с закруглением угла по радиусу или шаровые. Для уменьшения сил резания передний угол принимается большим. Большой объем стружки при ВСО на больших подачах требует достаточного объема стружечной канавки и, следовательно, применения фрез с малым числом зубьев (обычно 2–4). Следует исключать обработку фрезами с радиусами, равными радиусам скругления обрабатываемых поверхностей. Оптимальный радиус внутреннего угла контура детали зависит от радиуса фрезы и принимается по таблице.

Оптимальные диаметры фрез*

Диаметр фрезы, мм	Оптимальный радиус в углу детали
< 2	На 40 % больше
3...6	На 30 % больше
7...12	На 20 % больше
13...32	На 15 % больше

* Рекомендации даны для угла 90°.

Так как при ВСО используются высокие скорости вращения шпинделя, то при малейшем дисбалансе инструмента появляются биения и вибрации, которые могут привести к быстрому износу или возникновению аварийной ситуации, поэтому особое внимание следует уделять зажиму инструмента. Приемлемы следующие варианты крепления инструмента: термооправки, оправки с гидрозжимом и цанговые прецизионные оправки. Опыт показывает, что, несмотря на относительно высокую стоимость, при использовании ВСО целесообразно применять термозажим, обеспечивающий хорошую жесткость, малое биение и простоту при эксплуатации. При периодическом использовании ВСО можно применять гидрозажим, но его асимметричная конструкция может вызвать дисбаланс. Применение для ВСО высококачественной цанги также полностью не исключается, но точность будет зависеть от оператора [2, 3].

Для процесса ВСО характерны высокие скорости резания. Поэтому для обеспечения их станок должен обеспечивать высокую точность и частоту вращения шпинделя, большие скорости подач, высокую жесткость, температурную компенсацию, быстродействие при обработке управляющей программы.

Современные станки с ЧПУ допускают обработку деталей с частотой 18000...40000 об/мин при использовании шпинделя со встроенным мотором (моторшпиндель). При оснащении моторшпинделя датчиками и исполнительными элементами появляется возможность контроля процесса ВСО и регулирования высоких скоростей вращения без ограничений, присущих ременным и зубчатым передачам.

Моторшпиндели работают в широком диапазоне частот вращения, в них используются прецизионные гибридные шарикоподшипники с системой нормированного предварительного натяга, обеспечивающие высокие величины жесткости и допустимых нагрузок. Они имеют кольца из подшипниковой стали и тела качения из нитрида кремния Si_3N_4 подшипникового класса. Такие подшипники способны работать при высоких частотах вращения и в большинстве случаев имеют больший ресурс, чем стальные.

Применение моторшпинделей позволяет уменьшить массу станка, потери энергии, уровни вибраций и шума. Водяное охлаждение моторной части и передней опоры дает возможность получить моторшпиндели с минимальными габаритными размерами [7, 9].

Скорости перемещения исполнительных органов у современных станков повышаются до 50...100 м/мин при использовании линейных двигателей или при комбинации шариковинтовых передач и серводвигателей. Для реализации высоких скоростей линейных перемещений на коротких расстояниях необходимо обеспечить ускорения более 1g. Сегодня такие ускорения достигнуты для шариковинтовых пар, а для линейных двигателей ускорение уже превышает 2g. Основное преимущество линейных двигателей — отсутствие кинематических цепей для преобразования вращательного движения в линейное, что существенно упрощает конструкцию приводи-

мого в движение механизма и повышает его КПД. Кроме того, эти двигатели обеспечивают высокие динамические качества при перемещениях по осям координат независимо от длины перемещения, минимальный шум и высокую точность позиционирования, которая составляет 5 мкм.

Недостатки: высокая стоимость, дорогая эксплуатация, необходимость обильного охлаждения, высокое потребление энергии [6, 9].

Целесообразно применять ВСО при чистовой обработке сложных контуров на пятиосевых многооперационных станках. Такой станок обеспечит доступ к разным сторонам детали с одной установки, дает возможность ориентировать плоские и более сложные элементы детали по нормали к шпинделю и, таким образом, использовать торцевые или концевые фрезы для обработки плоскостей, карманов и отверстий.

