

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ ВАФЕЛЬНЫХ ОБОЛОЧЕК

© 2011 Е.А. Осипова¹, Н.В. Носов²

ФГУП ГНПРКЦ "ЦСКБ-Прогресс", г. Самара, Россия¹
Самарский государственный технический университет²

Поступила в редакцию 10.11.2011

Вафельные оболочки (ВО) представляют собой оболочки цилиндрической, конической и сферической формы, являющиеся основными несущими элементами корпусов специальных изделий. Для большинства ВО материалами служат легкие сплавы на алюминиевой или магниевой основе. В производстве ВО обычно применяют алюминиевый сплав АМг6, упрочненный холодным деформированием (обжатием с нагартовкой) в листах при их прокатке. Иногда применяют термоупрочняемые алюминиевые сплавы 1201, 01420 и другие, механические свойства которых аналогичны свойствам нагартованных сплавов АМг6.

Основным способом обработки ячеек вафельного фона оболочек является механическое фрезерование на специальных фрезерных станках с ЧПУ, обеспечивающих получение заданных в соответствии с конструкторской документацией размеров сетки ребер. При этом заготовка оболочки (лист, плита) может либо иметь заданную форму (цилиндр, конус и т.п.), либо находиться в исходном плоском виде.

В период интенсивного освоения и производства ВО из сплавов АМг6 (с начала 70-х годов) была отработана технология изготовления ВО из плоских заготовок, когда сначала обрабатывались ячейки оболочки, а затем выполнялись операции гибки и сварки. В настоящее время при изготовлении ВО применяют специализированные фрезерные станки типа СВО, позволяющие выполнять фрезерование ячеек оболочки, которой уже придана окончательная форма.

Для конструкции большинства ВО характерно наличие преобладающего числа одинаковых стандартных ячеек, обрабатываемых по командам повторяющихся циклов программы фрезерного станка с ЧПУ. Обработка нестандартных по форме ячеек вафельного фона проводится по отдельно написанным циклам программы.

Типичный цикл фрезерования ячейки складывается из следующих переходов: врезание инструмента на глубину ячейки, выбор основной массы металла ячейки, обход по контуру ячейки, отвод инструмента, переход инструмента к следующей ячейке (рис. 1).

Переход врезания на глубину ячейки может выполняться двумя способами: 1. осевым перемещением фрезерной головки при неподвижной заготовке; 2. комбинированным, состоящим из осевого перемещения фрезы и одной из её рабочих подач (круговой или линейной).

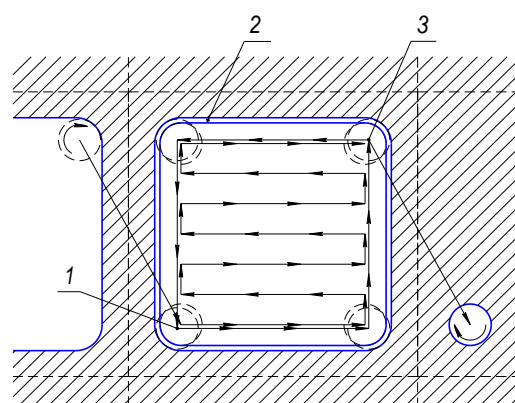


Рис. 1. Типичный цикл фрезерования ячейки: 1 – начало обработки (врезание); 2 – слой обработки по контуру; 3 – конец обработки (отвод фрезы).

Переход выборки основной массы металла ячейки можно осуществлять по различным схемам: фрезерованием «строчками», начиная обработку в одном из углов ячейки, или фрезерованием по схеме «возрастающих квадратов», или раскруткой (рис. 2). Та и другая схема могут быть прерывистыми, с остановками при изменении направления подачи или непрерывными без таких остановок, с плавным изменением направления.

При фрезеровании по строчкам происходит чередование характера подачи, встречной и попутной, при возрастающих квадратах можно установить одну неизменную подачу, встречную или попутную. Обход ячейки по контуру всегда проводится с пониженной подачей и только при попутном фрезеровании.

