

СРАВНЕНИЕ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ И СПИРАЛЬНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ В ТИТАНОВОМ СПЛАВЕ

Сверление отверстий в титановом сплаве ВТ-3 является сложной задачей ввиду его плохой обрабатываемости. Путем сравнения осевого усилия, шероховатости поверхности и диаметральной точности отверстия проводится оценка эффективности процесса спирального фрезерования с обычным процессом сверления. Отверстия, созданные с помощью спирального фрезерования, имеют высокое качество поверхности при более низкой осевой подаче, в то время как процесс сверления сопровождается более высокой осевой подачей, что приводит к вибрации режущего инструмента. При изготовлении высокоточных отверстий в элементах топливно-регулирующей аппаратуры рекомендуется применять винтовое фрезерование.

Ключевые слова: сверление, титановые сплавы, винтовое фрезерование, шероховатость, производительность.

Введение. Такие свойства, как высокое отношение прочности к весу, усталостная долговечность, предел текучести, относительно высокая устойчивость к коррозии и температурам, являются уникальными для титановых сплавов, что позволяет применять их во многих отраслях промышленности. Однако обработка титановых сплавов сопряжена с рядом проблем. Титановые сплавы демонстрируют очень плохую обрабатываемость из-за их высокой реакционной способности и преждевременного выхода из строя режущего инструмента. Кроме того, низкие характеристики теплопроводности являются причиной быстрого повышения температуры в зоне резания и массивного прилипания материала, что приводит к изменению фактических углов резания и снижению стойкости режущего инструмента.

С точки зрения производственного процесса, обычное сверление имеет несколько недостатков: непрерывный контакт рабочего инструмента приводит к увеличению осевой силы резания и чрезмерному выделению тепла. Высокая скорость резания приводит к поломке режущей кромки инструмента и образованию крупных заусенцев на выходе из отверстия [1].

В последнее время винтовое фрезерование стало альтернативой обработки отверстий в труднообрабатываемых материалах. Было отмечено, что этот процесс позволяет создавать отверстия с высоким качеством поверхности. Величина силы резания при винтовом фрезеровании обычно значительно ниже, даже при обработке жаропрочного сплава на основе никеля.

Учитывая трудности, связанные со сверлением отверстий в титановых сплавах, исследователи изучили полезность процесса спирального фрезерования. Внедрение процесса спирального фрезерования позволило снизить силы резания и улуч-

шить чистоту поверхности титанового сплава [2]. Аспекты износа инструмента во время винтового фрезерования были проанализированы с учетом кинематики процесса. Результаты показали, что основными механизмами износа, приводящими к поломке инструмента, являются выкрашивание, диффузия и окисление режущей части инструмента [2]. Использование инструмента с покрытием TiAlN помогает увеличить срок его службы и улучшить качество фрезеруемой поверхности. Было обнаружено, что спиральное фрезерование титанового сплава с использованием тонкой концевой фрезы может приводить к низкой точности размеров из-за деформации инструмента [2].

Высокая скорость резания ухудшала качество поверхности из-за термических повреждений, вызванных повышенными температурами резания. При этом повышение температуры резания приводит к адгезионному и диффузионному типам изнашивания [3].

Важно отметить тот факт, что, ввиду различия метода формообразования, получение прецизионных отверстий путем винтового фрезерования возможно на станках с ЧПУ повышенного и высокого класса точности. Возникновение рассогласований приводов или иных геометрических погрешностей оборудования может внести существенный вклад в отклонение формы. Методика определения причины конкретной ошибки представлена в [4].

При анализе зарубежной литературы [5, 6] видно, что процесс винтового фрезерования подходит для обработки отверстий в труднообрабатываемых материалах. Но сообщения, касающиеся спирального фрезерования титановых сплавов, ограничиваются в основном анализом достигаемого качества отверстий либо экономическим аспектом внедрения [7]. Наличие в открытом доступе всестороннего исследования, сравнивающего процесс сверления

Параметры эксперимента и расчетное время обработки

№	Скорость резания (м/мин)	Осевая подача при сверлении (мм/зуб)	Осевая подача при фрезеровании (мм/зуб)	Тангенциальная подача при сверлении (мм/зуб)	Время обработки, сверление (с)	Время обработки, фрезерование (с)
1	20	0,015	0,2	0,075	88	90
2	20	0,03	0,35	0,075	52	52
3	20	0,045	0,5	0,075	40	50
4	40	0,015	0,2	0,075	52	54
5	40	0,03	0,35	0,075	34	32
6	40	0,05	0,5	0,075	28	29
7	60	0,02	0,2	0,075	40	41
8	60	0,035	0,35	0,075	28	26
9	60	0,015	0,5	0,075	24	24
10	80	0,05	0,2	0,075	23	23
11	80	0,03	0,35	0,075	20	21
12	80	0,045	0,5	0,075	16	18

со спиральным фрезерованием титанового сплава, все еще ограничено.

