ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОВОРОТНОЙ ФРЕЗЕРНОЙ ГОЛОВКИ ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

EFFICIENCY OF USING A ROTARY MILLING HEAD FOR MACHINING SPHERICAL SURFACES IN THE MANUFACTURE OF ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY

УДК 629

Юдина Е.В., инженер-технолог 1 категории, ЗАО "ЗЭМ" РКК "Энергия"

Yudina E.V. katalinka.k@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрены особенности применения поворотной фрезерной головки для окончательной механической обработки сферических поверхностей деталей, использующихся в ракетно-космической технике. Проведен сравнительный анализ технологии высокоскоростного фрезерования поверхностей в сравнении с другими способами обработки сферических деталей. Уделено внимание повышенным требованиям, предъявляемым к обработке сплавов, используемых в авиакосмической отрасли. Описаны характерные особенности фрезерования сферических поверхностей. Изучена эффективность фрезерования сферических заготовок. Выявлены преимущества использования поворотной головки относительно других технологий обработки деталей.

Annotation. The article discusses the features of the use of a rotary milling head for the final machining of spherical surfaces of parts used in rocket and space technology. A comparative analysis of the technology of high-speed milling of surfaces in comparison with other methods of processing spherical parts is carried out. Attention

is paid to the increased requirements for the processing of alloys used in the aerospace industry. The characteristic features of milling spherical surfaces are described. The efficiency of milling spherical blanks has been studied. The advantages of using a rotary head relative to other technologies for processing parts are revealed.

Ключевые слова: поворотная фрезерная головка, высокоскоростное фрезерование, обработка сферической поверхности, твердое резание, эффективность механической обработки.

Keywords: rotary milling head, high-speed milling, spherical surface treatment, hard cutting, machining efficiency.

В ракетно-космической технике широко применяются детали конструкции, имеющие сферическую или полусферическую поверхность. Требования к качеству обработки таких поверхностей весьма высоки.

Поверхность сферы на использующихся в ракетно-космической техники деталях зачастую имеет высокую твердость. При обработке таких поверхностей предъявляются повышенные требования к точности, износостойкости и режущим свойствам инструмента [1].

Для обработки сферических поверхностей используются разнообразные методы резания, включая лезвийные, абразивные, электрохимические [2]. По ряду параметров лезвийные методы предпочтительнее альтернативных [3, 4]. Среди лезвийных методов резания более перспективными представляются технологии фрезерной обработки сферических поверхностей [3, 5].

Сравнение фрезерования и других методов обработки сферических поверхностей

Для абразивной обработки сферических деталей характерен ряд существенных недостатков, включая шаржирование поверхности абразивными зернами, снижающее долговечность изделия [3, 4]. Лезвийная обработка обеспечивает более высокие показатели производительности и точности. При использовании высокоскоростного фрезерования исключаются прижоги, шаржирование, насыщение поверхности химическими соединениями [3].

Вследствие применения твердого резания вместо шлифования уменьшается трудоемкость процесса изготовления деталей и повышается экономичность их обработки. Повышение экономичности объясняется рядом факторов:

– уменьшением при твердом резании объема снятого материала в 3 раза в сравнении со шлифованием;

– снижением в несколько раз времени обработки деталей;

– удешевлением процесса утилизации стружки в сравнении с утилизацией отходов от шлифования;

– отсутствием необходимости использования смазочно-охлаждающих жидкостей [4].

При этом точность обработки деталей при твердом резании аналогична методу шлифования.

Дополнительный плюс состоит в том, что обработку сферических деталей твердым резанием можно выполнять на тех же станках, на которых выполняется обработка других заготовок в т.ч. незакаленных. В результате повышается универсальность и гибкость процессов обработки.

За счет всех перечисленных факторов твердое резание в большинстве случаев повышает экономичность обработки деталей в сравнении со шлифованием примерно на 30–50% [4].

Для обработки сферических поверхностей деталей используются также токарные станки, в т.ч. с ЧПУ. Распространенными методами такой обработки являются:

1) врезания с использованием фасонного резца;

2) совмещения двух подач с использованием контурного резца на станках с ЧПУ.