Этим обеспечивается требование конструкторской документации по допустимым параметрам шероховатости боковых поверхностей ребер. Если глубина ячейки больше 20 мм, применяют разделение проходов по глубине и по контуру на «черновой» и

«чистовой», или на большее число проходов. Обычно для черного прохода применяют фрезы большего диаметра, более жесткие, чем чистовые.

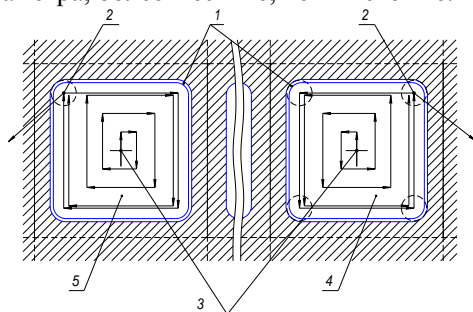


Рис. 2. Циклы обработки ячеек раскруткой:
1 – слой обработки по контуру; 2 – конец обработки; 3 – начало обработки;
4 - попутное фрезерование; 5 – встречное фрезерование.

Типовыми режущими инструментами для обработки ячеек ВО являются концевые твердосплавные фрезы диаметром до 16 мм с числом зубьев 2 или 3.

Маршрутный тех. процесс изготовления ВО с применением специальных фрезерных станков типа СВО содержит следующие основные операции:

- Мех. обработка панели по периметру и толщине(с обеих сторон) на универсальном вертикально-фрезерном станке типа 6625;
- Гибка панелей на четырёх валковой машине типа «Вершина»;
- Термообработка (старение) панелей;
- Правка панелей на прессе ППО-630, обмер;
- Сборка-сварка панелей на установке ЛУЧ-4М;
- Фрезерование вафель на станке типа СВО-22;
- Замер толщины полотна вафель на спец установке типа ИТО-5;
- Механообработка торцов секций на карусельном станке КУ-456;
- Гидроиспытания секций на прочность и герметичность;
- Анодирование секций в специальном стенде.

Изготовление ВО с использованием станков СВО позволяет избежать трудностей, связанных с гибкой плоских вафельных оболочек и получить корпусные детали с точностью по геометрии обводов лучше, чем 1,0мм на 1000мм и точность по толщине полотна и ребер на уровне $\pm 0,1 \dots 0,2$ мм, что удовлетворяет требованиям отраслевого стандарта [1].

Таким образом, технологический процесс основанный на применении станков СВО следует признать основным. В связи, с чем требовалось всестороннее изучение основных влияющих факторов, определяющих точность, производительность и надежность процесса фрезерования вафельного фона.

На основании изучения основных факторов влияющих на точность вертикальных (продольных) ребер, горизонтальных (кольцевых) ребер, а так же на точность толщины полотна были разработаны

рекомендации по повышению точности обработки, которые проверялись экспериментально.

В ходе проведения опытных работ по скоростному фрезерованию разных типов ячеек ВО на станке СВО-23 были получены экспериментальные данные, которые сведены в табл.1. Критерием оптимальности режимов резания являлись:

- выполнение требований конструкторской документации по шероховатости;
- оптимальная нагрузка на шпиндель;
- мин. амплитуда колебаний детали;
- макс. производительность.

Сочетание наилучших показателей перечисленных критериев имели эксперименты под №9. В результате отработки были предложены рекомендации по повышению точности обработки и назначены оптимальные режимы фрезерования табл.2.

Технологический процесс изготовления ВО, построенный на применении станков СВО, можно признать основным и наименее затратным по трудоемкости для получения высокоточных ВО. Использование схемы обработки по спирали с радиусами исключает точки останова фрезы в углах, улучшая условия ее работы. Поэтому, внедрение схемы обработки по спирали с радиусами и назначение рациональных режимов фрезерования в 2,5 раза повысили производительность черного фрезерования типовых ячеек на станках СВО-23 (по сравнению со строчной схемой).