Таким образом, необходимо провести подробное исследование, чтобы проанализировать характеристики винтового фрезерования и выявить его преимущества по сравнению с обычным процессом сверления. Так, в настоящем исследовании отверстия в титановом сплаве ВТ-3 обрабатывались методом сверления и винтового фрезерования.

1. Постановка задачи. Для сравнения были обработаны отверстия диаметром 6 мм на пластине из титанового сплава ВТ-3 толщиной 10 мм. Отверстия обрабатывались на трехосевом ЧПУ с максимальной скоростью вращения шпинделя 8000 об/мин. Эксперименты по сверлению проводились с использованием цельных твердосплавных сверл диаметром 6 мм, а операция спирального фрезерования выполнялась с использованием концевых фрез с четырьмя канавками диаметром 5 мм.

Осевое усилие измерялось с помощью датчика, установленного на станке с ЧПУ. Шероховатость поверхности отверстия измеряли с помощью профилометра. Шероховатость поверхности измеряли в шести точках и рассматривали среднее значение. Шероховатость поверхности измерялась с помощью оптического микроскопа.

Отклонение размеров обрабатываемого отверстия измерялось с помощью координатно-измерительной машины (КИМ). В табл. 1 представлены входные и выходные данные проведенных экспериментов.

2. Проведение эксперимента.

2.1. Анализ осевой силы, полученной при обработке титанового сплава.

Высокая осевая сила может привести к деформации инструмента, вибрации и повлиять на диаметрально точность и качество обрабатываемых поверхностей [3]. Поэтому анализируется осевая сила, получаемая при сверлении и винтовом фрезеровании: рис. 1 показывает графики, сравнивающие осевое усилие, полученное при сверлении и винтовом фрезеровании.

Более высокое значение осевой силы при сверлении связано с принципом обработки и конструкцией спиральных сверл, неизбежно имеющих пере-

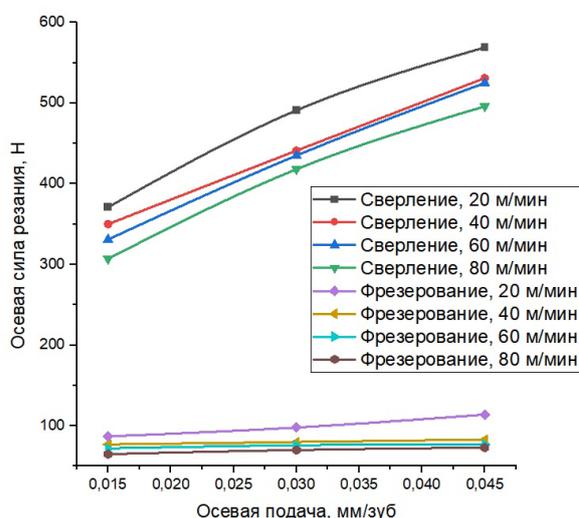


Рис. 1. Значения осевой силы при сверлении и спиральном фрезеровании отверстия в заготовке из титанового сплава ВТ-3

мычку. Чрезмерная пластическая деформация при обработке титановых сплавов приводит к наклепу. При винтовом фрезеровании удаление материала происходит путем сдвига. Кроме того, использование торцевой и диаметральной режущей части равномерно распределяют режущую нагрузку, поэтому при винтовом фрезеровании осевое усилие ниже. Меньшее осевое усилие особенно важно при обработке сквозных отверстий в тонких нежестких элементах деталей.