На пятиосевых многооперационных станках можно фиксировать поворотный стол (две оси) и выполнять позиционную (так называемую «3+2») обработку. Это позволяет существенно повысить скорость и точность фрезерования: если при непрерывном пятиосевом фрезеровании точность составляет порядка 10 мкм, то при позиционном достижима точность в 5 мкм. Кроме того, оказывается, что длина управляющих программ для непрерывной пятиосевой обработки в среднем на 15 % больше по сравнению с позиционной обработкой. Следствием этого является увеличение на 15...20 % времени непрерывной пятиосевой обработки по сравнению с позиционной. Таким образом, при разработке управляющей программы для повышения точности и производительности следует предпочитать позиционную обработку [2].

Станки для ВСО должны отвечать следующим требованиям [4]: частота вращения шпинделя — 10000 об/мин и выше; скорость программированных подач — от 2,5 м/мин; скорость быстрых ходов — до 90 м/мин; осевое ускорение / замедление >1g; высокая жесткость и термостабильность шпинделя, большой предварительный натяг и хорошее охлаждение подшипников шпинделя; жест-

кая рама станка со способностью поглощать вибрации; возможность установки более совершенных и перспективных систем ЧПУ.

Для достижения высокого качества при обработке сложных сплайсированных траекторий необходимо программировать большое количество малых перемещений. Следовательно, УП будет иметь большое количество кадров, за счет чего размер ее значительно увеличивается и может составлять десятки мегабайт.

В простейших системах ЧПУ размер буферной памяти равен одному кадру, где задано перемещение по одному элементу траектории (чаще всего это отрезок прямой или круговая дуга). Система управления «видит» только один элемент и не «видит» следующий. Чтобы избежать динамического удара при переходе к обработке следующего элемента, система автоматически снижает скорость подачи до минимальной и станок проходит точку перехода на следующий элемент на минимальной скорости. Снижение скорости подачи происходит независимо от характера траектории (гладкая либо с резкими изгибами). На графике С (рис. 1) изображена диаграмма скорости подачи инструмента для систем данного класса.

Из графика видно, что скорость подачи постоянно «прыгает», и даже на прямых участках. Такие системы просты и имеют низкую стоимость. Недостатками являются движение инструмента с рывками, низкое качество обработки, малая скорость обработки сложных контуров.

Системы современного уровня имеют размер буферной памяти более чем на один кадр (500 и более кадров). Это дает возможность выполнять расчеты для торможения на подходе к углу и разгона после поворота, более качественно производить обработку изделий и на более высокой скорости. Такие системы называются системы ЧПУ с технологией «Look Ahead».

Основной параметр, характеризующий качество отслеживания траектории, — это количество элементов траектории, которые система «просматривает вперед», прежде чем принять решение, на сколько необходимо снизить скорость при переходе к следующему ее элементу. Данный параметр на-

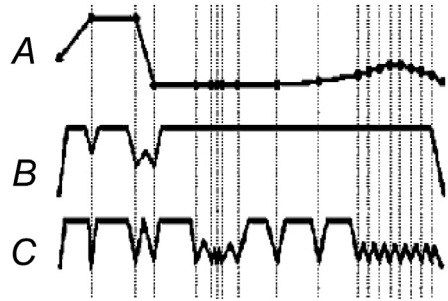


Рис. 1. Графики скорости подачи для простых систем ЧПУ и систем ЧПУ с технологией «Look Ahead» [8]: А — форма фрагмента обрабатываемой траектории; В — графики скорости инструмента при обработке заданной траектории, при работе с системой ЧПУ с поддержкой технологии «Look Ahead» (время обработки траектории А — 3 с); С — график скорости инструмента при обработке заданной траектории, при работе с системой ЧПУ без поддержки технологии «Look Ahead» (время обработки траектории А — 10 с)

зывается «Размер буфера предпросмотра» («Look Ahead buffer»). Чем он больше, тем более сложные изделия можно обрабатывать без потери скорости и качества.

На графике В (см. рис. 1) изображена диаграмма скорости движения инструмента для систем с технологией «Look Ahead». Видно, что скорость не «прыгает» и изменяется только при необходимости, а участки с минимальными изгибами вообще обрабатываются на максимальной скорости, без притормаживания. И, как следствие, значительно повышается скорость обработки.