Однако, повышение эффективности механической обработки является важнейшей задачей современного машиностроения, включающей в себя достижение наиболее высокой производительности обработки с обеспечением заданного уровня качества поверхностного слоя деталей. Решение этой задачи может быть достигнуто за счет выбора наиболее рациональных методов обработки деталей, а также за счет обоснования оптимального уровня параметров обработки, обеспечивающих максимальную производительность или минимальную себестоимость. С точки зрения увеличения производительности наиболее актуальной является высокоскоростная обработка (ВСО) с использованием современных станков с ЧПУ, имеющих частоту вращения шпинделя более $20\ 000\ \text{мин}^{-1}$ и подачу от 3000 до 10000 мм/мин. Конечно, при таких режимах используемый станок и инструмент имеют, наряду с подготовкой процесса, разработкой управляющих программ и технологических процессов, существенные особенности. Технология ВСО относится к числу наиболее прогрессивных и быстро развивающихся. Уже сегодня промышленность ведущих стран мира достаточно широко использует ВСО при скоростях резания $500 \dots 1500\ \text{м/мин}$ и более при обработке концевыми фрезами пресс-форм и штампов, изделий из высокопрочных алюминиевых сплавов в аэрокосмической и автомобильной промышленности и др. отраслях машиностроения.

Таблица 1. Результаты экспериментов при черновом фрезеровании

№№ п/п	Вид фрезерования	Режимы резания	Амплитуда колебания детали	Время фрезер. (мин)	Мах ток на шпинделе (А)					
					номера шпинделей					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1.	Попутное, шаг 8	S= 150 мм/мин n=2910 об/мин	од	20'	9	8	8	8	8	8
2.	Встречное, шаг 8	S=150 мм/мин n=2910 об/мин	При S=150-0,1	19' 10"	9	8	7	8	7	8,5
3.	Встречное, шаг 8	S=200 мм/мин n=2910 об/мин	од 0,15 по диагонали в углах	13' 15"	9	8	8,5	8	9	9,5
4.	Встречное, шаг 8	S=250 мм/мин n=2910 об/мин	0,1 по диагонали врезание	11' 30"	11	9,5	10	8,5	8,5	8,5
5.	Встречное, шаг 8	S=300 мм/мин n=2910 об/мин	0,1 по прямой 0,2 в углах 0,3 диагон. Врезание	10' 30"	11	10	10	9	9	9
6.	Попутное, шаг 8	S=150 мм/мин n=2910 об/мин	0,3 диагон. 0,2 низ. горизонт. 0,03 верх 0,15 в углах	14'	9	8	7	8	8	8
7.	Встречное, шаг 16	S=75 мм/мин n=2910 об/мин	0,1 * 0,2	10' 30"	9	8	8	8	8	8,5
8.	Встречное, шаг 16	S=T 12 мм/мин n=2910 об/мин	0,1-5-0,15 в углах 0,2	10' 15"	9	8	8	8	8	8
9.	Встречное, шаг 16	S=135 мм/мин n=2910 об/мин	0,1 в углах до 0,3	8' 40"	9,5	8	8	8	8	9
10.	Встречное, шаг 16	S=1 80 мм/мин n=2910 об/мин	до 0,4	6'	11	9,5	9,5	8,5	9	10

Таблица 2. Оптимальные режимы резания, назначенные в результате отработки

Наименование операции (перехода)	Вид фрезерования	Диаметр фрезы, мм	Расстояние между строчками, мм	Режимы резания			Ширина резания, мм	Примечание
				Обороты, п об/мин	Подача по полотну, S мм/мин	подача по контуру, S мм/мин		
Черновое фрезерование	Встречное	30	16	2910	135	135	30...37	9 При работе 6-ю шпинделями
				2910	180	180	30...37	При работе 1-им шпинделем
Чистовое фрезерование	Попутное	20	8	2910	500	200	3	

Например, при фрезеровании алюминия используются следующие диапазоны скоростей:

- традиционный – менее 500 м/мин;
- высокопроизводительный – 500... 2500 м/мин;
- высокоскоростной – 2500... 7500 м/мин;
- сверхвысокоскоростной – более 7500 м/мин.

