

ВВЕДЕНИЕ

Титановые сплавы играют большую роль в авиационной технике, где требуется получить наиболее легкую конструкцию в сочетании с необходимой прочностью. Титановые сплавы обладают меньшим весом по сравнению с другими сплавами, но в то же время может работать при более высоких температурах. Из титановых сплавов изготавливают обшивку, детали крепления, силовой набор, детали шасси, различные агрегаты. Также данные материалы применяются в конструкциях авиационных реактивных двигателей. Это позволяет уменьшить их массу на 10-25%.

Многие свойства, которые придают титановым сплавам статус привлекательного материала для изготовления деталей, оказывают значительный эффект на его обрабатываемость. Это связано с относительно быстрым износом инструмента. А основную долю обработки титановых сплавов для авиастроения производят концевыми фрезами в связи наличия глубоких карманов, сложных профилей и тонкостенности деталей. Поэтому совершенствование конструкций концевых фрез для обработки титановых сплавов является актуальной темой.

Таким образом, целью данной выпускной квалификационной работы является совершенствование конструкции концевой фрезы с волнообразными зубьями для обработки титановых сплавов и технология ее изготовления. Особенностью конструкции фрезы является волнообразная режущая кромка, все крайние точки которой лежат на образующей цилиндра, благодаря чему данную фрезу можно использовать на чистовой обработке.

1.1 Сведения о титане и его сплавах

Титан (Ti) (Titanium) - химический элемент с порядковым номером 22, атомный вес 47,88, легкий серебристо-белый металл. Плотность $4,51 \text{ г/см}^3$, $t_{\text{пл.}}=1668 (\pm)5^\circ\text{C}$, $t_{\text{кип.}}=3260^\circ\text{C}$. Для технического титана марок ВТ1-00 и ВТ1-0 плотность приблизительно $4,32 \text{ г/см}^3$. Титан и титановые сплавы сочетают легкость, прочность, высокую коррозионную стойкость, низкий коэффициент теплового расширения, возможность работы в широком диапазоне температур (от минус 290°C до 600°C) [1,2].

Низкотемпературная альфа-модификация, существующая до $882,5^\circ\text{C}$ и высокотемпературная бетта-модификация, устойчивая от $882,5^\circ\text{C}$ до температуры плавления.

По плотности и удельной теплоемкости титан занимает промежуточное место между двумя основными конструкционными металлами: алюминием и железом. Стоит также отметить, что его механическая прочность примерно вдвое больше, чем чистого железа, и почти в шесть раз выше, чем алюминия. Но титан может активно поглощать кислород, азот и водород, которые резко снижают пластические свойства металла. С углеродом титан образует тугоплавкие карбиды, обладающие высокой твердостью.

Титан - парамагнитный металл. У парамагнитных веществ магнитная восприимчивость при нагревании обычно уменьшается. Титан составляет исключение из этого правила - его восприимчивость существенно увеличивается с температурой.

Из достоинств и недостатков титана и его сплавов, как обрабатываемого резанием материала, отметим следующие:

Достоинства:

- малая плотность (4500 кг/м^3) способствует уменьшению массы используемого материала;
- высокая механическая прочность. Стоит отметить, что при повышенных температурах ($250-500^\circ\text{C}$) титановые сплавы по прочности превосходят высокопрочные сплавы алюминия и магния;
- высокая коррозионная стойкость, обусловленная способностью титана образовывать на поверхности тонкие ($5-15 \text{ мкм}$) сплошные пленки оксида TiO_2 , прочно связанные с массой металла;
- удельная прочность (отношение прочности и плотности) лучших титановых сплавов достигает 30-35 и более, что почти вдвое превышает удельную прочность легированных сталей.

Недостатки:

- высокая стоимость производства, титан значительно дороже железа, алюминия, меди, магния;
- активное взаимодействие при высоких температурах, особенно в жидком состоянии, со всеми газами, составляющими атмосферу, в результате чего титан и его сплавы можно плавить лишь в вакууме или в среде инертных газов;

- трудности вовлечения в производство титановых отходов;
- плохие антифрикционные свойства, обусловленные налипанием титана на многие материалы;
- высокая склонность титана и многих его сплавов к водородной хрупкости и солевой коррозии;
- плохая обрабатываемость резанием, аналогичная обрабатываемости нержавеющей сталей аустенитного класса;
- большая химическая активность, склонность к росту зерна при высокой температуре и фазовые превращения при сварочном цикле вызывают трудности при сварке титана.

По использованию в качестве конструкционного материала титан находится на 4-ом месте, уступая лишь Al, Fe и Mg. Аллюминиды титана являются очень стойкими к окислению и жаропрочными, что в свою очередь определило их использование в авиации и автомобилестроении в качестве конструкционных материалов. Биологическая безвредность титана делает его превосходным материалом для пищевой промышленности и восстановительной хирургии [1,2,3].

Титан и его сплавы нашли широкое применение в технике ввиду своей высокой механической прочности, которая сохраняется при высоких температурах, коррозионной стойкости, жаропрочности, удельной прочности, малой плотности и прочих полезных свойств. Высокая стоимость титана и его сплавов во многих случаях компенсируется их большей работоспособностью, а в некоторых случаях они являются единственным материалом, из которого можно изготовить оборудование или конструкции, способные работать в данных конкретных условиях [2,3].

Титановые сплавы играют большую роль в авиационной технике, где стремятся получить наиболее легкую конструкцию в сочетании с необходимой прочностью. Титан легок по сравнению с другими металлами, но в то же время может работать при высоких температурах. Из титановых сплавов изготавливают обшивку, детали крепления, силовой набор, детали шасси, различные агрегаты. Также данные материалы применяются в конструкциях авиационных реактивных двигателей. Это позволяет уменьшить их массу от 10 до 25%. Из титановых сплавов производят диски и лопатки компрессора, детали воздухозаборника и направляющего аппарата, крепеж [2,3,4].

Применение титана в пассажирских самолетах, выпускаемых вплоть до 2008 г., не превышало 6%. В последнее время растет доля титана и в гражданской авиации. Масса самого большого пассажирского самолета в мире Аэробуса А380 – на 14% состоит из титана, а новейшего Боинга В 787 – уже на 18%. Если говорить об отечественных самолетах, то можно отметить, что семейство реактивных пассажирских самолетов Ан148, содержит 13 % титана (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 Процент титановых сплавов в авиастроении

Сегодня половина титана, произведенного в мире, потребляется авиакосмической промышленностью. Причем уже в ближайшее десятилетие ожидается удвоение показателя. Широкое внедрение титана в самолетостроение успешно решает требование снижения веса конструкции. Широкое применение в авиастроительной промышленности композиционных материалов (КМ) (например, углепластиков) требует применения титана, т.к. он намного лучше алюминия соединяется с КМ и на 60% увеличивает жизнь летательных аппаратов. К высокой прочности добавляется и свойство незначительных деформаций при температурных изменениях, что повышает размерную стабильность конструкций.

Соединения титана также получили широкое применение в различных отраслях промышленности. Карбид титана обладает высокой твердостью и применяется в производстве режущих инструментов и абразивных материалов. Белый диоксид титана (TiO_2) используется в красках (например, титановые белила), а также при производстве бумаги и пластика. Титанорганические соединения (например, тетрабутоксититан) применяются в качестве катализатора и отвердителя в химической и лакокрасочной промышленности. Неорганические соединения титана применяются в химической электронной, стекловолоконной промышленности в качестве добавки. Диборид титана — важный компонент сверхтвердых материалов для обработки металлов. Нитрид титана применяется для покрытия инструментов.

1.2 Механическая обработка титановых сплавов

По сравнению с другими материалами, механическая обработка титановых сплавов требует более высоких требований и имеет множество

ограничений. Сплавы из титана обладают некоторыми свойствами, которые способны значительно влиять как на процесс резания, так и на материал, который подвергается резанию. Если режим и инструмент выбраны правильно, а так же надежно закреплена заготовка, то процесс металлообработки титана будет высокоэффективным. Многих проблем при обработке титана можно избежать, если преодолеть особенности влияния титановых сплавов на процесс металлообработки.

Многие свойства, которые придают титановым сплавам статус привлекательного материала для изготовления деталей, оказывают значительный эффект на его обрабатываемость [2,3,5,6], а именно:

- высокая прочность в сочетании с низкой плотностью, что уменьшает вес конструкций, его плотность составляет 60% плотности стали;
- низкая теплопроводность;
- более высокая стойкость к коррозии, чем нержавеющая сталь.

Все свойства, перечисленные выше, означают, что титановые сплавы обладают высокими и концентрированными силами, действующими на режущую кромку при его обработке. Это часто приводит к вибрациям при обработке и ведет к быстрому износу режущей кромки инструмента. Кроме этого, титан плохо проводит тепло. Поэтому обработка титана требует от инструмента высокой красностойкости [2,3,7,33].

Одно из отрицательных явлений при обработке титановых сплавов является явление адгезии (рисунок 1.2), а в некоторых случаях происходит поверхностное упрочнение титановых сплавов, что способствует существенному затуплению РИ. Содержание углерода более чем две десятых процента способствует образованию карбиду титана, в связи с тем, что углерод растворяется в титановом сплаве только до 0,2% , если содержание углерода в титановом сплаве превосходит это число, то образуются твёрдые карбиды титана, которые действуют на режущую кромку инструмента как абразив и затупляют её. На рисунках 1.3 и 1.4 схематично показана обработка стали и титанового сплава.

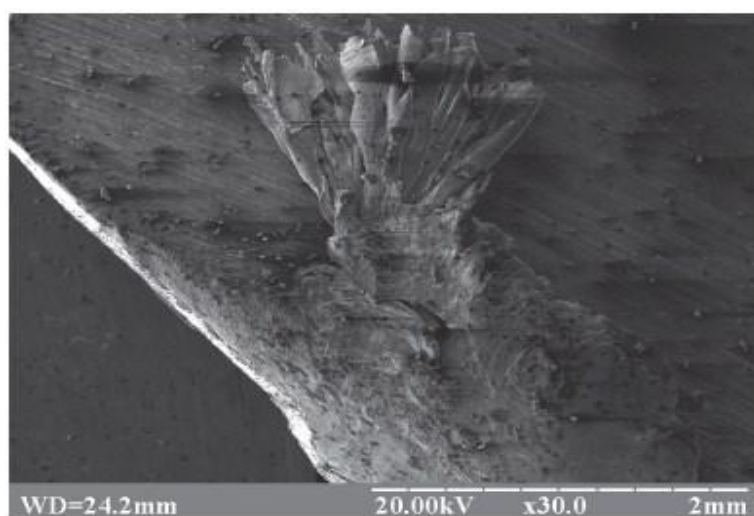


Рисунок 1.2 Наростообразование на РИ

Кроме того, при обработке титановых сплавов как показано на рисунке 1.4, в сравнении с обработкой стали показанной на рисунке 1.3, длина контакта титановой стружки с передней поверхностью значительно меньше, чем при обработке стали. Это объясняет также образование при резании титановых сплавов больших углов сдвига с малой усадкой стружки, как правило, коэффициент усадки ее по длине близок к единице. Это видно из значений коэффициента усадки различных марок титановых и твердых сплавов, а также зависимости продольной деформации стружки от скорости резания и подачи.

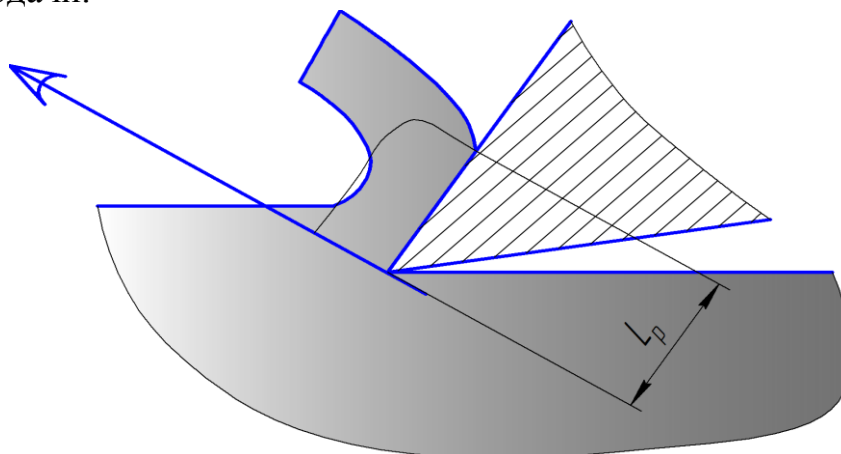


Рисунок 1.3 Стружкообразование при обработке стали

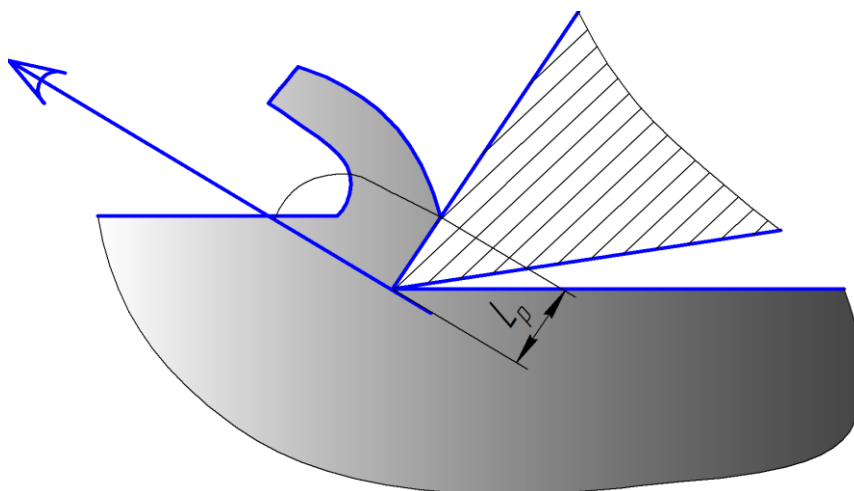


Рисунок 1.4 Стружкообразование при обработке титанового сплава

В ряде случаев в результате поглощения кислорода и азота из воздуха при обработке титановых сплавов получается так называемая отрицательная усадка, т. е. длина образующейся стружки больше пути резания. Уменьшение усадки стружки с ростом скорости резания объясняется также резким снижением сил трения стружки о переднюю поверхность режущей части инструмента. Титановые сплавы характеризуются высокими коэффициентами трения, что ограничивает их применение для подвижных соединений. В результате при обработке титановых сплавов вся нагрузка распределяется на очень малом участке острия лезвия что, впоследствии,

приводит к снижению стойкости инструмента и быстрому разрушению его режущей кромки [5,6,7].

Считается, что титан трудно поддается обработке, но это не типично для современных станков, инструментов и методов обработки. Частично трудности в механической обработке титана - это новая область, в которой пока еще не набрано достаточное количество опыта. Титан так же может казаться более трудным в обработке по сравнению с другими металлами, такими как: чугун или низколегированные стали. Механическую обработку титана следует выполнять при других подачах и скоростях в сравнении с другими металлами, но все же он может быть довольно легкий в обработке. Если деталь из титана жестко зажата на станке, находящимся в хорошем состоянии и оборудованным специальным шпинделем конусной формы ISO 50 с коротким вылетом инструмента, то проблем возникать не должно, при условии что режущий инструмент выбран правильно [2,3,8,33].

Но стабильные и идеальные условия не всегда присутствуют при фрезеровании. Кроме того, многие детали из титана имеют сложную форму с узкими, мелкими или глубокими и большими карманами, тонкими фасками и стенками. Для правильной и успешной обработки этих форм необходим инструмент с большой длиной режущей части, что быстрее может вести к деформации инструмента, которая возникает из-за вибраций при обработке титана и его сплавов. Существуют методы, благодаря которым можно существенно снизить вибрации при обработке титана. Большинство фрезерных станков, используемых для обработки титановых сплавов, оснащены шпинделями с конусом ISO 40. Из-за интенсивной эксплуатации этих станков снижается их эффективность в плане точности и надежности обработки. Обработка титана, как правило, включает в себя контурную обработку, разрезание канавок или обработку кромок, а все эти операции способны приводить к вибрации [2,3,8]. Поэтому необходимо принимать меры для ее предотвращения, по возможности повышая мощность закрепления заготовки. Главным способом решения данной проблемы является многоступенчатое крепление заготовок, при котором заготовки располагают ближе к шпинделю, что позволяет ослабить вибрацию.