Максимальную подачу, которую способна обеспечить система ЧПУ, можно определить по формуле:

$$F_{\max} = ((\text{Длина перемещения в кадре}) / (\text{Время обработки кадра})) \times 60.$$

Из приведенного отношения следует, что при перемещениях 0,01 мм и времени обработки кадра 2 мс максимальная подача ограничена значением 0,3 м/мин. А для полноценного осуществления процесса ВСО этого недостаточно, следовательно, время обработки кадра должно быть еще меньше.

Большое ускорение при перемещениях обеспечивает эффективную реализацию высоких скоростей быстрого хода и рабочих подач, а также повышение точности обра-

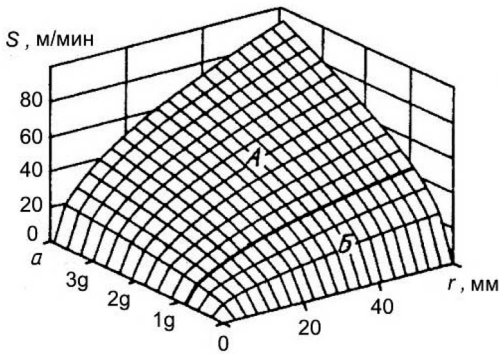


Рис. 2. Зависимость между скоростью подачи S , ускорением a и радиусом r обрабатываемого контура при использовании линейного привода (зона А) и шариковинтовой передачи (зона Б) [11]

ботки при изготовлении деталей, имеющих сложные контуры с малыми радиусами (рис. 2). При ускорении (3...4)g линейный привод позволяет обрабатывать контур с малым радиусом (3...4 мм) при скорости подачи 20 м/мин.

Система ЧПУ и УП для ВСО должна удовлетворять следующим требованиям [1]:

установка скорости с предпросмотром более чем на 100 кадров;

регулирование скорости перемещения вдоль оси без ошибок для достижения высокой точности траектории;

ограничение темпа ускорения по направлению траектории и по направлению оси для защиты станка;

коррекция инструментов (длина, радиус, различные типы фрезы);

автоматизированные функции сглаживания траектории для гладких поверхностей при помощи определенного наложения записей полигонов;

компенсация механически обусловленных ошибок;

безопасная эксплуатация в рабочем пространстве станка в целях охраны труда.

ВЫВОД

Реализация принципов ВСО позволяет достичь более высокого уровня качества лезвийной обработки, что дает возможность исключать некоторые финишные технологические операции, т. е. она предотвращает возможность возникновения дефектов на исключаемых операциях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Воронин, А. Ю. Высокоскоростное фрезерование [Электронный ресурс] / А. Ю. Воронин. — Режим доступа : http://automation-drives.ru/mc/support/archive/press/hsc_ito.pdf.
- [2] Высокоскоростная фрезерная обработка [Текст]. — Л. : НПП «Центр САПР», 2008. — С. 28–31.
- [3] Григорьев С. Н. Инструментальная оснастка станков с ЧПУ [Текст] : справочник / С. Н. Григорьев [и др.] ; под общ. ред. А. Р. Маслова. — М. : Машиностроение, 2006. — 544 с.
- [4] Ловыгин, А. А. Современный станок с ЧПУ и CAD/CAM система [Текст] / А. А. Ловыгин. — М. : Эльф ИПР, 2006.
- [5] Потапов, В. А. Комплекующие элементы станков [Текст] / В. А. Потапов // Машиностроитель. — 1998. — № 9.
- [6] Потапов, В. А. Опыт применения многоцелевых станков с линейными двигателями на фирме Daimler Chrysler [Электронный ресурс] / В. А. Потапов. — Режим доступа: <http://www.stankoin-form.ru/article/line.htm>.
- [7] Сергеева, Е. Высокоскоростная обработка HSC (High Speed Cutting) : современное состояние вопроса [Электронный ресурс] / Е. Сергеева. — Режим доступа: http://www.mashportal.ru/technologies_manufacturing-3143.aspx.
- [8] Технология «Look Ahead» (увеличение скорости обработки и плавности движения) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.instankoservis.ru/lookahead.html>.
- [9] Тренев, Д. Твердый сплав [Текст] / Д. Тренев // Оборудование, разработки, технологии. — 2008. — № 8.
- [10] Цельные концевые фрезы [Текст] : каталог и техническое руководство. — SECO, 2008. — 194 с.
- [11] Черпаков, Б. И. Тенденции развития мирового станкостроения [Текст] / Б. И. Черпаков // СТИН. — 2001. — № 4.