Основной принцип ВСО – малое сечение среза, снимаемое с высокой скоростью резания, и соответственно высокие обороты шпинделя и высокая минутная подача.

Одним из важных факторов при ВСО является не только снижение величины крутящего момента в зоне высоких скоростей, но и перераспределение тепла в зоне резания. При небольших сечениях среза в данном диапазоне скоростей основная масса тепла концентрируется в стружке, не успевая переходить в заготовку. Поэтому считается, что высокоскоростное фрезерование базируется на сокращении количества тепла, возникающего при обработке резани-

ем, которое обычно и является причиной износа инструмента.

Исследования, проведенные во время ВСО с правильно подобранными параметрами, показали, что 75% произведенного тепла отводится со стружкой, 20% – через инструмент и 5% – через обрабатываемую деталь. [4].

Ведущие инструментальные фирмы предлагают сегодня широкую гамму режущего инструмента для ВСО с подробными рекомендациями по областям их применения и режимам резания. При выборе режущего инструмента важно обратить внимание и на инструментальную оснастку, обеспечивающую надежное и высокоточное закрепление фрез.

В связи с уменьшением сил резания при ВСО, на качество обрабатываемой поверхности и на износ режущего инструмента большее влияние начинают оказывать биение фрез, вибрации и инерционные нагрузки, соизмеримые с силами резания. Биение инструмента сильно влияет на его износ. Это подтверждается многочисленными экспериментальными

ми данными. Зависимость износа инструмента от его биения при высоких скоростях резания практически линейная. Высокие скорости резания выдвигают высокие требования к балансировке инструмента. Для этого могут использоваться специальные зажимные патроны с возможностью балансировки или предварительно сбалансированные оправки для термозажима. Специально для высокоскоростной обработки спроектированы конусы HSK, которые обеспечивают более высокую жесткость зажима [3]. В России хвостовики HSK стандартизованы ГОСТ Р 51547–2000, имеют укороченный полый конус, особую схему закрепления в шпинделе, повышенную точность изготовления. Статическая податливость хвостовиков HSK в 6...7 раз меньше, чем у хвостовиков с конусом 7: 24 [3].

Интересный эффект увеличения стойкости инструмента при ВСО наблюдается при сравнении способов охлаждения. Как показывает график на рис.3, наибольшая стойкость наблюдается при использовании обдува.

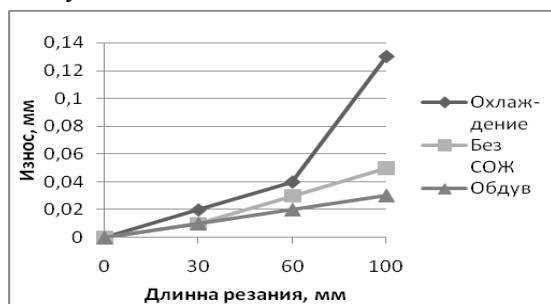


Рис.3. Влияние условий обработки на износ инструмента.

Так как тепло концентрируется в стружке, ее надо просто быстро удалить из зоны резания. Низкая стойкость инструмента при охлаждении с помощью СОЖ объясняется, главным образом, выкрашиванием, вследствие циклических термических нагрузок на режущую кромку инструмента. Постоянная тепловая нагрузка, даже на относительно высоких температурах лучше, чем циклическая меняющаяся тепловая нагрузка.

Преимущество ВСО получается также за счет обработки в надкритическом диапазоне колебаний: при высоких частотах вращения, которые используются при ВСО, значительно превышаются частоты собственных колебаний детали, инструмента и компонентов станка. При этом, благодаря небольшим поперечным сечениям среза, силы резания невелики, что благоприятно сказывается на точности обработки. Кроме того, отмечается высокое качество получаемой поверхности, отсутствие дробления при резании, возможность обработки тонкостенных изделий.

Для снижения динамических нагрузок при ВСО во время резкой смены направления движения инструмента необходимо, чтобы он двигался по гладкой траектории. При наличии углов в траектории дви-

жения инструмента, где изменяется направление движения, он вынужден остановиться. Снижение нагрузки в этот момент вызывает врезание инструмента в тело детали и, как следствие, на поверхности детали остаются следы.