Из-за того, что титановые сплавы сохраняют прочность и твердость при высоких температурах, на режущую кромку при обработке воздействует большая нагрузка. При этом в месте резания вырабатывается большое количество тепла, которое влечет за собой опасность деформации. Поэтому большое значение при обработке титана приобретает правильный выбор геометрии сменной пластинки и марки сплава. Решением этой проблемы является пластины с покрытием PVD, которые способны существенно повысить эффективность [8,9].

Существует ряд условий для режимов резания при обработке заготовок из титановых сплавов. Точность торцевого и рационального биения инструментов очень важна при механической обработке титана. К примеру, если пластина неверно установлена в корпусе фрезы, это приведет к

быстрому повреждению режущих кромок. Хотя предпочтение отдается геометрии с положительным передним углом, инструмент с немного отрицательным передним углом способен вести обработку при более высоких подачах, которые достигают 0.5 мм на зуб. В таком случае важна надежность закрепления заготовки и жесткость станка. Минимальная применяемая подача при фрезеровании титана обычно составляет 0.1 мм на зуб. Так же можно уменьшить частоту вращения шпинделя в целях получения рекомендуемой скорости резания как показано таблице 1.1. Неправильно выбранная частота вращения шпинделя может сократить стойкость на 90% при минимальной подаче на зуб. Еще одним способом является уменьшение количества пластин фрезы, либо выбор фрезы с наименьшим количеством пластин [2,3,7].

Таблица 1.1

Группы титанового сплава, его структура и марка	Материал режущего инструмента	Скорость резания, м/с	Коэффициент обрабатываемости по отношению к стали 45
Пластичные: - Низкой прочности ВТ1-1, ОТ4-0, АТ2 - Средней прочности ВТ5-1, ВТ5, ОТ4, АТ3	ВК6М; ВК8	1-1,7	0,45
Конструкционные повышенной прочности: - ВТ6, ИРМ1 (($\alpha+\beta$)- структура) - ВТ20, АТ6, ОТ4-2 (α - структура)	ВК8; ВК6М; Р9К5	1-2,3 0,75-1,2	0,55 0,32
Высокопрочные сплавы: ВТ14, ВТ16, ВТ22, ВТ23 (($\alpha+\beta$)- структура) ВТ15, ТС6 (β - структура)	ВК8;ВК6М	0,8-1,6 0,5-1	0,4 0,25
Жаропрочные сплавы: ВТ3-1, ВТ8, ВТ9(($\alpha+\beta$)- структура)	ВК8	0,5-1,2	0,28

При обработке титана рекомендуется сохранять малую длину контакта с заготовкой, для обеспечения охлаждения зубьев фрезы в период «передышки» в процессе резания.

Все вышеуказанные рекомендации по конструкции инструмента и режимам резания при обработке титана и его сплавов учитываются современными производителями при проектировании инструмента. Проектируются различные конструкции концевых фрез для обработки титановых сплавов, которые повышают производительность.

1.3 Особенности конструкции концевых фрез и рекомендации по проектированию

Факторами, влияющими на процесс резания, являются: диаметр, число зубьев, угол наклона винтовой режущей кромки, а также геометрические параметры режущей кромки представлены на рисунке 1.5.

Общие рекомендации по применению концевых фрез:

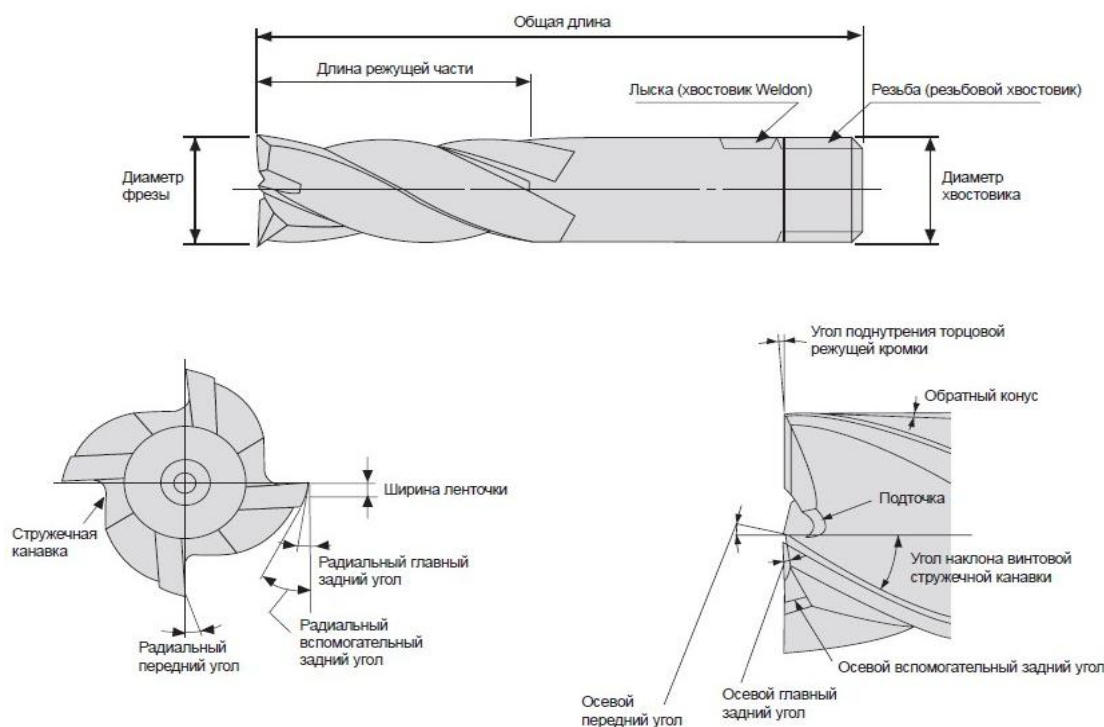


Рисунок 1.5

- выбранному диаметру фрезы должны соответствовать мощность и жёсткость оборудования;
- по возможности необходимо производить обработку с минимальным вылетом фрезы;
- толщина срезаемого слоя при выбранной подаче на зуб не должна приводить к интенсивному износу фрезы;
- при выборе числа зубьев фрезы необходимо, чтобы одновременно в резании не участвовали слишком много зубьев, так как это приведёт к вибрациям и чтобы зубьев было достаточно для обеспечения плавности процесса резания;
- по возможности используйте попутное фрезерование.

При фрезеровании различают подачу на один зуб S_z , подачу на один оборот S_o и минутную подачу S_m , которые находятся в следующем соотношении:

$$S_m = S_z \times n \times z; \quad (1.1)$$

$$S_o = S_z \times z, \quad (1.2)$$

где S_m – минутная подача (мм/мин);

S_z – подача на зуб (мм/зуб);

n – частота вращения (об/мин);

z – число зубьев.

Исходной величиной подачи при фрезеровании является величина её на один зуб.

Скорость резания определяется по формуле:

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}, \quad (1.3)$$

где D – диаметр фрезы, мм;

V_c – скорость резания, м/мин.

При встречном фрезеровании (против подачи) стружка имеет максимальную толщину в конце реза. Направление движения подачи противоположно вращению инструмента.

При попутном фрезеровании (по подаче) стружка имеет максимальную толщину в начале реза. Направление движения подачи совпадает с вращением инструмента.

Схемы фрезерования представлены на рисунке 1.6, достоинства и недостатки [10] представлены в таблице 1.2.

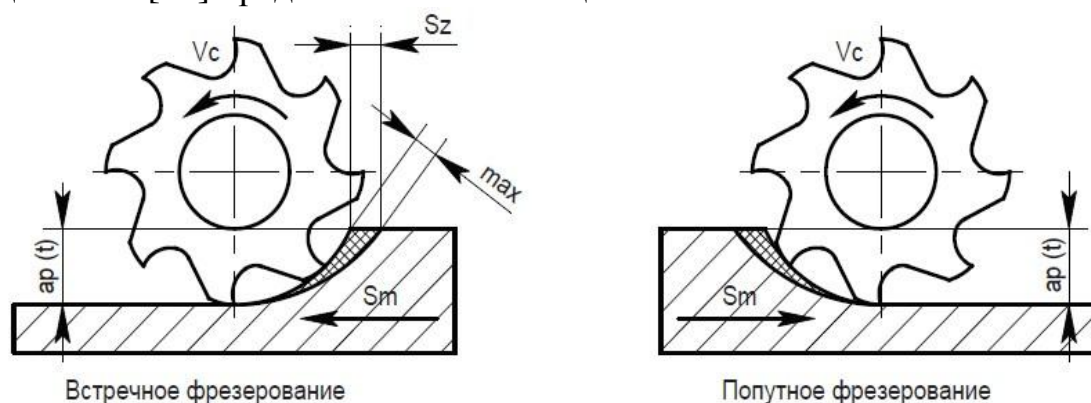


Рисунок 1.6

Таблица 1.2 – Достоинства и недостатки схем фрезерования

Встречное фрезерование	Попутное фрезерование
Плюсы: - нагрузка во время врезания зуба не зависит от рельефа поверхности заготовки - загрязнение и корка не влияют на стойкость фрезы - «плавный» и «мягкий» процесс резания	Плюсы: - составляющая сил резания прижимает заготовку к приспособлению - надежное удаление стружки - меньший износ фрезы, чем при встречном фрезеровании - лучшее качество обработанной поверхности - меньшая потребляемая мощность
Минусы: - фрезерование имеет склонность к вибрации - необходимость надежного закрепления заготовки - более быстрый износ фрезы чем при попутном фрезеровании - затруднено удаление стружки - из-за высокого трения при снятии стружки минимально толщины на обрабатываемой поверхности образуется наклеп и возникают внутренние напряжения	Минусы: - очень большая ударная нагрузка на зуб при врезании - меньшая стойкость фрезы при фрезеровании заготовок с литейной или ковочной коркой

Попутное фрезерование, предполагает вход в заготовку с максимальной толщиной среза, а выход – с минимальной. При фрезеровании периферией фреза «подминает» под себя заготовку, создавая толстую

стружку на входе для максимального поглощения тепла и тонкую стружку на выходе для предотвращения налипания стружки.

Изучив исследования о обработке титановых сплавов[11], можно сделать выводы что:

- попутное фрезерование подходит для чистовой обработки, в случаях, когда снимается тонкий слой материала;
- встречное фрезерование подходит для черновой обработки и работе по корке.

Выбор числа зубьев определяют из свойств обрабатываемого материала, размера и условий обработки (рисунок 1.7).

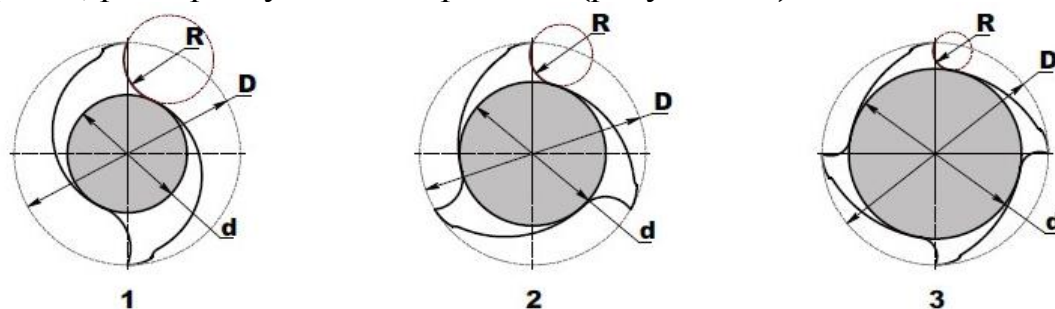


Рисунок 1.7

d - диаметр сердцевины; R – условный радиус стружечной канавки

Различия и применения фрез с разным числом зубьев представлены в таблице 1.3

Таблица 1.3

Двухзубые	Трехзубые	Четырёхзубые(многозубые)
- низкая прочность на изгиб - большое пространство для стружки - надежное удаление стружки - меньшая жесткость вследствие меньшей площади сечения сердцевины - обработка пазов в тяжёлых условиях - рекомендуется при малой жесткости системы	- меньше пространство для стружки - средняя прочность на изгиб - выше жесткость изза большей площади сечения сердцевины - лучше качество обработки - универсальное применение	- высокая жесткость - небольшое пространство для стружки - высокое качество - обработка по контуру, фрезерование уступов и пазов

Согласно исследованиям по оптимальному числу зубьев фрезы [12,13] при чистовой обработке различных материалов является число зубьев близкое к пяти, как видно из рисунка 1.8. Критерием оценки принимали параметр шероховатости поверхности и величину отжатия.

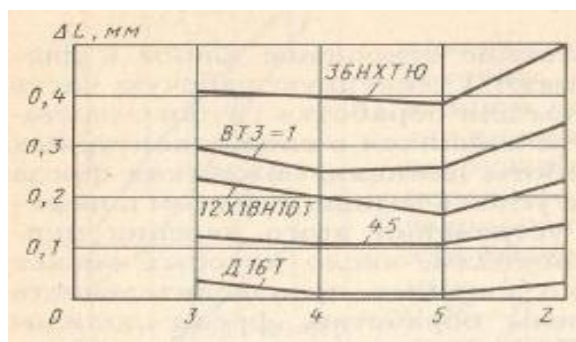


Рисунок 1.8 Зависимость величины отжатия от числа зубьев ($D=20\text{ мм}$, $L/D=4$)
 ΔL – отжатие фрезы, Z – число зубьев

Условие равномерности фрезерования – это условие постоянства суммарной ширины и площади сечения слоя, срезаемого несколькими зубьями фрезы при целых значениях коэффициента кратности k и выражается формулой:

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\pi k D}{z B}, \quad (1.4)$$

где γ – угол наклона винтовых зубьев;

k – коэффициент кратности;

B – ширина фрезерования, мм.

Угол подъема винтовой канавки (λ) является одним из важнейших параметров фрез, определяющий плавность работы инструмента, шероховатость поверхности заготовки и силы резания. Установлено что работоспособность фрез увеличивается вплоть до $\omega \approx 55^\circ$ в зависимости от величины зубьев и материала. Исходя из исследований и рекомендаций [10,12] оптимальным углом подъема спирали $\omega = 30^\circ - 50^\circ$. Большие углы создают меньшие нагрузки на технологическую систему. Это обеспечивает оптимальную работоспособность с минимальной силой на зуб фрезы.

Одной из особенностью обработки карманов и пазов концевыми фрезами, является метод фрезерования с врезанием под углом (рисунок 1.9). Эта операция позволяет исключить предварительное сверление. Врезание под углом – это одновременное перемещение фрезы по двум осям. Максимальные углы врезания α для различных обрабатываемых материалов представлены в таблице 1.4.

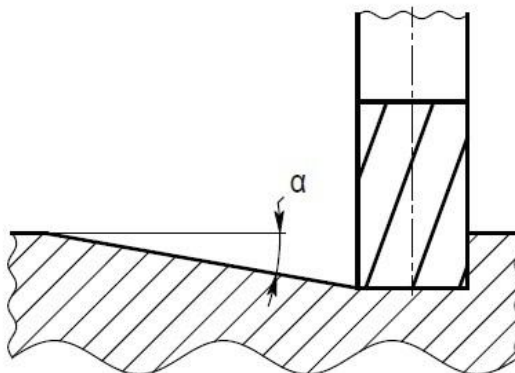


Рисунок 1.9

На основе исследований [4,6], при обработке титановых сплавов предпочтительнее является врезание под углом в заготовку, чем врезание из предварительно рассверленного отверстия.

Таблица 1.4 - Зависимость угла врезания от числа зубьев и материала

Число зубьев фрезы	2	3	4 и более
Стали, чугуны	15	10	5
Алюминиевые и медные сплавы	30	20	10
Закалённые стали	5	3	2

Основными критериями затупления режущей кромки являются ухудшение качества обработанной поверхности, шум при работе, вибрации.

В этом случае фрезу необходимо переточить. Перетачивать фрезы рекомендуется на станках с ЧПУ.