Производилось сравнение производительности обоих способов обработки с фрезерованием сферической поверхности методом совмещения двух вращений. В результате эксперимента установлена более высокая

производительность обработки сферической заготовки фрезерованием в сравнении с двумя другими методами [5].

Для фрезерования сферических поверхностей характерно важное преимущество, отличающее его от других методов обработки: точность формообразования поверхности сферы определяется кинематикой процесса, включающей точность траектории совместного движения заготовки и режущего инструмента.

Благодаря этому появляется возможность получения сферических поверхностей более высокой точности и качества, чем при других методах обработки (в которых точность формообразования зависит от профиля инструмента и точности поворотного приспособления) [5].

Для твердого точения сферических поверхностей целесообразно использовать фрезерные головки с пластинами из режущей керамики, кубического нитрида бора [4] или карбидных сплавов [1]. Керамические детали дешевле, но хуже воспринимают нагрузки ударного характера [4].

Обработка сферических деталей методом безвершинного резания

Рассмотрим характерный пример использования фрезерной головки для окончательной обработки сферической заготовки твердым резанием. Этот процесс производится после предварительных операций по обработке поверхности.

В описанном примере применяется составная головка с четырьмя механически закрепленными минералокерамическими пластинами. Благодаря квадратной форме пластин обеспечивается прямолинейная форма режущих кромок. Это позволяет эффективно применять безвершинное резание для окончательного формирования поверхности сферы.

В качестве материала для пластин была выбрана оксидокарбитная керамика ВОК-60. Высокая технологичность и заданная точность работы фрезы обеспечивается особенностями ее конструкции. Головка состоит из оснащенного цилиндрическим хвостовиком корпуса, вкладыша, пластин и специального узла крепления из винта и клина [4].

При обработке поверхности фреза перемещается по направлению, перпендикулярному оси заготовки. Одновременно осуществляется вращательное движение фрезы, обеспечивающее резание с установленной скоростью. Заготовка при этом тоже совершает вращательное движение, осуществляя тем самым круговую подачу.

Процесс обработки детали для формирования окончательной сферической поверхности состоит из трех фаз.

1. Фреза подводится к детали до касания ее зубьями, которые расположены перпендикулярно оси заготовки.

2. Фреза продолжает перпендикулярное движение, во время которого происходит врезание в заготовку. Основная часть работы при этом выполняется вспомогательной режущей кромкой. Часть материала срезается главной кромкой. По окончании этой фазы с торца сферы практически полностью снимается припуск h.

3. На следующей фазе фреза перемещается на расстояние a, при котором формируется сфера радиусом R. При этом основную работу выполняет главная режущая кромка [4].

Вспомогательные режущие кромки и вершины режущих пластин при этом не оказывают непосредственного влияния на полученные размеры сферы и качество поверхности. Описанная схема вполне соответствует технологии безвершинного (или бреющего) резания.

Для безвершинного резания характерен ряд особенностей и преимуществ:

– работа фрезы осуществляется согласно принципу свободного резания, при этом материал срезается только прямолинейной главной режущей кромкой (вершины пластин и вспомогательные кромки не участвуют в работе);

– благодаря отсутствию вершины повышается стойкость режущей кромки;

– толщина срезаемого слоя уменьшается в сравнении с обычным резанием; это дает возможность увеличить величину подачи;

– обеспечивается сниженная шероховатость поверхности.

При настройке процесса обработки сферической поверхности поворотной фрезерной головкой основным настраиваемым параметром является величина a. Она определяется по следующей формуле:

$$a = \sqrt{R_1^2 - b^2} - \sqrt{R^2 - b^2}.$$

Здесь R_1= R + h, где

R – радиус обработанной сферы;

R_1 – радиус сферы заготовки;

h – величина припуска на обработку;

b – расстояние от края сферы со стороны опоры до ее оси [4].