Для обоих процессов осевая сила уменьшается по мере увеличения скорости резания с 20 до 80 м/мин. При более высоком значении скорости резания (80 м/мин) материал подвергается чрезмерной пластической деформации, что приводит к повышению температуры обработки. Из-за высокой температуры обработки материал подвергается термическому размягчению, что снижает величину осевой силы тяги [3]. Осевая сила увеличивается

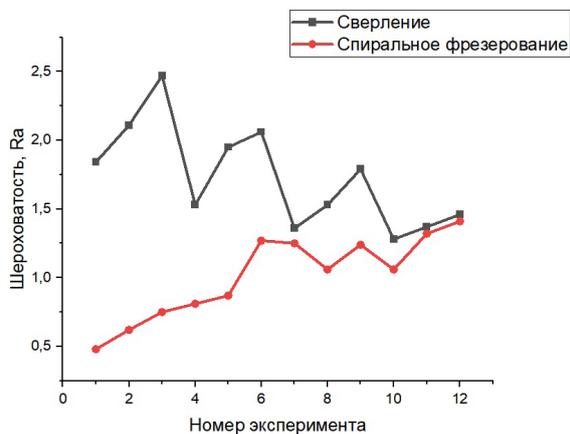


Рис. 2. Значения шероховатости обработанной поверхности при сверлении и спиральном фрезеровании отверстия в заготовке из титанового сплава ВТ-3

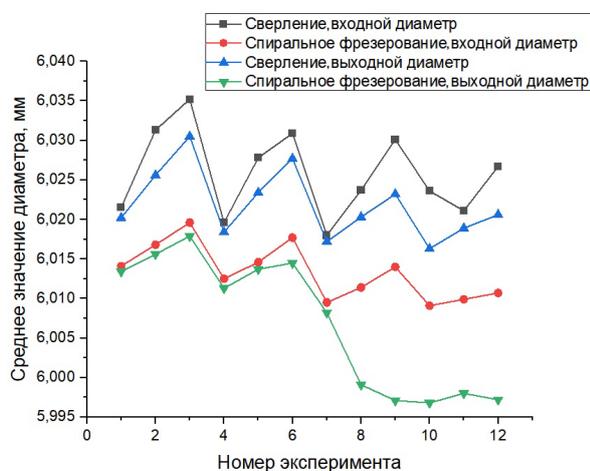


Рис. 3. Значения диаметра обработанной поверхности при сверлении и спиральном фрезеровании отверстия в заготовке из титанового сплава ВТ-3

с увеличением значений осевой подачи, так как при более высоких значениях осевой подачи увеличивается толщина стружки, что приводит к увеличению значения осевой силы. Величина осевой силы максимальна при наибольшей подаче при сверлении (0,045 мм/об) и винтовом фрезеровании (0,5 мм/об). Сравнение полученных значений показывает, что осевая сила при сверлении в несколько раз выше, чем при спиральном фрезеровании.

2.2. Анализ шероховатости поверхности, полученной при обработке титанового сплава.

Качество обработанной поверхности является важным параметром, определяющим функциональность полученных деталей в сборном узле при динамической нагрузке. Осмотр показал более высокую шероховатость в отверстиях, полученных с помощью обычного сверления (рис. 2). Более высокая шероховатость поверхности при сверлении отверстий объясняется двумя причинами. При сверлении отверстий образуется сплошная стружка, которая упрочняется за счет пластической деформации [8]. Эта сплошная стружка мешает операции резания, запутываясь вокруг спирального сверла. При отводе через стружечные канавки сверла, стружка трется о поверхность обработанного отверстия. Вторичное режущее действие приводит к образованию глубо-

ких канавок и царапин, что приводит к повреждению поверхности отверстия и ухудшению его качества. Кроме того, нестабильность оси инструмента из-за высокой осевой силы ухудшает чистоту обработанной поверхности [8].

При фрезеровании винтовых отверстий процесс резания носит прерывистый характер, в результате уменьшается контакт стружки с обработанной поверхностью отверстия и повторное «царапанье» обрабатываемой поверхности. Значительное влияние в стружкообразовании оказывают величины углов, профиль канавки и иные параметры режущего инструмента [9]. Шероховатость поверхности при сверлении уменьшается с увеличением скорости резания, но увеличивается с увеличением значения подачи. Как видно из рис. 2, для всех уровней осевой подачи (0,015–0,045 мм/об) сверление со скоростью 20 м/мин приводит к ухудшению чистоты поверхности из-за наличия царапин, образованных деформационно-упрочненной стружкой, удаляющейся через канавки спирального сверла. Сверление с осевой подачей 0,045 мм/об показывает, что значение скорости резания (20 м/мин) демонстрирует уменьшение царапин на поверхности, но микроскопическое наблюдение выявило наличие прилипшего материала. Сверление на более высоких скоростях резания (60–80 м/мин) выгодно из-за значительного улучшения качества поверхности отверстия, а также кратного повышения производительности.