На рисунке 1.10 схематично показаны различные типы износа зуба концевой фрезы:

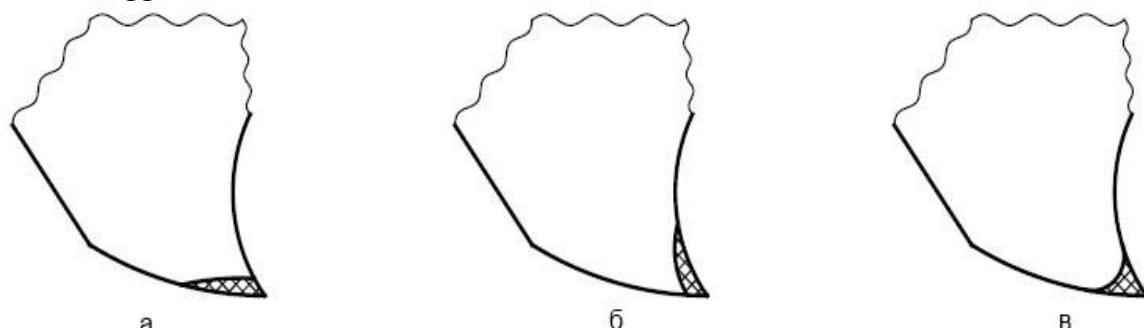


Рисунок 1.10 Износ кромки при фрезеровании
а- по задней поверхности, б – по передней поверхности, в – кромки

Итог о фрезеровании концевыми фрезами представлен в таблице 1.5.

Таблица 1.5

Проблемы при концевом фрезеровании	Основные причины возникновения проблем	Методы устранения проблем
- интенсивный износ задней поверхности - поломка инструмента - выкрашивание режущей кромки - наростообразование - вибрации	- повышенная температура в зоне резания - плохое стружкоотделение - неправильно подобранные режимы резания - низкая жесткость фрезы - недостаточно жесткое закрепление заготовки - радиальное биение фрезы или шпинделя - износ фрезы	- обеспечить обильную подачу СОЖ в зону резания - применить попутное фрезерование - назначить рекомендуемые режимы резания - уменьшить вылет фрезы - выбрать максимально возможный диаметр фрезы - повысить жесткость закрепления заготовки - проверить биение шпинделя

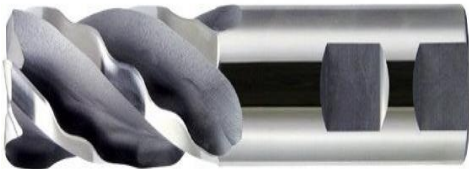
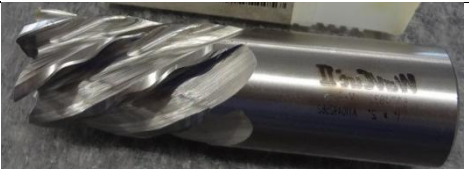
1.4 Анализ существующих конструкций концевых фрез для обработки титановых сплавов

Современные машиностроительные компании все больше внимания уделяют созданию прогрессивного инструмента для обработки титановых сплавов. Особенно, большее внимание уделяется концевым фрезам, так как в современном мире все больше актуально использование деталей сложных конструкций из титана. А сложные конструкции невозможно изготовить без применения концевой фрезы. Производители инструмента поставляют на рынок различные конструкции концевых фрез. Все конструкции сложны в изготовлении и имеют свои особенности проектирования представленные в таблице 1.6. Имеются многие разработки и методы обработки титана, представленные в дальнейшем обзоре.

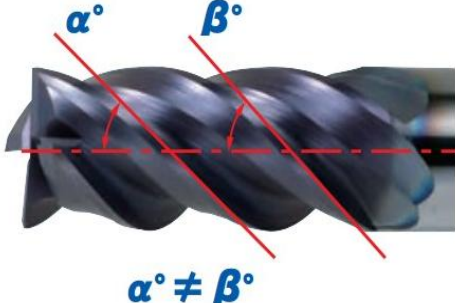
Таблица 1.6

Фирмы производители	Диаметр рабочей части фрезы	Число зубьев	Вид режущей кромки	Угол подъема режущей кромки	Вид хвостовика	Материал режущей части	Изображение фрезы	Черновая обработка	Чистовая обработка
Фрезы концевые, ГОСТ 23248-78	8-63	4-8	Винтовая	30° -35°	Конус морзе	P8M3K6C, P18Ф2K8M, HSS		+	+
ООО«ПК МИОН» (Томск), серия 711	20-50	4-6	Переменный угол наклона стружечных канавок	35°, перемен- ный	Weldon /цилиндри- ческий	HSS P6M5K5		+	+
Minicut international (Канада), серия LIST 995M	10-50	4-8	Зубья с выкружками	35°, перемен- ный	Weldon /цилиндри- ческий	HSS PM , TiAlN		+	
Weldon (США), серия Crest-Kut, тип KPSC, KPAC	12-50	4-8	Синусои- дальная режущая кромка	38°, перемен- ный	Weldon /цилиндри- ческий	HSS		+	+

Продолжение таблицы 1.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Melin (США), серия Aero-Cut, тип CCAC4 и CCAC6	20-50	4-6	Синусои- дальная режущая кромка	35°, перемен- ный	Whistle Notch/ цилиндри- ческий	HSS Co M42		+	+
Hanita (Израиль), серия Wav Cut, ТИП 1N77	6-30	4	Переменный угол наклона стружечных канавок	38°, перемен- ный	Weldon /цилиндри- ческий	HSS PM		+	+
ПУМОРИ (Урал) Серия Z-MILL	4-16	4-8	Переменный угол наклона стружечных канавок	35°/50°, перемен- ный	Weldon /цилиндри- ческий	VNM-UF		+	
OSAWA (Италия) Серия Ultra mills	6-30	4-6	Переменный угол наклона стружечных канавок	35°-38°, перемен- ный	цилиндри- ческий	HSS-P, PV200		+	
WINSTAR (Тайвань) Серия H650	3-20	2-6	Винтовая, со стружколомам и	30°	цилиндри- ческий	UMG - SICO		+	
STOCK (Германия) Серия SuperF-UT N, тип VA-X	3-25	3-6	Переменный угол наклона стружечных канавок	35° - 38° перемен- ный	Weldon /цилиндри- ческий	HSS-E- PM/Твердый сплав		+	+

Продолжение таблицы 1.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SANDVIK Coromant (Швеция) Тип Coromill 690	40-100	3-8	Винтовая	40° - 45°	Coromant Capto	Твердый сплав (СМП)		+	
Mitsubishi (Япония) Тип VF6MHV, VFMHVRB	6-20	4-6	Переменный угол наклона стружечных канавок	42° - 45°	Weldon /цилиндри- ческий	UWC		+	+

Как видно из таблицы, производители РИ отдают предпочтение монолитному инструменту из быстрорежущей стали, чем из твердых сплавов. Обусловлено это дороговизной монолитного инструмента из твердых сплавов, что сводит экономическую выгодность их производительности к нулю, особенно при диаметре свыше 16мм. Фрезы с СМП изготавливаются только для черновой обработки, в следствии радиального биения более 0,06мм. Вид режущей кромки в основном либо винтовая с переменным углом наклона соседних зубьев или волнообразный профиль зуба. Угол наклона стружечной канавки в диапазоне от 35° до 38°.

1.4.1 Сборные концевые фрезы с сменными многогранными пластинами (СМП)

Конструкция фрез с СМП представлена на рисунке 1.11



Рисунок 1.11

В большей степени сложными по конструкции фрезами являются сборные концевые фрезы с СМП для обработки титана и его сплавов. Для различных марок титанового сплава применяют режущие пластины с соответствующими покрытиями с тем, чтобы обеспечить максимальную эффективность и стойкость фрезы при обработке. С той же целью и разрабатывают корпуса фрез [2,3,14,15]: с определенными конструкциями гнезд для крепления пластин, с определенными углами установки пластин и рабочими углами, с хвостовиками, обеспечивающими надежное и жесткое закрепление инструмента в шпинделе станка, а также с возможностью подвода СОЖ. Вышеуказанные конструкции сборных концевых фрез с СМП для обработки титановых сплавов производятся в таких известных фирмах как «Sandvik Coromant», «Iscar», «Mitsubishi» [16,17].

Преимущества [4]:

- возможность при необходимости замены пластин непосредственно на рабочем месте;
- стабильность геометрических параметров инструмента;
- возможность оперативного изменения ряда геометрических параметров путем замены пластин или кассет;
- возможность оперативного изменения марок инструментальных материалов;
- исключение дефектов пайки и заточки инструментальных материалов;
- значительный ресурс корпусов инструмента в зависимости от конструкции корпус позволяет использовать от 100 до 400 комплектов пластин.

Недостатки:

- большое биение режущих кромок, его величина зависит от класса точности пластин, точности изготовления опорных поверхностей под пластинки и базовых поверхностей самих корпусов;
- плохой отвод тепла из зоны резания из-за большого количества стыков при установке пластин в корпусах, что снижает эффективность сборных конструкций при обработке материалов с низкой теплопроводностью (труднообрабатываемых), а также при обработке поверхностей большой протяженности;
- ограниченные возможности варьирования рядом геометрических параметров при создании инструмента, приводящие к росту динамических нагрузок на технологическую систему;
- погрешность формы обработанной поверхности, возникающая из-за установки пластин с прямолинейной режущей кромкой в корпусах под углом к оси фрезы, или если пластина имеет винтовую режущую кромку, то угол винтовой поверхности рассчитан только для одного базового диаметра, для других будет иметь место погрешность формы обработанной поверхности;
- высокая первоначальная стоимость корпусов инструмента.

На СПМ данных фрез обязательно наносят различные покрытия для увеличения износостойкости и прочности [34].

При чистовом фрезеровании монолитные концевые фрезы с оптимально выбранными конструктивными параметрами как из твердого сплава, так и из качественных быстрорежущих сталей имеют несомненное преимущество по производительности перед сборными конструкциями фрез.

Это объясняется тем, что монолитный инструмент для чистовой обработки при прочих равных условиях имеет большее число зубьев, следовательно, съем металла будет происходить при больших значениях минутных подач. Число зубьев сборных фрез зависит от размеров неперетачиваемых пластин и способов их закрепления в корпусах. А также важным фактором является значение радиального биения, которое у монолитных фрез не превышает 0,01мм, а у фрез с СПМ при использовании самых точных пластин и методов изготовления гнезд под них составляет не менее 0,06мм [34].

1.4.2 фрезы с стружколомами

В настоящее время в связи с требованием роста производительности обработки все более широкое применение находят фрезы с стружечными канавками [18] (иначе их называют «черновыми», «кукурузными», «обдирочными»), обеспечивающие повышенные значения глубины и ширины фрезерования из-за разделения стружки по ширине, что позволяет решить вопрос стружкоразмещения в канавках инструмента. Предлагаемый

обзор фрез с криволинейной режущей кромкой основан на продукции отечественных и зарубежных производителей режущих инструментов: Guhring, ZPS FN, Kennametal, Sandvick, Dolfamex, Iscar, HGT, Pramet, Taegutec, Mapal, ARNO-Werkzeuge, ST Group, HAHN-KOLB, Sumitomo, Мион, Тернадо, MITSUBISHI, Seco, Dormer, Niagara cutter, Nachi.

Типовые представители фрез с криволинейной режущей кромкой, выявленные при изучении информационных источников, представлены на рисунке 1.11.



Рисунок 1.11

Изучение криволинейных профилей позволило разделить их по форме на два типа: плоский и круглый, по размеру на: мелкие, крупные, сверхкрупные и по симметричности: на симметричные и асимметричные как видно на рисунке 1.12 и в таблице 1.7.

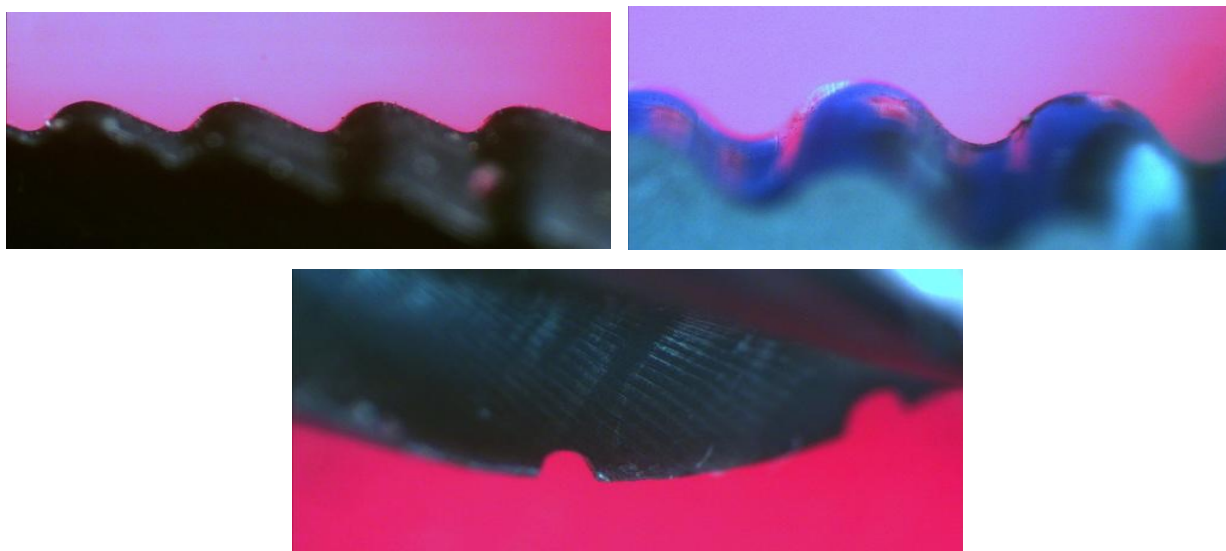


Рисунок 1.12

Таблица 1.7

Тип	Плоский			Круглый			
	с круглыми канавками		с плоскими канавками	крупный	мелкий	сверхкрупный	асимметричный
	крупный	мелкий					
Обозначение	<i>NF</i>	<i>HF</i>	Стружколом	<i>NR</i>	<i>HR</i>	<i>WR</i>	—
Профиль							
Параметры профиля							
Сечение срезаемой стружки							

Изучение литературных данных[19] позволило сформулировать некоторые правила выбора профиля режущей кромки в зависимости от вида обрабатываемого материала:

- круглый мелкий профиль (*HR*) применяют для обработки заготовок из материалов средней и высокой прочности: до 1400 МПа для фрез из быстрорежущей стали и до 1600 МПа – для твердосплавных. Используют для черновой обработки поверхностей с шероховатостью $Ra12,5$ мкм и более;

- круглый крупный профиль (*NR*) применяют для обработки заготовок из материалов средней и низкой прочности: до 1000 МПа фрезами из быстрорежущей стали и до 1200 МПа – фрезами из твердого сплава.

Используют для черновой обработки поверхностей с шероховатостью $Ra12,5\text{мкм}$ и более;

- асимметричный круглый профиль и сверхкрупный (WR) применяют для обработки заготовок из цветных металлов (чаще - алюминиевых сплавов) и мягкой стали прочностью до 600 МПа. Несимметричное расположение канавок уменьшает вибрации и увеличивает стойкость фрезы;

- плоский крупный профиль с радиусными канавками (NF) (применяют для той же группы обрабатываемых материалов, что и крупный круглый профиль), но могут использовать как для черновой, так и получистовой и чистовой обработки. Шероховатость обработанной поверхности $Ra3,2\text{ мкм}$ и более;

- плоский мелкий профиль с радиусными канавками (HF) применяют для той же группы обрабатываемых материалов, что и мелкий круглый профиль (средней и высокой прочности: до 1400 МПа фрезами из быстрорежущей стали и до 1600 МПа фрезами из твердого сплава), но можно использовать как для черновой, так и получистовой и чистовой обработки. Шероховатость получаемой поверхности $Ra3,2\text{ мкм}$ и более;

- чем крупнее профиль режущей кромки, тем больше шероховатость обработанной поверхности;

- применение плоского профиля с острыми канавками (геометрия «стружколом») аналогично применению плоского профиля с радиусными канавками, но обеспечивает меньшую шероховатость обработанной поверхности, по сравнению с обработкой фрезами с волнистой режущей кромкой [19].