Традиционная строчная обработка, состоящая из многочисленных ходов врезания и выходов инструмента, даже если это сглаженные входы по дуге, также не может быть признана оптимальной для ВСО. Предпочтение должно отдаваться спиральным траекториям движения, где инструмент однажды врезавшись, сохраняет непрерывный и равномерный контакт с заготовкой. Рекомендуются также стратегии эквидистантного смещения контура, которые сохраняют контакт инструмента с заготовкой длительное время с одним заходом и выходом. Это же правило равномерных нагрузок диктует технику обработки внутренних скруглений.

При ВСО надо стремиться исключать обработку фрезами с радиусами равными радиусам скругления на детали. При фрезеровании ячеек, в местах скруглений, как видно на рис. 4, это вызывает резкое увеличение сечения среза и соответственно нагрузки на инструмент, и если он будет ломаться, наверняка он будет ломаться именно в этих местах. Правда, это требует моделировать все радиусы скругления на компьютерной модели, тогда как раньше, экономя время, радиусы не моделировались, а формировались геометрией фрезы.

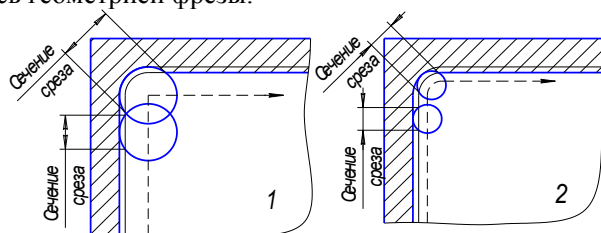


Рис. 4. Стратегии, используемые для фрезерования окон: 1 – стандартная стратегия; 2 – стратегия для ВСО.

Учитывая особенности стратегий обработки, требуется разработка более сложных управляющих программ для станков с ЧПУ. Поэтому САМ-система для ВСО должна обеспечивать:

- широкий набор вариантов гладкого подвода и перебега инструмента между проходами;
- набор стратегий спиральной и эквидистантной обработки зон, как на чистовой, так и на черновой обработке;
- поиск оптимальной стратегии для различных зон обработки;
- автоматическое сглаживание траекторий в углах;
- исключение проходов полной шириной фрезы и автоматическое применение трохоидального врезания в этих местах;

- оптимизацию подач для сглаживания нагрузки на инструмент [3].

В заключение можно сказать, что успех применения ВСО при обработке деталей также зависит и от технолога-программиста, который должен знать все особенности ВСО и хорошо владеть САМ-системой, т.к. сложность программ для высокоскоростной обработки значительно выше, чем при традиционной обработке.

Освоение на предприятии технологий высокоскоростной обработки позволит производить обработку деталей, добиваясь высокой точности расположения и высокого класса чистоты поверхностей, что позволит исключить из технологического процесса дополнительные финишные операции ручной полировки.

Из анализа состояния вопроса фрезерования вафельных оболочек различного вида, являющихся основным несущим элементом корпусов специаль-

ных изделий, следует, что существующая технология обработки требует усовершенствования с целью повышения ее эффективности. Решение этой задачи может быть достигнуто за счет выбора наиболее рационального метода обработки с обеспечением заданного уровня качества поверхностного слоя деталей, а именно – применением высокоскоростной механической обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ОСТ 92-5037-88 «Элементы вафельного фона корпусных деталей. Общие требования технологичности».
2. Технический отчет № 611-046-08 ТО ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс».
3. *Виттингтон К.* Высокоскоростная механообработка / Виттингтон К., Власов В., САПР и графика - 2002.- №11-С.22-26.
4. <http://www.mirprom.ru/News.aspx?id=279>

PROCESS OPTIMIZATION HIGH SPEED MILLING WAFER SHELL

© 2011 E.A.Osipova¹, N.V. Nosov²

State Research and Production Space-Rocket Center "TsSKB-Progress", Samara, Russia¹

Samara State Technical University²