Обработка сферических деталей с помощью высокоскоростного охватывающего фрезерования

При обработке детали методом высокоскоростного охватывающего фрезерования инструмент вращается с высокой скоростью N_1 от 3000 об/мин и выше. Заготовка сначала перемещается в рабочее положение. После врезания в нее лезвий инструмента ей придается вращательное движение вокруг своей оси (частотой N_2). После одного оборота заготовки вследствие высокоскоростного вращения инструмента осуществляется полная обработка поверхности сферы [5].

Перед обработкой сферы диаметром d и высотой h нужно предварительно настроить инструмент на диаметр D, который определяется следующим образом:

$$D = \sqrt{d * h}.$$

Ось заготовки устанавливается относительно оси инструмента на угол $90^o + \beta$, где

$$\beta = \arccos \sqrt{\frac{h}{d}}.$$

За один оборот фрезы осуществляется ее подача величиной S_0 по окружности длиной $L = \pi d$. Для полной обработки заготовки потребуется N оборотов фрезы, при этом

$$N = \frac{L}{S_0} = \frac{\pi d}{S_0}.$$

Поскольку за N_1 оборотов инструмента осуществляется N_2 оборотов заготовки, получаем

$N_2 = \frac{N_1}{N}$, следовательно

$$N_2 = \frac{N_1 S_0}{\pi d}.$$

Минутная подача S_m соотносится с подачей на оборот следующим образом:

$S_m = S_0 N$.

Поскольку при увеличении скорости резания возрастает и мощность резания, при высокоскоростной обработке одновременно с увеличением частоты вращения уменьшают величину подачи на оборот. Минутная подача в этом случае растет за счет увеличения скорости и роста количества оборотов.

Анализ зависимости производительности обработки поверхности заготовки от частоты вращения (учитывая изменение подачи) показал следующие закономерности. При возрастании частоты вращения увеличивается производительность. С достижением скорости порядка 15000 об/мин рост производительности становится незначительным [5].

Поскольку при увеличении скорости резания увеличиваются и силы резания, для их снижения необходимо уменьшать подачу. Однако величина подачи является важным фактором, влияющим на качество обработки поверхности. Поэтому к значительному увеличению скорости резания при высокоскоростной обработке необходимо подходить достаточно осторожно.

Некоторые особенности обработки сферических деталей фрезерованием

Ввиду значительного повышения скорости резания при фрезерной обработке сферических деталей в сравнении с традиционной (в десятки раз) существенное значение приобретает решение целого ряда задач, включая: выбор рациональной скорости; обеспечение оптимальной геометрии режущих

кромок, благоприятных параметров стружкообразования и деформации в зоне резания; снижение теплового воздействия на поверхность заготовки, увеличение точности, уменьшение шероховатости, повышение износостойкости инструмента [3].

Проведенные исследования показали, что показатели деформации срезаемого слоя (коэффициент утолщения стружки, коэффициент уширения, относительный сдвиг) соответствуют либо имеют меньшие значения в сравнении с другими видами обработки деталей. Это свидетельствует о достижении более благоприятных условий деформации срезаемого слоя при использовании фрезерования сферических деталей [3].

При обработке детали фрезерованием был зафиксирован ее нагрев на 60–120 °С. Столь небольшой нагрев свидетельствует, что в поверхностных слоях лезвия инструмента и заготовки не происходит значительных структурных либо фазовых превращений. Отсутствуют и изменения остаточных напряжений. Все перечисленное способствует высокому качеству обработки сферической поверхности [3].

Аналогичный вывод позволяет сделать измерение шероховатости детали. После фрезерования величина шероховатости сферической поверхности составляет 0,6–1,2 мкм. Это существенно ниже, чем при обработке аналогичной детали на токарном станке с ЧПУ (1,6–6,3 мкм). Более низкие показатели шероховатости достигнуты при увеличении скорости вращения фрезы и снижении частоты вращения заготовки [3].

Отклонение размеров сферы при фрезеровании составило 0,01–0,21 мм. Причем с увеличением диаметра сферы и скорости вращения заготовки величина отклонения снижается. Для повышения точности необходимо уменьшить величину угловых отклонений между осями вращения фрезы и заготовки до значений 15–30 мин [3].