1.5 Выводы по главе 1

Обширные экспериментальные исследования, проведённые Н.И. Резниковым, В.А. Кривоуховым, М.Ф. Полетика, а также информация из зарубежной литературы, позволили выявить основные особенности титановых сплавов и их обработки:

- малая пластичность приводит к тому, что при обработке образуется специфическая стружка, по внешнему виду похожая на сливную, но с малым коэффициентом усадки. Такая стружка имеет ещё и малую площадь контакта с передней поверхностью режущего инструмента, что в сочетании с высокой прочностью титановых сплавов приводит к большим нормальным давлениям на режущий инструмент, что ведёт к повышенному износу и расходу инструмента;

- высокое упрочнение титановых сплавов в процессе резания. Вследствие повышенной способности к упрочнению при пластической деформации их прочностные свойства возрастают в 2-4 раза, что сильно снижает обрабатываемость данных материалов;

- пониженная виброустойчивость процесса резания, обусловленная высокой упрочняемостью титановых сплавов при неравномерности

протекания процесса деформирования при резании. Возникновение вибрации приводит к переменным силовым и тепловым нагрузкам на режущую часть к микро- и макро- выкрашиванию режущих кромок;

- высокая химическая активность, способствующая при резании активному взаимодействию титановых сплавов с окружающей средой. Вследствие этого, при увеличении температуры в зоне резания идёт сильное поглощение кислорода, водорода и азота из воздуха, что приводит к окислению;

- при обработке, титановые сплавы оказывают высокое абразивное воздействие на режущий инструмент, из-за содержания в них высокотвёрдых включений в виде оксидов, нитридов и карбидов;

- при назначении режимов резания титановых сплавов, особое внимания следует уделять вопросам безопасности. Образование тонкой стружки, покрытой техническими маслянистыми жидкостями, приводит к её легкому воспламенению;

- предпочтительным является попутное фрезерование для обработки титановых сплавов. Так как при врезании создается толстая стружку на входе для максимального поглощения тепла и тонкая стружку на выходе для предотвращения налипания стружки;

- производители режущих инструментов с большим предпочтением изготавливают монолитные концевые фрезы для обработки титановых сплавов из быстрорежущих сплавов, чем из твердых сплавов, особенно при диаметре более 16мм;

- ведущими мировыми производителями режущего инструмента рекомендованы следующие режимы резания:

Скорость: 18-50м/мин, в зависимости от числа зубьев и L/D;

Подача: 0,015-0,084 мм/зуб;

Глубина: 0,02 - 0,1D.

2 ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Студент гр. 10300

(Подпись)

А.Н. Ивкин

(Дата)

Руководитель
к.т.н., зав. кафедры ТМС

(Подпись)

А.А. Моховиков

(Дата)

Нормоконтроль,
к.т.н., доцент кафедры ТМС

(Подпись)

А.А. Ласуков

(Дата)

Объектом исследования в данной работе является фреза с криволинейной режущей кромкой.

Одной из конструкций концевых фрез для обработки титановых сплавов является цельная концевая фреза из быстрорежущей стали с криволинейной режущей кромкой (далее – фреза) [20] представленная на рисунке 2.1. В отличие от стандартной спиральной режущей кромки, режущие кромки этой концевой фрезы выполнены в виде синусоидальных кривых.

Данная фреза имеет следующие особенности конструкции:

- волнообразная геометрия режущей части фрезы;
- неравномерный шаг зубьев.

При применении данной конструкции решаются следующие задачи:

- снижение вибраций при обработке;
- волнообразная режущая кромка способствует делению стружки по длине;
- расположение режущей кромки по волне и неравномерный шаг зубьев способствуют при обработке титана срезу каждым последующим зубом менее упрочненного слоя материала[5,6].
- применение конструкции фрезы с волнообразной режущей кромкой, а также с неравномерным шагом зубьев снижает нагрузку на режущую кромку.



Рисунок 2.1

Задачей предполагаемого изобретения является повышение стойкости, производительности (съем объема материала в единицу времени) и применимости концевых фрез в процессе эксплуатации.

Обзор литературы в исследуемой области показывает, что множество исследований основанных на методе механистического моделирования с успехом проводятся и внедряются в производство [21]. Изучением механики процесса фрезерования занимался Martellotti в 1941 году [22,23]. Он провел всестороннее изучение процесса фрезерования, в котором он исследовал кинематику концевых фрез, траекторию движения режущих кромок инструмента, процесс образования стружки и качество поверхности обрабатываемой детали. Zheng [24] разработал механистическую модель для прогнозирования усилия резания в периферийном фрезеровании алюминиевого сплава 7075-T6 с использованием концевой фрезы со спиральной режущей кромкой. В предложенной ими модели были учтены: конфигурации оборудования, режимы резания, физико-технические свойства обрабатываемого материала, и геометрические параметры концевой фрезы, и на основании соотношения между толщиной стружки и длиной участвующей в работе режущей кромки была определена сила резания.

В механистической модели Budak [25] учтено влияние граничных сил и определены соответствующие коэффициенты, что позволило определить влияние эффекта сдвига. Авторы утверждают, что проведение экспериментальных работ по определению сил резания и определение коэффициентов нагрузки на режущую кромку для любых геометрических параметров концевых фрез могут быть заменены на их модель, в которой учитываются данные по ортогональному резанию и общий анализ косоугольного резания.

Talekar [26] представил механистическую идентификацию коэффициентов силы резания для моделирования силы резания в высокоскоростном фрезеровании титанового сплава. Автор подтвердил, что его модель с использованием криволинейной режущей кромки концевой фрезы разработана, чтобы уменьшить вибрации и улучшить динамику обработки. Он используется её как для черновой, так и для чистовой операции. Это привлекло большое внимания к его литературе, и решению более интенсивного исследования данной разработки. Кроме того, большинство механистических моделей силы резания опубликованные в литературе, были разработаны и испытаны только при сухом фрезеровании, которая не отражает реальную практику в отрасли, где для охлаждения применяют эмульсии. Существует необходимость для создания модели силы резания, которая включает в себя эффект охлаждения. В этом исследовании разработана, механистическая модель фрезы для прогнозирования силы резания титанового сплава с использованием эмульсионной стратегии охлаждения. MATLAB уравнения разработаны для имитации механистической модели и сравнение с экспериментами, проводящиеся для определения силы резания.

На рисунке 2.2 показана режущую часть фрезы взаимодействующая с заготовкой, дифференциальные составляющие силы резания и осевой нагрузки концевой фрезы при частичном погружении режущей части на глубину a_a и ширину a_r , скорости резания n_s , подаче f , начальный угол ϕ_s и угол выхода ϕ_e . Радиальные и осевые нагрузки выбирают на основании способности фрезерного станка, который будет использоваться, возможности концевой фрезы и геометрии заготовки, которую подвергнут механической обработке. Для прогнозирования компонентов силы резания (F_x , F_y и F_z) и результирующей силы резания (F_r) в процессе концевой фрезерования, фреза должна быть представлена в аксиально-дискретной форме, в виде очень тонких дисков толщиной (dS), как показано на рисунках 2.2а, 2.2б и дифференцированные составляющие тангенциальной, радиальной и осевой режущих сил (dF_t , dF_r и dF_a соответственно) дисков, участвующих в процессе резания (рисунок 2.2в). В конце концов, все компоненты дифференциальной силы резания, которые будут рассчитаны далее, объединены и проецируются на декартовы оси (X , Y , и Z) станка.

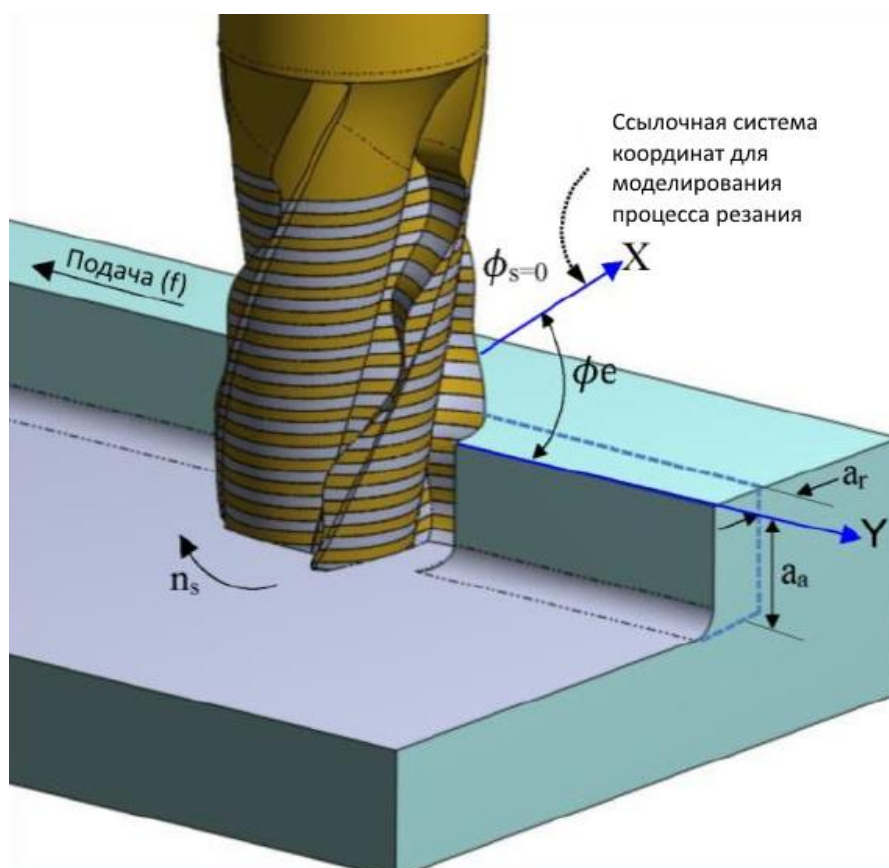


Рисунок 2.2а Схема резания

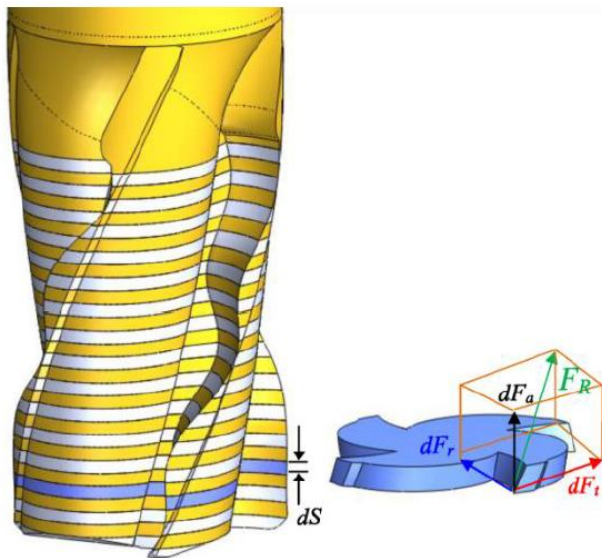


Рисунок 2.26 Деление фрезы на элементарные участки и направления действий сил

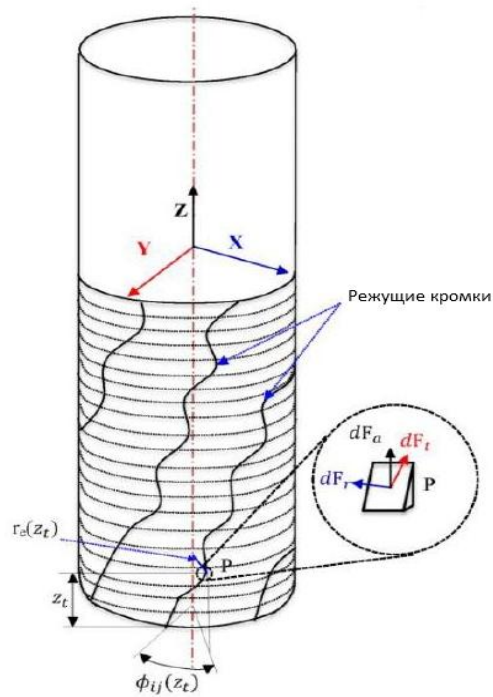


Рисунок 2.3в Дифференциальные компоненты силы резания, действующие на точку P_{ij} .

На рисунке 2.4 видно, что развернутые режущие кромки, составляют две части: линейная и нелинейная.

коэффициенты были определены механистически, из фрезерных испытаний в отдельном исследовании [32].

Как выявлено из исследований, зуб находящийся на глубине h_{cij} в точке P_{ij} является функцией угла осевого погружения (k_{ij}), подачи на зуб (f_t), ширины фрезерования (a_p), и угол среза (θ_j), и она может быть вычислена по уравнению 2.2 следующим образом:

$$h_{cij} = f_{tij} * \sin(\theta_{ij}) \sin(k_{ij}) g(\theta_{ij}). \quad (2.2)$$

Функция $g(\theta_{ij})$ представляет собой ступенчатый функциональный блок, который учитывает, в работе передний край или нет; она контролирует уравнение 2.2 следующим образом:

$$g(\theta_{ij}) = 1, \text{ когда } (\theta_s) < (\theta_{ij}) < (\theta_e);$$

$$g(\theta_{ij}) = 0 \text{ при } (\theta_s) > (\theta_{ij}) \text{ или } (\theta_{ij}) > (\theta_e).$$

Подача на зуб в точке P_{ij} может быть вычислена из уравнения 2.3 следующим образом:

$$f_{t(ij)} = \frac{(\theta_{j+1} - \theta_j) \times f}{ns \times 2\pi}. \quad (2.3)$$

Поскольку фрезерный станок имеет три перпендикулярные оси, дифференциалы силы резания dF_t , dF_r и dF_a должны быть спроецированы на оси станка x , y , z , которые расположены во взаимно перпендикулярных плоскостях. Из уравнения 2.4 можно получить их значения [26,27,28,29]:

$$\begin{bmatrix} dFx \\ dFy \\ dFz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos(\theta_{ij}) & -\sin(\theta_{ij}) \sin(k_{ij}) & -\sin(\theta_{ij}) \sin(k_{ij}) \\ \sin(\theta_{ij}) & -\cos(\theta_{ij}) \sin(k_{ij}) & -\cos(\theta_{ij}) \cos(k_{ij}) \\ 0 & -\cos(k_{ij}) & -\sin(k_{ij}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dFt \\ dFr \\ dFa \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Суммарная сила резания для каждой режущей кромки может быть рассчитана путем интегрирования компонентов дифференциальной силы резания (dfx , dfy и dfz) вдоль волнисто-винтовой режущей кромки.

$$\begin{aligned} F_x(\theta_{ij}) &= \sum_{i=1}^{Nt} \int_0^{a_a} dFx\{\theta_{ij}(z_t, k_{ij})\} dz \\ F_y(\theta_{ij}) &= \sum_{i=1}^{Nt} \int_0^{a_a} dFy\{\theta_{ij}(z_t, k_{ij})\} dz \\ F_z(\theta_{ij}) &= \sum_{i=1}^{Nt} \int_0^{a_a} dFz\{\theta_{ij}(z_t, k_{ij})\} dz \end{aligned} \quad (2.5)$$

Подставляя уравнение (2.4) в уравнение (2.5) получается:

$$\begin{aligned} F_x(\theta_{ij}) \\ F_y(\theta_{ij}) \\ F_z(\theta_{ij}) \end{aligned} = \left\{ \begin{aligned} &\sum_{i=1}^{Nt} \int_0^{a_a} [-dF_t \cos(\theta_{ij}) \quad -dF_r \sin(\theta_{ij}) \sin(k) \quad -dF_a \sin(\theta_{ij})] dz \\ &\sum_{i=1}^{Nt} \int_0^{a_a} [-dF_t \sin(\theta_{ij}) \quad -dF_r \cos(\theta_{ij}) \sin(k) \quad -dF_a \cos(\theta_{ij})] dz \\ &\sum_{i=1}^{Nt} \int_0^{a_a} [0 \quad -dF_r \cos(k_{ij}) \quad -dF_a \sin(k)] dz \end{aligned} \right\}$$

В исследованиях [24,28,29] были проведены испытания для проверки разработанной механистической модели силы резания и установлены значения сил резания. Проводились испытания на Cincinnati Milacron Sabre 750VMC - это вертикальный обрабатывающий центр с программным обеспечением Acramatic 2100 для проведения экспериментов фрезерования на сплаве Инконель 718, который является труднообрабатываемым материалом. Фреза диаметром 32 мм, с шестью режущими кромками, использовалась схема попутного фрезерования и для сравнения была взята фреза с винтовой режущей кромкой для обработки титана. Эксперименты проводились при двух скоростях резания (n_s) 93 и 62 об/мин, в то время как другие параметры фрезерования были следующими:

- осевая глубина резания ($a_a = 18,75$ мм);
- радиальная глубина резания ($a_p = 1.75$ мм);
- скорость подачи ($f = 41,85$ мм / мин);
- применение эмульсии.