Наблюдения за шероховатостью обработанной поверхности в процессе спирального фрезерования имеют ярко выраженную тенденцию: шероховатость поверхности увеличивается с увеличением скорости резания для всех уровней осевой подачи (0,2–0,5 мм/об). Поскольку диаметр отверстия больше диаметра концевой фрезы, имеется достаточно свободного пространства для оперативного отвода стружки, что предотвращает появление царапин на обрабатываемой поверхности. Увеличение подачи до 0,50 мм/об приводит к увеличению шероховатости обработанной поверхности. При высокой подаче увеличивается количество необрезаемого материала при фрезеровании. В результате нагрузка на инструмент увеличивается, что приводит к образованию следов от вибрации.

2.3. Анализ отклонения диаметра отверстия, полученного при обработке титанового сплава.

Во время изготовления отверстий очень важно поддерживать постоянную диаметральную точность. Обработка отверстий меньшего диаметра для заклепывания или завинчивания может привести к нежелательному напряжению и образованию трещин. Напротив, слишком большие отверстия могут привести к ослаблению сборочного крепления. Поэтому диаметр просверленных и фрезерованных отверстий был измерен и проанализирован в зависимости от скорости резания и способа обработки (рис. 3).

Сравнение показывает, что отверстия, обработанные с помощью обычного сверления, больше, чем отверстия, полученные с помощью винтового фрезерования. Диаметр просверленного отверстия приближается к номинальному диаметру при увеличении скорости резания с 20 до 80 м/мин. Диаметр отверстия увеличивается с увеличением осевой подачи с 0,015 до 0,045 мм/об. В результате обработки отверстий с меньшей осевой подачей толщина стружки уменьшается, что обеспечивает стабильную обработку титанового сплава ВТ-3. С увели-

чением осевой подачи увеличивается вибрация инструмента, вызывающая отклонение диаметра отверстия от номинального размера [8]. Большее отклонение размера отверстия на входе связано с высокой прочностью и твердостью титанового сплава BT-3, что увеличивает вероятность отклонения сверла, приводящего к слишком большому отверстию на входе. Все просверленные отверстия показали низкую точность размеров, при этом отклонение диаметра отверстия превышало установленный допуск H7, который является стандартным при изготовлении топливно-регулирующей аппаратуры.

Отклонение диаметра отверстия уменьшается с увеличением скорости резания с 20 до 80 м/мин. Диаметр отверстия увеличивается с увеличением осевой подачи от 0,2 до 0,5 мм/об (рис. 3). Увеличение толщины недеформированной стружки при повышенной подаче увеличивает осевое усилие, тем самым вызывая нестабильность обработки и ухудшая диаметральную точность отверстия. Аналогичная тенденция при обработке наблюдается на выходе из отверстия, однако диаметр отверстия на входе больше диаметра на выходе. Большое отклонение входного диаметра отверстия можно объяснить жесткостью и геометрией фрезы, а также высокой прочностью и твердостью обрабатываемого материала. При входе сверла в материал контакт его с заготовкой при величинах припуска менее радиуса округления возникает ударная нагрузка, приводящая к деформации и вибрациям инструмента, что приводит к большому отклонению размеров на входе. Для обработки титановых сплавов предпочтителен инструмент с малым радиусом округления режущих кромок. Снижение вибраций и повышение стойкости инструмента также может быть достигнуто при увеличении числа зубьев инструмента [10]. Таким образом, при обработке титановых сплавов стоит стремиться к выбору инструмента с максимальным числом зубьев, обеспечивающим стабильность процесса резания.

Когда фреза входит в материал, стружка легко удаляется благодаря большему, чем у фрезы, диаметру отверстия. Удаление материала также распределяется между торцевыми и боковыми режущими кромками, что снижает усилия и отклонение на выходе отверстия.

Основываясь на измерениях, припуск отверстий колебался от +8 до +17 мкм на входе и от +10 до +15 мкм на выходе из отверстия. Некоторые из обработанных отверстий получены в пределах поля допуска H8, в то время как большинство обработанных отверстий находятся в пределах допуска H7, тем самым подтвердив способность винтового фрезерования обрабатывать отверстия в титановых сплавах в соответствии с требованиями для топливно-регулирующей аппаратуры.