Установлено также, что качественная обработка деталей фрезерованием обеспечивается при более высоких уровнях износа режущего инструмента, чем при обработке на токарном станке.

Выводы

Для обработки сферических деталей с помощью высокоскоростного фрезерования характерен ряд преимуществ в сравнении с использованием токарных станков с ЧПУ:

– уменьшение шероховатости;

– уменьшение деформации срезаемого слоя;

– увеличение диапазона допустимых значений износа лезвия;

– повышенная точность формообразования детали.

При этом температурные показатели, уровень вибрации и незначительное повышение мощности резания находятся в диапазонах допустимых значений, обеспечивающих комфортное резание заготовки [3].

Заключение

Были рассмотрены способы обработки высокоскоростным фрезерованием применяющимися в ракетно-космической технике деталей со сферическими поверхностями. Показан ряд преимуществ описанных технологий в сравнении с другими видами обработки сферических поверхностей (шлифованием, химическим резанием, использованием токарных станков). Продемонстрирована более высокая точность, производительность и экономичность фрезерования с получением более качественной сферической поверхности детали.

Литература

1. Мак И.Н., Попов Д.Н., Савин Д.И., Вайлов А.В., Амельченко Н.А. Оценка стойкости режущего инструмента при фрезеровании труднообрабатываемых материалов. // Решетневские чтения. 2017. С. 515–536. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-stoykosti-rezhuschego-instrumenta-pri-frezerovanii-trudnoobrabatyvaemyh-materialov
2. Родин П.Р. Основы формообразования поверхностей резанием. Киев.: Вища школа, 1977.
3. Попок Н.Н., Хмельницкий Р.С., Анисимов В.С., Гвоздь Г.И. Комплексные исследования физических и технологических характеристик процесса обработки сферических поверхностей деталей. // Вестник Белорусско-

Российского университета. Машиностроение. 2017, №2 (55). С. 87–96. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/kompleksnye-issledovaniya-fizicheskih-i-tehnologicheskih-harakteristik-protsessa-obrabotki-sfericheskih-poverhnostey-detaley

4. Иванов Ю.В., Скорская Ю.Н., Глухов Н.М. Фрезерование сферической поверхности фрезерной головкой. // Инженерный вестник Дона. Электронный научный журнал. 2019, №7. URL: http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2019/6077
5. Хмельницкий Р.С. Исследование процесса обработки сферических поверхностей деталей способом охватывающего фрезерования. // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. 2007, № 8. С. 53–58. URL: http://elib.psu.by:8080/handle/123456789/25217

Literature

1. Mak I.N., Popov D.N., Savin D.I., Vailov A.V., Amelchenko N.A. Evaluation of the tool life when milling difficult-to-machine materials. // Reshetnev readings. 2017.S. 515–536. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-stoykosti-rezhuschego-instrumenta-pri-frezerovanii-trudnoobrabatyvaemyh-materialov
2. Rodin P.R. Fundamentals of surface shaping by cutting. Kiev .: Vischa school, 1977.
3. Popok N.N., Khmelnitskiy RS, Anisimov V.S., Nail G.I. Comprehensive studies of the physical and technological characteristics of the processing of spherical surfaces of parts. // Bulletin of the Belarusian-Russian University. Mechanical engineering. 2017, No. 2 (55). S. 87–96. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/kompleksnye-issledovaniya-fizicheskih-i-tehnologicheskih-harakteristik-protsessa-obrabotki-sfericheskih-poverhnostey-detaley
4. Ivanov Yu.V., Skorskaya Yu.N., Glukhov N.M. Milling a spherical surface with a milling head. // Engineering Bulletin of Don. Electronic scientific journal. 2019, no. 7. URL: http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2019/6077

5. Khmelnitsky R.S. Investigation of the processing of spherical surfaces of parts by the method of enveloping milling. // Bulletin of Polotsk State University. Series B, Industry. Applied Sciences. 2007, No. 8. P. 53–58. URL: http://elib.psu.by:8080/handle/123456789/25217