Три компонента (F_x , F_y и F_z) силы резания были измерены, используя Kistler 9272 четырех компонентный динамометр и Tektronix TDS420A осциллограф. Полученные шесть коэффициентов, режущей силы и граничных усилий, при фрезеровании на 93 и 62 оборотов в минуту и при эмульсионной охлаждения, приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Значение коэффициентов силы резания

n_s , об/мин	k_{tc} , Н/мм ²	k_{rc} , Н/мм ²	k_{ac} , Н/мм ²	k_{te} , Н/мм	k_{re} , Н/мм	k_{ae} , Н/мм
93	6489,7	-7951,9	179,057	-21,384	9,6	-3,296
62	3172,2	-5135,1	-746,5	40,2797	-45,6	3,392

На рисунке 2.5 представлены значения сил резания за один оборот фрезы с криволинейной режущей кромкой, а на рисунке 2.6 силы резания стандартной фрезой за один оборот, при скорости резания 93 об/мин.

Технический результат, который обеспечивает данное изобретение, заключается в получении черновой и чистовой прямолинейной поверхности при фрезеровании, предотвращении возможности сваривания обрабатываемого материала с режущей поверхностью фрезы и последующего выкрашивания режущих кромок, предотвращении наививания стружки на инструмент и облегчении ее отвода из зоны резания, возможности повышения режимов резания.

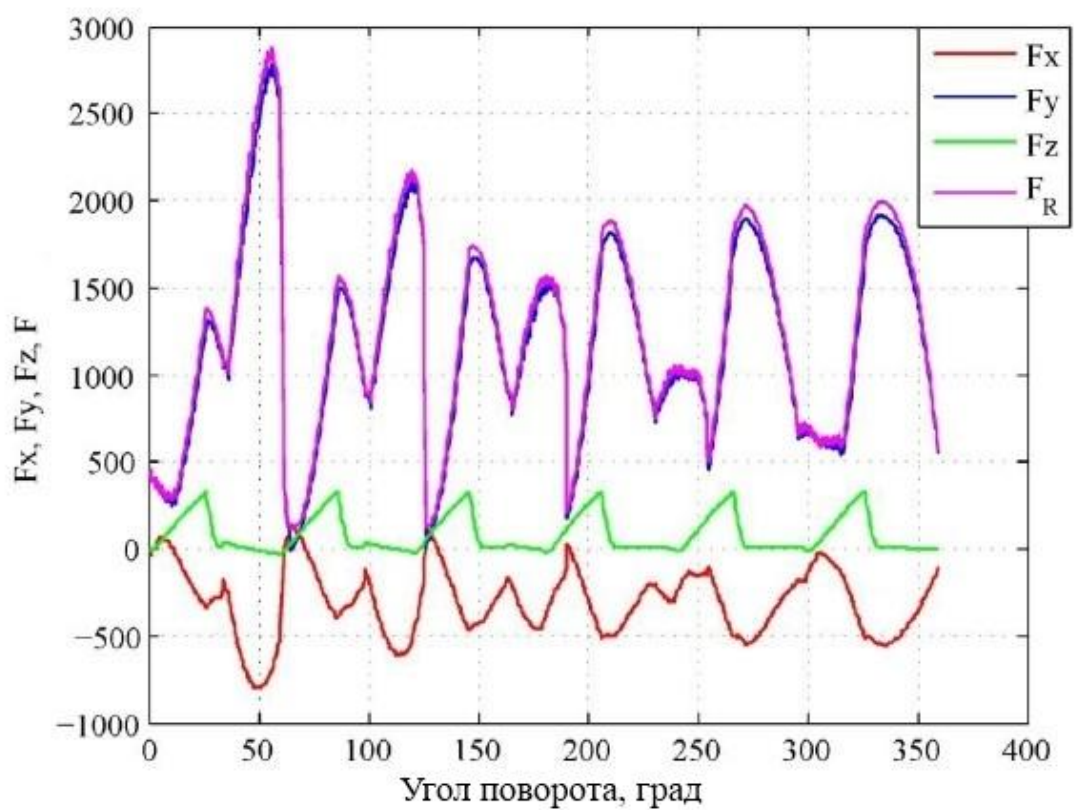


Рисунок 2.5 Значения составляющих силы резания и результирующей силы резания, при обработке фрезой с волнообразным профилем режущей кромки

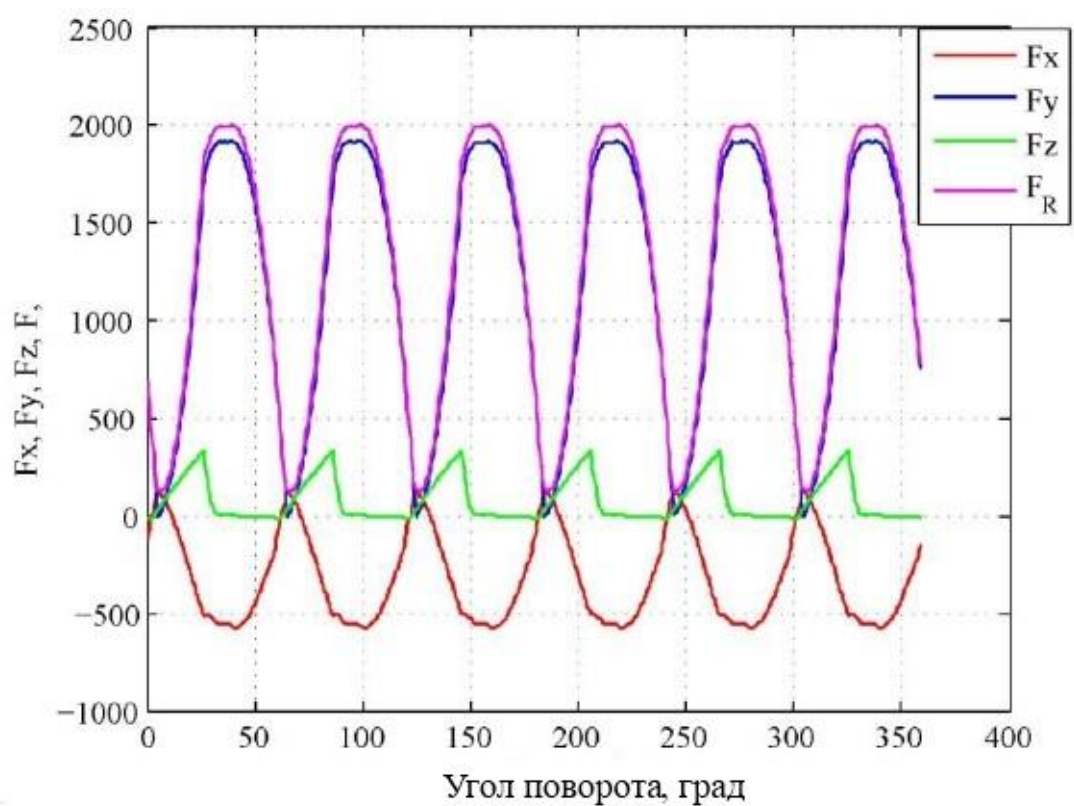


Рисунок 2.6 Значения составляющих силы резания и результирующей силы резания, при обработке стандартной фрезой

Указанный технический результат достигается посредством изменения конструкции режущей части фрезы. Для этого передняя поверхность режущей кромки зуба помимо винтовой, выполнена волнообразной по передней поверхности зуба с чередующимися выступами и впадинами, и величиной волны с наибольшей амплитудой (А) как видно на рисунке 2.7. При этом все крайние точки режущей кромки каждого зуба лежат на образующей цилиндра, то есть, равноудалены от оси фрезы, а передние углы зубьев во впадинах волновинтовой поверхности, на выступах и чисто винтовых участках выполнены одинаковыми. Это позволяет применять фрезы данной конструкции не только на черновых, но и на чистовых операциях, так как за фрезой получается прямолинейная поверхность.

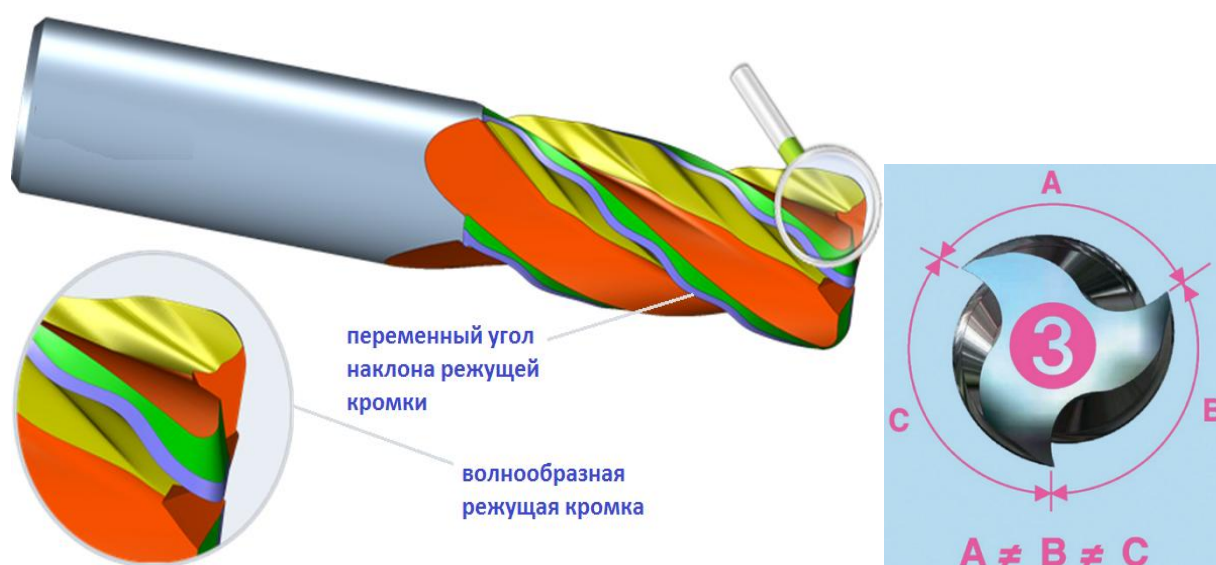


Рисунок 2.7

Причем волнообразная режущая кромка зуба выполняется с как можно большей амплитудой синусоиды волны, это приводит к изменению величины и направления сдвиговых деформаций срезаемого материала, вследствие постоянно изменяющегося угла наклона зуба по длине режущей кромки, что дает сбалансированные силы резания и способствует дроблению стружки. Кроме того, выступы волн последующих зубьев выполнены со смещением и для фрез с четным числом зубьев располагаются напротив впадин предыдущего зуба. Для фрез с нечетным числом зубьев выступы смещаются на иную - индивидуальную расчетную величину (рисунок 2.8). Расчетная величина смещения вычисляется индивидуально, так как зависит от числа зубьев, диаметра фрезы, шага волны и технологических возможностей оборудования.



Рисунок 2.8

Данные конструктивные особенности обеспечивают сбалансированные силы резания в процессе обработки, снижение вибраций, уменьшению нагрузки на обрабатываемую деталь, создает условия резания по "менее упрочненной поверхности" и способствуют процессу дробления стружки.

Дополнительно, для достижения указанного технического результата, в теле фрезы выполнены основной и отводные, каналы для подвода смазывающе-охлаждающей жидкости в зону резания (рисунок 2.9). Основной канал выполнен глухим в торцевой части и расположен вдоль оси цилиндра фрезы. Отводные каналы меньшего диаметра имеют выходные отверстия, расположенные в каждой стружечной канавке и обеспечивающие подачу смазывающе-охлаждающей жидкости непосредственно в зону резания. Причем отверстия первого от торца фрезы ряда расположены на одинаковом расстоянии от рабочего торца фрезы с наклоном к ее оси под углом, при котором смазывающе-охлаждающая жидкость подается в зону резания находящуюся в районе радиуса на рабочем торце фрезы. Последующие отверстия каналов для подвода смазывающе-охлаждающей жидкости располагаются в шахматном порядке от зуба к зубу перпендикулярно оси фрезы или под наклоном в сторону рабочего торца инструмента. Такое расположение каналов не снижает прочность фрезы на изгиб в сечениях, в которых просверлены отверстия и позволяют подавать смазывающе-охлаждающую жидкость равномерно в зону резания, что немаловажно при

фрезеровании со значениями ширины фрезерованиями близкими к длине режущей части фрезы. Для изготовления фрезы предлагаемой конструкции использована быстрорежущая сталь, полученная методом порошковой металлургии.



Рисунок 2.9

Учитывая особенности данной конструкции фрезы, современные технологии и оборудование, а также методы проектирования сборных концевых фрез с СМП представляется возможным спроектировать сборную концевую фрезу с расположением режущих пластин по волне, взяв за основу конструкцию фрезы из быстрорежущей стали с волнообразным расположением режущих кромок. Концевая фреза с волнообразным расположением пластин может стать еще эффективнее своего аналога фрезы из быстрорежущей стали, так как с использованием современных СМП при правильном расположении их в корпусе значительно повышается стойкость инструмента.

3 РАСЧЕТЫ И АНАЛИТИКА

Студент гр. 10300

(Подпись)

А.Н. Ивкин

(Дата)

Руководитель
к.т.н., доцент,
зав. кафедры ТМС

(Подпись)

А.А. Моховиков

(Дата)

Нормоконтроль,
к.т.н., доцент кафедры ТМС

(Подпись)

А.А. Ласуков

(Дата)

3.1 Служебное назначение и техническая характеристика детали

Деталь “Фреза концевая с криволинейной режущей кромкой” является инструментом для **обработки авиационной** промышленности на черновых и чистовых операциях.

К основным поверхностям детали относятся: Хвостовик диаметром 50h6 мм, который крепится в шпинделе станка. Поверхность диаметром 50_{-0,05} мм, являющаяся режущей частью инструмента и центровые отверстия А3,15.

Фреза выполнена из материала сталь Р6М5К5 ГОСТ 19265-73. Химический состав данного материала представлен в таблице 3.1, а механические свойства в таблице 3.2.

Таблица 3.1 - Химический состав

Химический состав, %							
C	0,84 - 0,92	Cr	3,8 - 4,3	Mn	до 0,5	W	5,7 - 6,7
Si	до 0,5	Mo	4,8 - 5,3	Ni	до 0,4	V	1,7 - 2,1
S	до 0,03	Co	4,7 - 5,2	P	до 0,03	Fe	~75

Таблица 3.2 – Механические свойства при T=20°C

Механические свойства стали Р6М5К5 в состоянии поставки (после отжига) при 20 °С										
$\sigma_{0,05}$ (МПа)	$\sigma_{0,2}$ (МПа)	σ_B (МПа)	δ_5 (%)	ψ %	$\sigma_{сж0,2}$ (МПа)	$\sigma_{сж}$ (МПа)	ϵ (%)	T_K (МПа)	γ (%)	KCU (Дж/см ²)
240 (5)	510 (20)	850 (30)	12 (1)	14 (1)	520 (13)	2720 (80)	54 (1,5)	590 (18)	60 (1,4)	18 (1)

Главные преимущества:

- имеет хорошую вязкость;
- повышенное сопротивление износу;
- хорошую шлифуемость.

3.2 Производственная программа выпуска изделий.