3. Результаты эксперимента. Было проведено систематическое исследование для сравнения процессов сверления и винтового фрезерования для изготовления отверстий в титановом сплаве BT-3. Были рассмотрены показатели производительности обработки и качества получаемых поверхностей, а именно осевая сила резания, шероховатость обработанной поверхности, диаметральная точность. На основании полученных результатов были сделаны следующие выводы:

— величина осевой силы резания оказалась ниже в 6 раз при обработке отверстий методом спирального фрезерования. Анализ осевой силы

резания выявил тенденцию к уменьшению силы с увеличением скорости резания, в то время как тенденция к увеличению была отмечена с увеличением подачи;

— чистота поверхности, получаемая методом спирального фрезерования, лучше при сравнении с поверхностью, полученной сверлением из-за образования прерывистой стружки и простоты ее удаления при низких скоростях резания. Но винтовое фрезерование с более высокой скоростью резания и условиями осевой подачи приводило к образованию следов вибрации на выходной стороне отверстия. Виброустойчивость процесса резания ограничивается свойствами инструмента, оснастки и детали;

— анализ диаметра отверстия показал, что отклонение размеров на входе в отверстие было больше, чем на выходе из отверстия, для обоих процессов обработки. Процесс спирального фрезерования может производить отверстия с качеством H7 при высокой скорости резания и более низкой подаче.

Выводы. По результатам работы можно сделать вывод, что винтовое фрезерование имеет значительное преимущество перед обычным сверлением благодаря возможности получать отверстия более высокой точности.

Библиографический список

1. Vasil'ev E. V., Makashin D. S., Chernykh I. K. Influence of forms and geometric parameters of sharpening of the chisel edge on the cut chip thickness throughout the cutting edges of a twist drill // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1210. 012157. DOI: 10.1088/1742-6596/1210/1/012157.
2. Кирюшин И. Е., Кирюшин Д. Е., Насад Т. Г. Исследование шероховатости поверхности при высокоскоростном торцевом фрезеровании труднообрабатываемых материалов // *Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. тр. конф. Саратов, 2007. С. 105–107.*
3. Виноградова Н. В. Исследование влияния технологических условий механической обработки на уровень накопленной энергии деформации // *Вестник машиностроения*. 2012. № 4. С. 60–62.
4. Блохин Д. А., Попов А. Ю. Исследование причин отклонений формы при контурном фрезеровании // *Проблемы машиноведения: материалы III Междунар. науч.-техн. конф. В 2 ч. / ред. П. Д. Балакин. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2019. Ч. 2. С. 175–179. ISBN 978-5-8149-2823-8.*
5. Wang G., Liu X., Chen T. [et al.]. An experimental study on milling titanium alloy with a revolving cycloid milling cutter // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10 (4). P. 1423. DOI: 10.3390/app10041423.
6. Barman A., Adhikari R., Bolar G. Evaluation of conventional drilling and helical milling for processing of holes in titanium alloy Ti6Al4V // *Materials Today: Proceedings*. 2020. P. 1–6. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.04.573.
7. Conradie P., Dimitrov D., Oosthuizen G. A cost modelling approach for milling titanium alloys // *Procedia CIRP*. 2016. Vol. 46. P. 412–415. DOI: 10.1016/j.procir.2016.04.014.
8. Макашин Д. С. Влияние геометрических параметров спирального сверла на отклонение от цилиндричности при сверлении титанового сплава // *Омский научный вестник*. 2011. № 2 (100). С. 40–44.
9. Чазов П. А., Беспалов П. Н., Коровин Г. И. Особенности конструкции концевых фрез для обработки труднообрабатываемых материалов // *Фундаментальные исследования*. 2016. № 3-2. С. 316–319.
10. Сазонов М. Б., Жидяев А. Н. Исследование вибраций концевых фрез при обработке титанового сплава BT9 // *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, тех-*

нологии и машиностроение. 2021. Т. 20, № 4. С. 89–99. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-4-89-99.

МАКАШИН Дмитрий Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» машиностроительного института Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск; доцент кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск.

SPIN-код: 1763-1883

AuthorID (РИНЦ): 926848

AuthorID (SCOPUS): 57203642272

Адрес для переписки: dima.makashin@gmail.com

БЛОХИН Дмитрий Андреевич, ассистент кафедры

«Металлорежущие станки и инструменты» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 5142-6237

ORCID: 0000-0001-6197-435X

AuthorID (SCOPUS): 56503655400

ResearcherID: A-8621-2017

Адрес для переписки: blohin.da@mail.ru

Для цитирования

Макашин Д. С., Блохин Д. А. Сравнение процесса сверления и спирального фрезерования отверстий в титановом сплаве // Омский научный вестник. 2022. № 4 (184). С. 36–40. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-184-36-40.

Статья поступила в редакцию 12.03.2022 г.

© Д. С. Макашин, Д. А. Блохин