Программу выпуска принимаем по заданию

$N_{изд} = 1200$

Масса детали:

$m = 2.02$ кг

Полученные значения сведены в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 – Подетальная годовая производственная программа

№ чертежа	Наименование детали	Марка материала	Число деталей на изделие	Процент на запасные части	Число деталей			Масса, т	
					на основную программу	на запасные части	всего	детали	На программу с запасными частями
710-50-50-150-W50	Фреза	Сталь Р6М5К5 ГОСТ 19265-73	1	6	1200	72	1272	$2,02 \cdot 10^{-3}$	2,56

Для серийного производства определяется размер партии запуска:

$$n = \frac{N \cdot a}{F}, \quad (3.1)$$

где a – период запуска в днях, по рекомендациям принимаем, $a = 3$;
 F – число рабочих дней в году, для 2016-го года $F = 247$.

$$n = \frac{1272 \cdot 3}{247} = 15_{шт.}$$

3.3 Анализ технологичности изделия

Деталь имеет сложную конструкцию, так как имеются сложная геометрия волнообразной режущей кромки, что значительно усложняет процесс изготовления изделия и требует применения современных дорогостоящих станков с ЧПУ.

Но вместе с тем, при обработке обеспечивается свободный доступ инструмента ко всем обрабатываемым поверхностям, деталь является достаточно жесткой. Деталь имеет совокупность поверхностей, которые могут быть использованы в качестве технологических баз. Изготовление детали данного типа со сложной конструкцией возможно на современных пятикоординатных фрезерных станках с ЧПУ.

Деталь не имеет острых кромок и грубой шероховатости, поэтому после закалки возможность появления трещин уменьшается.

С учетом вышесказанного конструкция детали является достаточно технологичной.

3.4 Выбор исходной заготовки

С учетом технологических свойств материала детали (материал детали сталь Р6М5К5), её габаритов и массы, требований к механическим свойствам, а также типом производства (мелкосерийный) выбираем в качестве исходной заготовки – круглый прокат по ГОСТ7417-75.

Исходные данные: $D_{01}=52\text{мм}$, $A_{01}=153\text{ мм}$, $S=2124\text{ мм}^2$, $m_{\text{усл}}=16,67\text{ кг}$

После заготовительной операции заготовка принимает форму, представленную на рисунке 3.1.

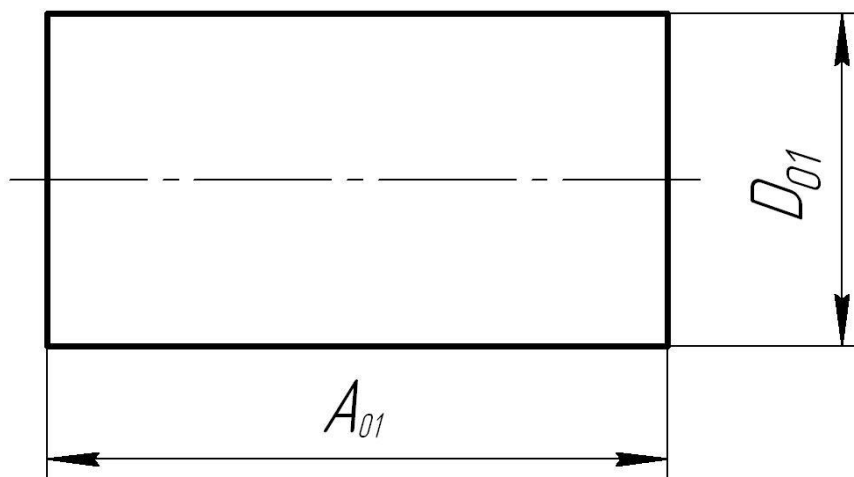


Рисунок 3.1

Коэффициент использования материала $K_{\text{и}}$:

$$K_{\text{и}} = \frac{m_{\text{д}}}{m_{\text{з}}}, \quad (3.2)$$

где $m_{\text{д}}$ – масса детали, кг;

$m_{\text{з}}$ – масса заготовки (кг).

$m_{\text{д}}=2.02\text{кг}$

$$m_{\text{з}} = \frac{L \times m_{\text{усл}}}{1000} = \frac{153 \times 16.67}{1000} = 2.55\text{кг}.$$

$$K_{\text{и}} = \frac{m_{\text{д}}}{m_{\text{з}}} = \frac{2,02}{2,55} = 0,79.$$

3.5 Разработка маршрута технологии изготовления фрезы
 Маршрут технологии изготовления фрезы представлен в таблицы 3.4.

Таблица 3.4

Операция	Наименование и содержание операции	Оборудование
005	Отрезная - Отрезать заготовку в размер 153Н12	Пила DoAll 420 NC
010	Токарная с ЧПУ - Подрезать торец в размер 151Н10 - Точить поверхность в размеры Ø50,3h9 на длину 95Н10 с образованием фаски 1.5х45 - Центровать торец в размер А3,15	Токарный станок с ЧПУ 1П756Ф3
015	Токарная с ЧПУ - Подрезать торец в размер 150±1 - Точить поверхность в размер Ø50,1h9 на длину 55Н10 - Центровать торец в размер А3,15 на длину 12 - Расточить отверстие в размер Ø16Н10 на длину 5	Токарный станок с ЧПУ 1П756Ф3
020	Термическая Нормализация	
025	Круглошлифовальная - Шлифовать поверхность предварительно, в размер Ø50,1-0,025 на длину 95Н10	Круглошлифовальный станок STUDER S-30
030	Фрезерная с ЧПУ Установ А - Фрезеровать лыску выдерживая размеры 23 ⁺¹ ,47,8-0,4 - Фрезеровать лыску выдерживая размеры 45-1,18 ^{+0,05} ,47,8-0,4 Установ Б - Фрезеровать 6 стружечных канавок - Фрезеровать 6 передних поверхностей - Фрезеровать 6 стружечные канавок на торце	Обрабатывающий центр MC – 032
035	Слесарная - Острые кромки притупить - Снять заусенцы	
040	Закалка ТВЧ	
045	Круглошлифовальная - Шлифовать поверхность окончательно, в размеры Ø 50-0,016 на длину 95Н10	Круглошлифовальный станок STUDER S-30
050	Круглошлифовальная - Шлифовать поверхность окончательно, в размер Ø 50-0,05 на длину 53±0,7	Круглошлифовальный станок STUDER S-30
055	Заточная -Шлифовать переднюю поверхность по программе	Заточной станок с ЧПУ Schutte WU-305
060	Заточная - Шлифовать заднюю поверхность	Заточной станок с ЧПУ Schutte WU-305
065	Контрольная - Контролировать размеры детали.	Контрольная плита

3.6 Выбор баз

005 Операция отрезная

Базирование осуществляется по плоскости, направляющей и торцу (рисунок 3.2). Эта схема базирования лишает заготовку пяти степеней свободы. Закрепление заготовки осуществляется тисками.

Погрешность базирования для всех размеров, полученных на данной операции равна нулю: $E_6=0$

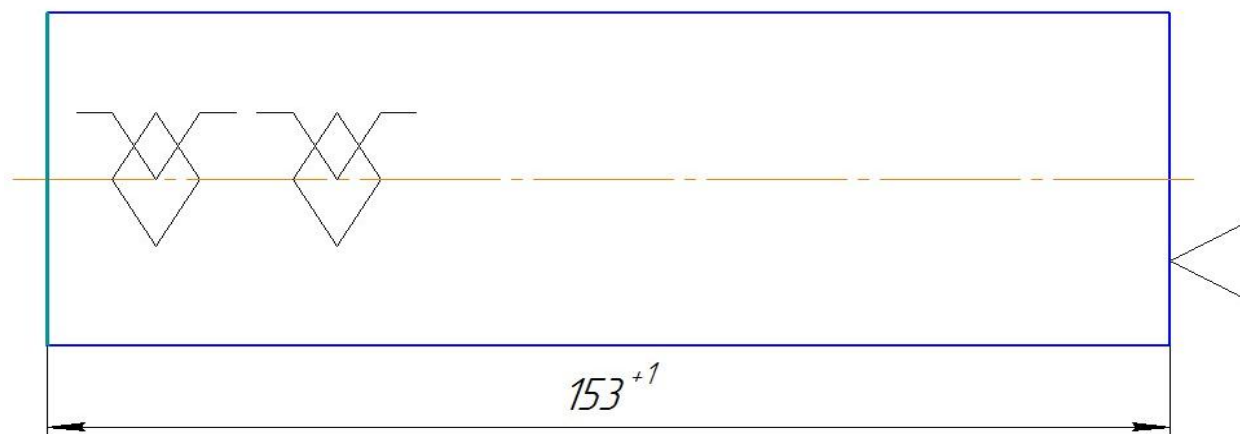


Рисунок 3.2 Схема базирования на операции 005

010 Операция токарная с ЧПУ

Базирование осуществляется в трехкулачковом патроне с упором в торец (рисунок 3.3). Эта схема базирования лишает заготовку пяти степеней свободы. Закрепление заготовки осуществляется патроном.

Погрешность базирования для всех размеров, полученных на данной операции равна нулю: $E_6=0$

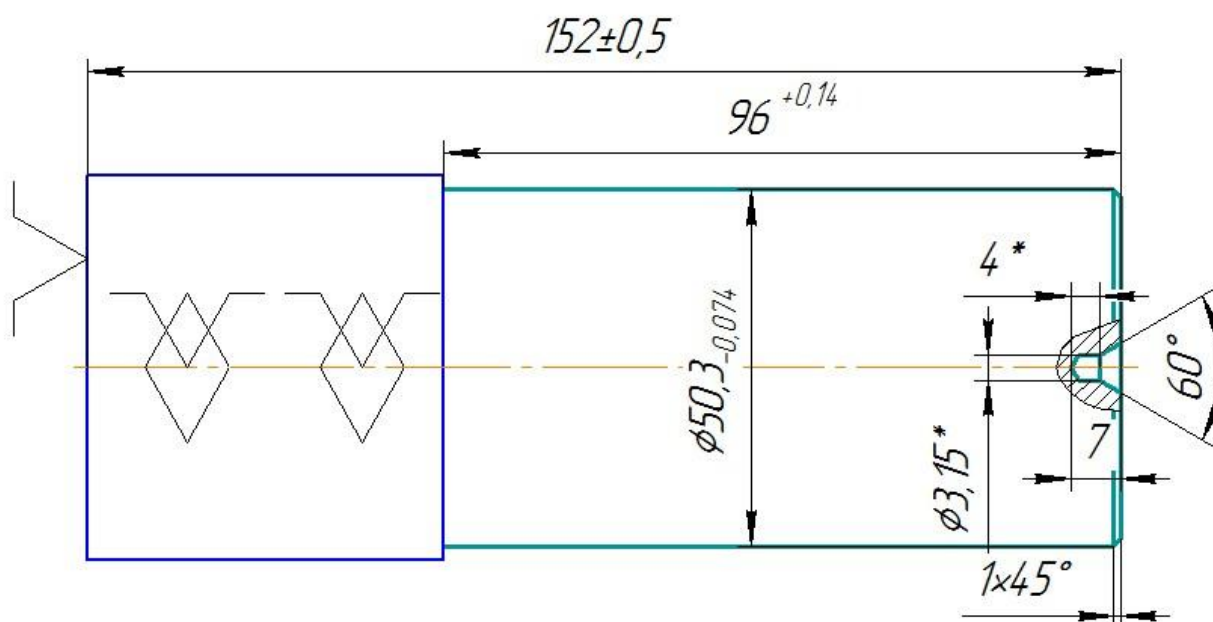


Рисунок 3.3 Схема базирования на операции 010

015 Операция токарная с ЧПУ

Базирование осуществляется в трехкулачковом патроне с упором в торец (рисунок 3.4). Эта схема базирования лишает заготовку пяти степеней свободы. Закрепление заготовки осуществляется патроном.

Погрешность базирования для всех размеров, полученных на данной операции равна нулю: $E_0=0$

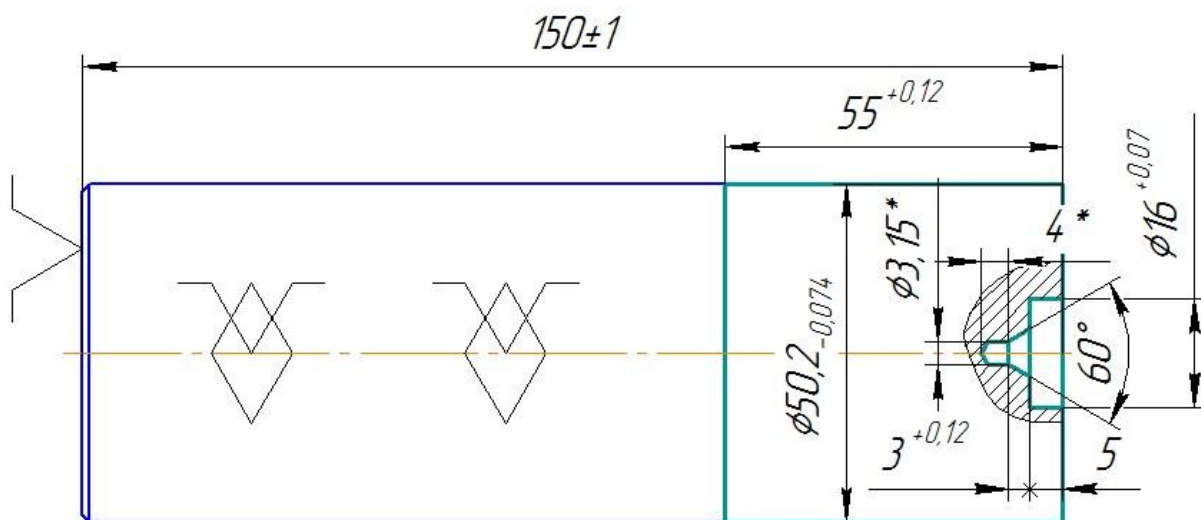


Рисунок 3.4 Схема базирования на операции 015

025 Операция круглошлифовальная

Базирование осуществляется в центрах (рисунок 3.5). Эта схема базирования лишает заготовку пяти степеней свободы. Закрепление заготовки осуществляется поводковым патроном.

Погрешность базирования для всех размеров, полученных на данной операции равна нулю: $E_0=0$

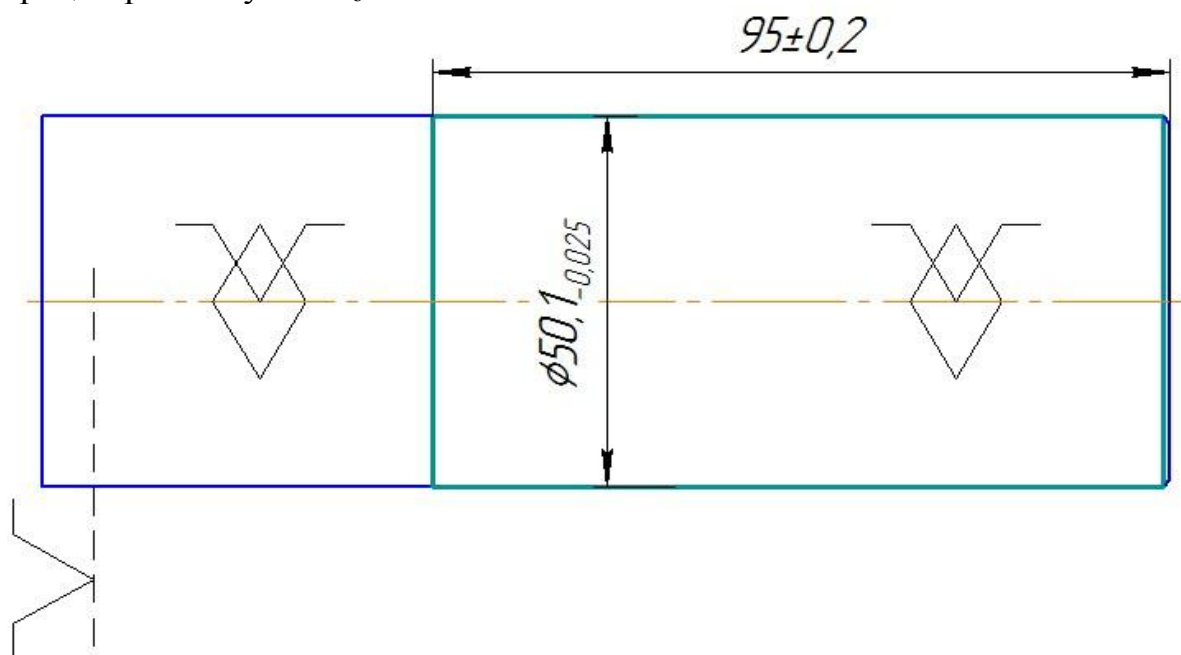


Рисунок 3.5 Схема базирования на операции 025

030 Операция Фрезерная с ЧПУ

Базирование осуществляется в трехкулачковом патроне с упором в торец (рисунок 3.6 и 3.7). Эта схема базирования лишает заготовку пяти степеней свободы. Закрепление заготовки осуществляется патроном.

Погрешность базирования для всех размеров, полученных на данной операции равна нулю: $E_6=0$

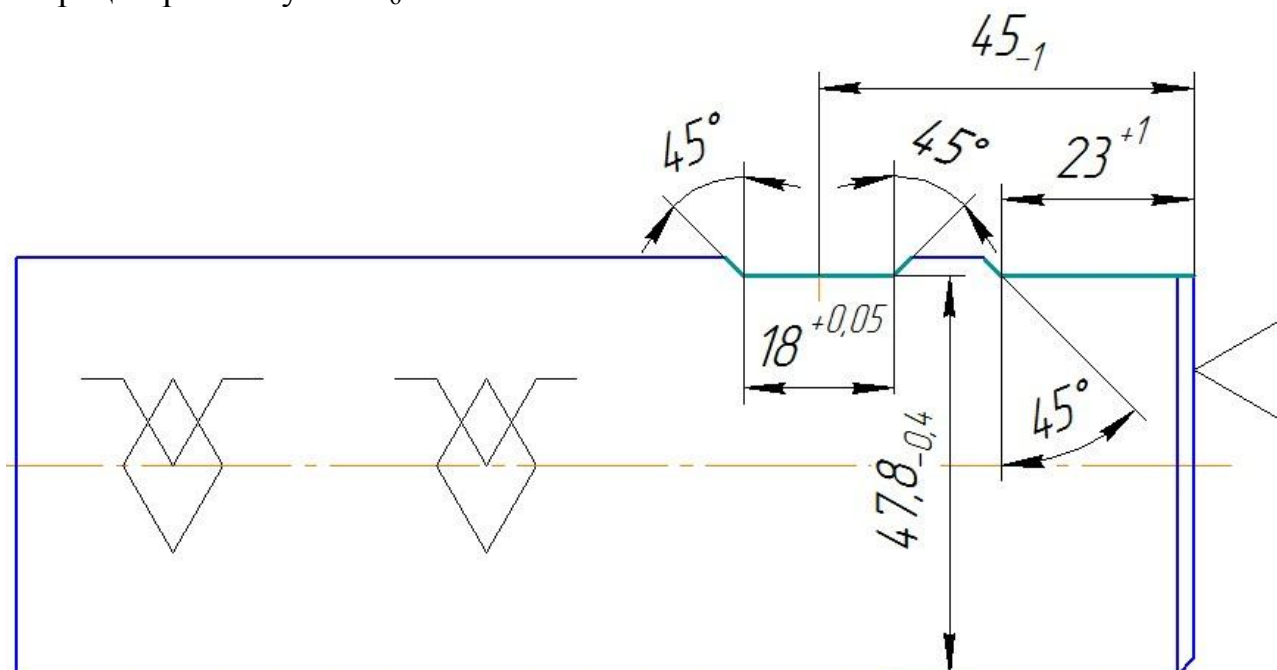


Рисунок 3.6 Схема базирования на операции 030 установ А

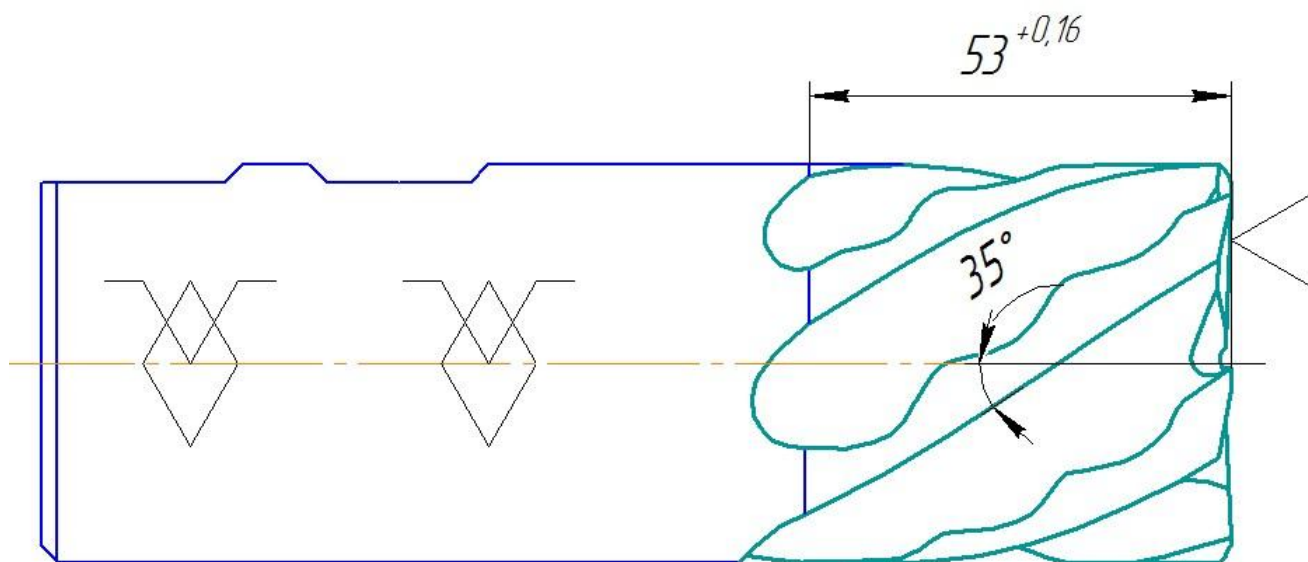


Рисунок 3.7 Схема базирования на операции 030 установ Б

045 Операция круглошлифовальная

Базирование осуществляется в центрах (рисунок 3.8). Эта схема базирования лишает заготовку пяти степеней свободы. Закрепление заготовки осуществляется поводковым патроном.

Погрешность базирования для всех размеров, полученных на данной операции равна нулю: $E_6=0$

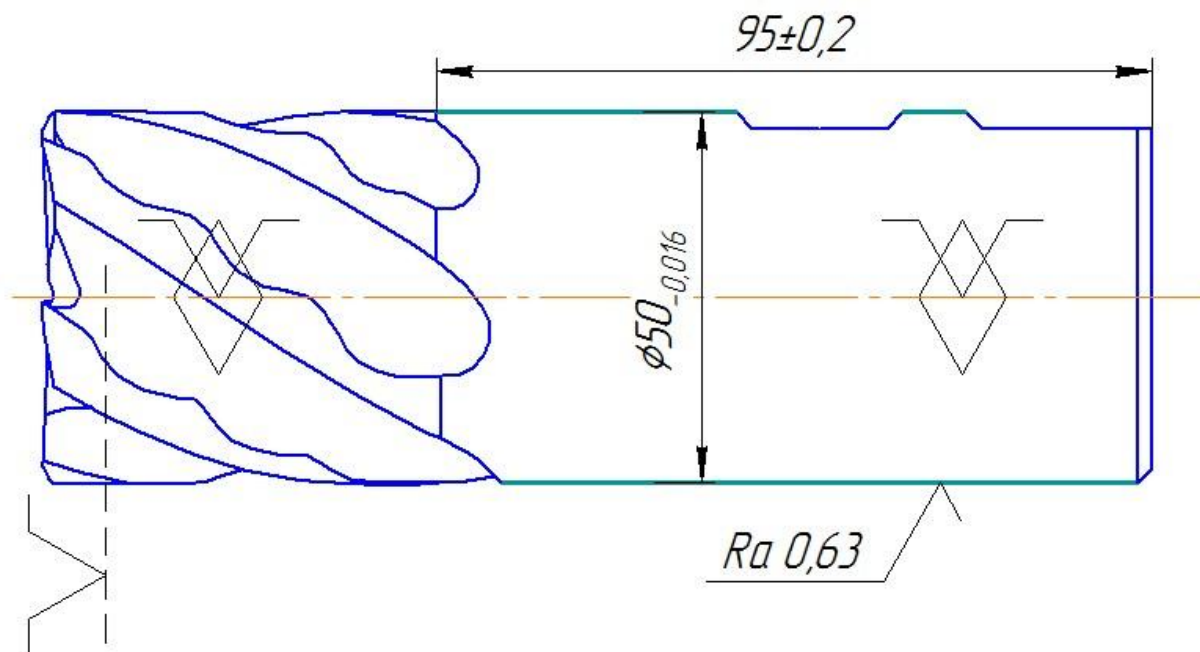


Рисунок 3.8 Схема базирования на операции 045

050 Операция круглошлифовальная

Базирование осуществляется в центрах (рисунок 3.9). Эта схема базирования лишает заготовку пяти степеней свободы. Закрепление заготовки осуществляется поводковым патроном.

Погрешность базирования для всех размеров, полученных на данной операции равна нулю: $E_6=0$

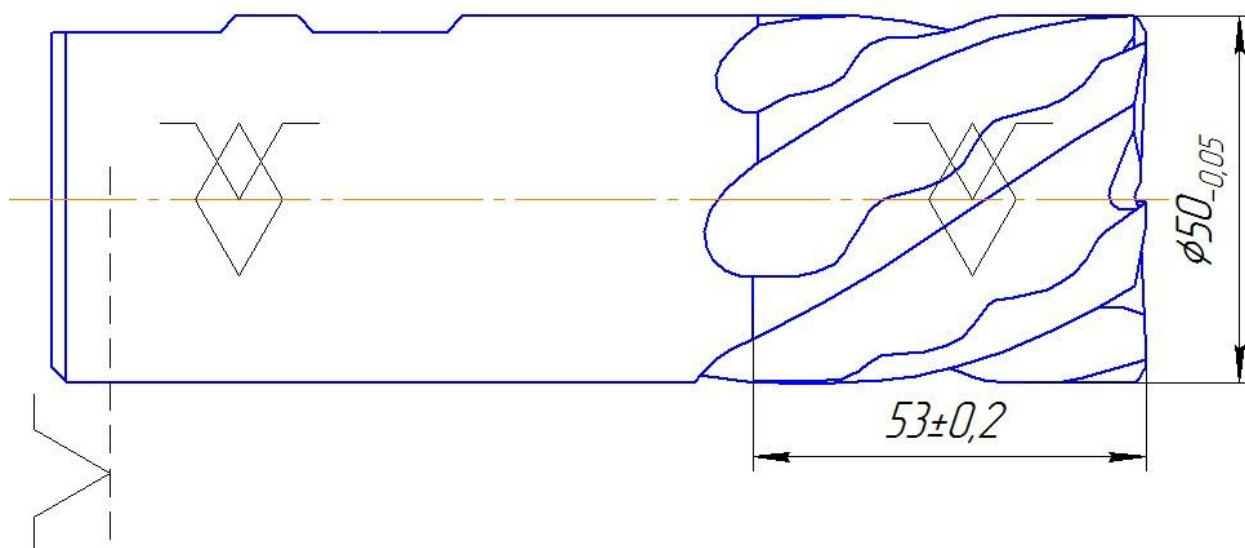


Рисунок 3.9 Схема базирования на операции 050

055 Операция заточная

Базирование осуществляется в трехкулачковом патроне с упором в торец (рисунок 3.10). Эта схема базирования лишает заготовку пяти степеней свободы. Закрепление заготовки осуществляется патроном.

Погрешность базирования для всех размеров, полученных на данной операции равна нулю: $E_6=0$

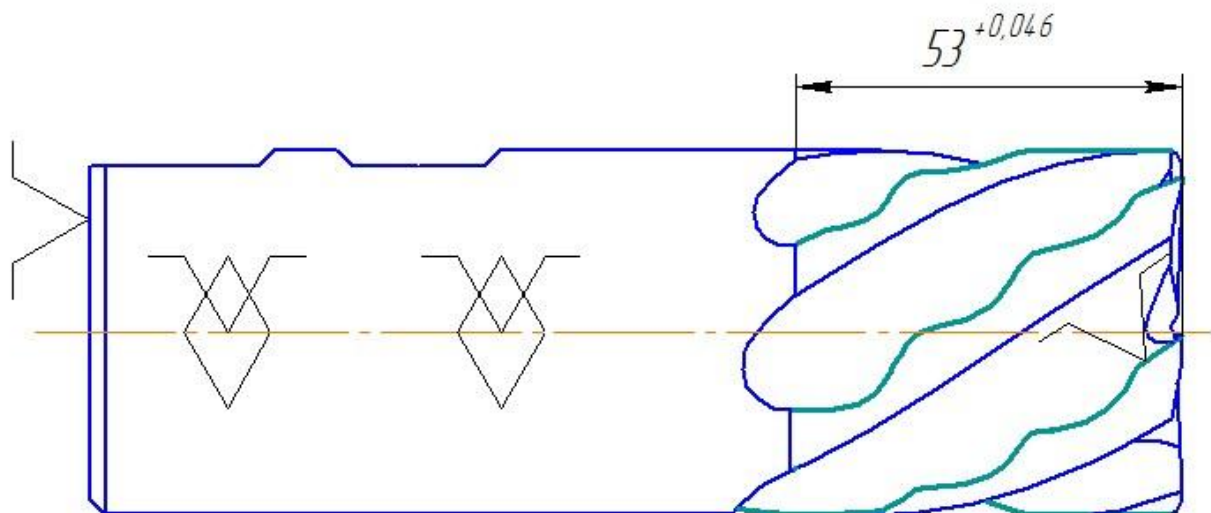


Рисунок 3.10 Схема базирования на операции 055

060 Операция заточная

Базирование осуществляется в трехкулачковом патроне с упором в торец и переднюю поверхность (рисунок 3.11). Эта схема базирования лишает заготовку шести степеней свободы. Закрепление заготовки осуществляется патроном.

Погрешность базирования для всех размеров, полученных на данной операции равна нулю: $E_6=0$

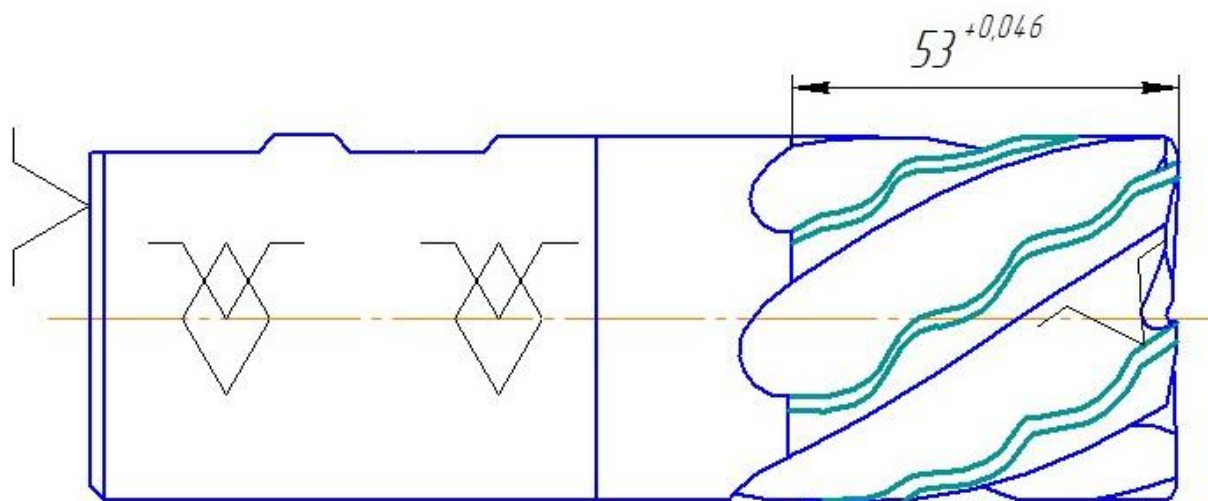


Рисунок 3.11 Схема базирования на операции 060

Выбор средств технологического оснащения
Токарный станок с ЧПУ модели 1П756Ф3
Основные данные представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5

Наименование характеристики:	Значение:
Наибольшая длина обрабатываемой заготовки, мм	320
Наибольшая глубина растачивания, мм	120
Наибольший диаметр заготовки, мм: - устанавливаемой над станиной - обрабатываемой в патроне	630 500
Наибольший шаг нарезаемой резьбы, мм	39,999
Пределы частот вращения шпинделя, об/мин	8-1600,10-2000
Пределы продольных и поперечных рабочих подач суппорта, мм/мин	1-4000
Ускоренные продольные и поперечные подачи суппорта, мм/мин	8000
Дискретность отсчёта по осям координат, мм	0,001
Количество позиций инструмента на верхней revolverной головке	8
Количество позиций на нижней revolverной головке	4
Конец шпинделя по ГОСТ 12523-67	11M
Количество revolverных головок на станке	2
Мощность главного привода, кВт	22
Габаритные размеры, мм: - длина - ширина - высота	4600 2400 2600
Масса, кг	8600
Наибольшая длина обрабатываемой заготовки, мм	320

Обрабатывающий центр MC – 032
Основные данные представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6

Наименование характеристики:	Значение:
Размеры рабочей поверхности стола (диаметр), мм	320
Технологические возможности:	
Фрезерование чугуна НВ 180-200 не более, м3/мин	200 x 10 ⁻⁶
Сверление отверстий в стали (диаметр) не более, мм	32
Растачивание отверстий (диаметр) не более, мм	120
Нарезание резьбы метчиком, не более	M24
Рабочие хода, мм:	
По оси «X»	550
По оси «Y»	500
По оси «Z»	500
<i>Поворот, град.</i>	
По оси «A»	220

Продолжение таблицы 3.6

Наименование характеристики:	Значение:
По оси «С»	360
Рабочая подача	
по осям «X»; «Y»; «Z», мм/мин	1 – 4000
по осям «A»; «C», град/ мин	1 – 360
Быстрый ход по осям	
«X»; «Y»; «Z», м/мин	10
по осям «A»; «C», об / мин	
ось «A»	5
ось «C»	10
Количество гнезд в инструментальном магазине, шт	32
Частота оборотов шпинделя, об/мин	12 – 4800
Дискретность задания координат:	
по осям «X»; «Y»; «Z», мм	0,001
по осям «A»; «C», град.	0,001
Точность позиционирования:	
по осям «X»; «Y»; «Z», мм	0,03
по осям «A»; «C» угл. Сек.	30
Мощность главного двигателя, кВт	15
Вес станка, кг	7500

Круглошлифовальный станок STUDER S-30
Основные данные представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7

Наименование характеристики:	Значение:
Расстояния между центрами, мм	650
Высота центров, мм	125 / 175 / 225
Вес детали, кг	130
Диапазон поворота шлифовальной шпиндельной бабки, град	0...+180
Шлифовальный круг, мм	500×63
Мощность привода, кВт	5,5

Заточной станок с ЧПУ Schutte WU-305
Основные данные представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8

Наименование характеристики:	Значение:
Ход суппорта шпинделя по оси X, мм	300
Ход суппорта шпинделя по оси Y, мм	130
Ход шлифовального суппорта по вертикальной оси Z, мм	190
Оси, управляемые ЧПУ	X, Y, Z, A (4 шт.)
Высота оси вращения вала шлифовального круга, мм	75÷265
Угол поворота шлифовального суппорта вокруг вертикальной оси, град.	-90°÷0°÷+90°
Угол поворота шлифовального суппорта вокруг горизонтальной оси, град.	-90°÷0°÷+90°

Продолжение таблицы 3.8

Наименование характеристики	Значение
Угол поворота шпинделя инструмента вокруг вертикальной оси, град.	$-90^{\circ} \div 0^{\circ} \div +90^{\circ}$
Частота вращения шлифовального круга, мин-1	2790
Мощность электродвигателя шлифовального круга, 220В, 50-60Гц, Вт	0,25
Наибольший диаметр заточного круга, мм	125
Посадочный диаметр заточного круга, мм	20
Частота вращения пневматического шпинделя, мин-1	0÷45000
Потребление сжатого воздуха пневматического шпинделя, л/мин	~250
Необходимое давление для пневматического шпинделя, Атм.	6÷8
Высота оси шпинделя инструмента, мм	115
Емкость бака системы подачи СОЖ, л	30
Производительность устройства подачи СОЖ, л/мин	16...35
Мощность двигателя насоса устройства подачи СОЖ 1-я/2-я/3-я скорость, Вт	28/45/63
Суммарная мощность станка, кВт	1,2
Габариты, мм	1200x880x1700
Масса станка нетто (без блока управления), кг	345
Масса блока управления нетто, кг	37

3.7 Расчет режимов резания

Расчет режимов резания для токарной и фрезерной операций выполняется по рекомендациям онлайн калькулятора фирмы Sandvik Coromant [9] и сведены в таблицу 3.9 и 3.10.

Остальные расчеты производим по методике [35].

Предварительное шлифование поверхности $\varnothing 50,3h9$.

Выбираем шлифовальный круг на основе электрокорунда белого:

ПП 350×63×127 24А 40 С2 7 К5 ГОСТ 2424-83.

Стойкость инструмента $T=5$ мин.

По выбранному диаметру круга и паспортным данным станка определяем скорость вращения круга:

$$V_K = \frac{\pi \cdot D_K \cdot n_K}{1000 \cdot 60}, \quad (3.3)$$

где D_K – диаметр круга;

n_K – частота вращения шпинделя.

$$V_K = \frac{3,14 \cdot 350 \cdot 2500}{1000 \cdot 60} = 45 \text{ м/с.}$$

Скорость детали принимаем в соответствии с рекомендациями, приведенными в таблице 55 [35]: $V_{\text{заг}} = 25$ м/мин.

$$n_3 = \frac{1000 \cdot v_3}{\pi \cdot D_3} = \frac{1000 \cdot 25}{3,14 \cdot 50,1} = 158 \text{ об/мин} \quad (3.4)$$

где v_3 – скорость заготовки;

D_3 – диаметр заготовки.

Принимаем $n_3 = 150$ об/мин, тогда:

$$v_3 = \frac{\pi \cdot D_3 \cdot n}{1000} = \frac{3,14 \cdot 50,1 \cdot 150}{1000} = 23,6 \text{ м/мин.}$$

Глубину резания выбираем по таблице 55 [35]: $t = 0,025$

Продольную подачу выбираем по таблице 55 [35]: $S_{Bt} = 30$ мм/об.

Эффективная мощность, кВт, при шлифовании периферией круга:

$$N = C_N \cdot V_3^r \cdot t^x \cdot s^y \cdot d^q, \quad (3.5)$$

Значения коэффициента C_N и показателей степени определяем по таблице 56 [35].

$C_N = 1,3$; $r = 0,75$; $x = 0,85$; $y = 0,7$; $q = 0,2$.

$$N = 1,3 \cdot 23,6^{0,75} \cdot 0,025^{0,85} \cdot 30^{0,7} \cdot 50,1^{0,2} = 4,6$$

Проверка по мощности:

$$N \leq N_{cm} \cdot \eta \quad (3.6)$$

где $N_{cm} = 5,5$ кВт – мощность главного электродвигателя;

$\eta = 0,9$ – КПД привода.

$$4,6 < 4,95.$$

Режимы остальных переходов рассчитаны аналогично и сведены в таблицу 3.11.

Таблица 3.9 – Режимы резания токарных операций

Переход	Глубина t , мм	Подача S , мм/об	Частота вращения шпинделя n , об/мин	Скорость резания V , м/мин	Сила резания P_z , Н	Мощность резания N , кВт
Подрезать торец в размер 151Н10	2	0,417	3000	146	3463	8,26
Точить поверхность в размер Ø50.3h9 на длину 95Н10 с образованием фаски 1.5х45	0,85	0,35	958	159	1140	2,96
Центровать торец в размер А3,15	6	0,1	800	10,5		
Подрезать торец в размер 150±1	1	0,417	2500	146	1706	4,07
Точить поверхность в размер Ø50,2h9 на длину 55Н10	0,95	0,35	958	159	1240	3,22
Центровать торец в размер А3,15 на длину 12	12	0,1	800	10,5		
Расточить отверстие в размер Ø16Н10 на длину 5	2,5	0,18	3000	151	1394	3,44

Таблица 3.10 – Режимы резания фрезерной операции:

Переход	Глубина фрезерования t , мм	Ширина фрезерования b , мм	Подача на зуб S_z , мм	Минутная подача S_m , мм/мин	Частота вращения шпинделя n , об/мин	Скорость резания V , м/мин	Сила резания P_z , Н	Мощность резания N , кВт
Фрезеровать лыску в размеры 23^{+1} ; $47,8_{-0,4}$	2,2	11,5	0,12	586	2470	140	655	1,5
Фрезеровать лыску в размеры 45_{-1} ; $18^{+0,05}$; $47,8_{-0,4}$	2,2	18	0,12	595	2510	142	1207	2,8
Фрезеровать 6 стружечных канавок на цилиндре	3	10	0,045	292	3200	154	1550	3,9
Фрезеровать 6 передних поверхностей	3	3	0,028	217	3500	88	626	0,9
Фрезеровать 6 стружечных канавок на торце	4	7	0,029	258	4260	70,3	1054	1,21

Таблица 3.11 – Режимы резания шлифовальных операций

Переход	Глубина t , мм	Подача S_{Bz} , мм	Частота вращения шпинделя n , об/мин	Скорость вращения круга V_k , м/с	Частота вращения заготовки n_z , об/мин	Скорость заготовки V_z , м/мин	Мощность резания N , кВт
Шлифовать поверхность предварительно в размер $\varnothing 50,1_{-0,025}$ на длину 95H10	0,025	30	2500	45	150	23,6	2,6
Шлифовать поверхность окончательно в размер $\varnothing 50_{-0,016}$ на длину 95H10	0,01	15	2500	45	315	49,5	1,9
Шлифовать поверхность окончательно в размер $\varnothing 50_{-0,05}$ на длину $53 \pm 0,7$	0,01	15	2500	45	315	49,5	1,9
Заточка передней поверхности по программе	0,005	2	40000	21			0,3
Заточка задней поверхности по программе	0,01	4	3500	36			0,6

3.8 Нормирование технологического процесса

Технической нормой времени называется время, необходимое для выполнения технологической операции в конкретных производственных условиях [37,38].

Основное время для круглошлифовальной операции.

Предварительное шлифование:

$$t_o = \frac{l}{S_B \cdot B_K \cdot n} i \cdot K; \quad (3.7)$$

$$i = \frac{a}{s_{2X}} = \frac{0,2}{0,025} = 8; \quad (3.8)$$

$$t_0 = \frac{95}{0,5 \cdot 63 \cdot 150} \cdot 8 \cdot 1,4 = 0,23 \text{ мин.}$$

Окончательное шлифование:

$$t_0 = \frac{l}{s_B \cdot B_K \cdot n} i \cdot K; \quad i = \frac{a}{s_{2X}} = \frac{0,1}{0,01} = 10;$$

$$t_0 = \frac{95}{0,25 \cdot 63 \cdot 315} \cdot 10 \cdot 1,7 = 0,33 \text{ мин.}$$

Определим нормы штучного и штучно-калькуляционного времени по формуле [38].

Штучное время:

$$T_{\text{шт}} = (t_0 + t_{\text{всп}}) \left(1 + \frac{\alpha + \beta + \gamma}{100} \right). \quad (3.9)$$

Штучно-калькуляционное время:

$$T_{\text{шт.к}} = T_{\text{шт}} + \frac{T_{\text{п.з.}}}{n}, \quad (3.10)$$

где – $T_{\text{шт}}$ – штучное время, мин;

t_0 – основное время обработки, мин;

$t_{\text{всп}}$ – вспомогательное время, мин ;

α, β, γ , - время технического обслуживания, перерывов и организационного обслуживания;

$T_{\text{п.з.}}$ – подготовительно-заключительное время, мин.

Вспомогательное и подготовительно-заключительное время для всех операций определяем по общемашиностроительным нормативам для мелкосерийного производства [37,38].

Сумма время технического обслуживания, перерывов и обслуживания (α, β, γ) в процентах от оперативного [37]: 8%.

Для всех операций технологического процесса были определены значения времени на вспомогательное и подготовительное время. Рассчитанные данные сведены в таблицу 3.12.

Таблица 3.12 – Нормирование технологического процесса

№ п/п	Наименование операции и содержание работы	Время, мин
005	Отрезная	
	1. Основное время	1,3
	2. Вспомогательное время	0,9
	Коэффициент вспомогательного времени	1
	3. Время на обслуживания рабочего места (4% от $T_{\text{оп}}$)	0,09
	4. Время на отдых и личные надобности (4% от $T_{\text{оп}}$)	0,09
	5. Подготовительно-заключительное время на партию, на наладку станка, инструмента и приспособлений, на другие дополнительные приёмы.	6
	Штучное время	2,38
	Штучно-калькуляционное время	2,78

Продолжение таблицы 3.12

1	2	3
010	Токарная с ЧПУ 1. Основное время 2.Вспомогательное время Коэффициент вспомогательного времени 3.Время на обслуживания рабочего места (4% от $T_{оп}$) 4.Время на отдых и личные надобности (4% от $T_{оп}$) 5.Подготовительно-заключительное время на партию, на наладку станка, инструмента и приспособлений, на другие дополнительные приёмы. Штучное время Штучно-калькуляционное время	 0,52 0,56 1 0,04 0,04 13 1,16 2,03
015	Токарная с ЧПУ 1. Основное время 2.Вспомогательное время Коэффициент вспомогательного времени 3.Время на обслуживания рабочего места (4% от $T_{оп}$) 4.Время на отдых и личные надобности (4% от $T_{оп}$) 5.Подготовительно-заключительное время на партию, на наладку станка, инструмента и приспособлений, на другие дополнительные приёмы. Штучное время Штучно-калькуляционное время	 0,62 0,68 1,0 0,05 0,05 6 1,4 1,8
025	Круглошлифовальная предварительная 1. Основное время 2.Вспомогательное время: Коэффициент вспомогательного времени 3.Время на обслуживания рабочего места (3% от $T_{оп}$) 4.Время на отдых и личные надобности (3% от $T_{оп}$) 5.Подготовительно-заключительное время на партию, на наладку станка, инструмента и приспособлений, на другие дополнительные приёмы. Штучное время Штучно-калькуляционное время	 0,23 0,7 1,1 0,04 0,04 8 1,1 1,63
030	Фрезерная с ЧПУ 1. Основное время 2.Вспомогательное время: Коэффициент вспомогательного времени 3.Время на обслуживания рабочего места (4% от $T_{оп}$) 4.Время на отдых и личные надобности (4% от $T_{оп}$) 5.Подготовительно-заключительное время на партию, на наладку станка, инструмента и приспособлений, на другие дополнительные приёмы. Штучное время Штучно-калькуляционное время	 14,34 4,42 1,1 0,76 0,76 13 20,04 20,9

Продолжение таблицы 3.12

1	2	3
045	Круглошлифовальная 1. Основное время 2.Вспомогательное время: Коэффициент вспомогательного времени 3.Время на обслуживания рабочего места (4% от $T_{оп}$) 4.Время на отдых и личные надобности (4% от $T_{оп}$) 5.Подготовительно-заключительное время на партию, на наладку станка, инструмента и приспособлений, на другие дополнительные приёмы. Штучное время Штучно-калькуляционное время	0,33 0,7 1,1 0,04 0,04 8 1,18 1,71
050	Круглошлифовальная 1. Основное время 2.Вспомогательное время: Коэффициент вспомогательного времени 3.Время на обслуживания рабочего места (4% от $T_{оп}$) 4.Время на отдых и личные надобности (4% от $T_{оп}$) 5.Подготовительно-заключительное время на партию, на наладку станка, инструмента и приспособлений, на другие дополнительные приёмы. Штучное время Штучно-калькуляционное время	0,19 0,7 1,1 0,04 0,04 8 1,01 1,54
055	Заточная 1. Основное время 2.Вспомогательное время: Коэффициент вспомогательного времени 3.Время на обслуживания рабочего места (4% от $T_{оп}$) 4.Время на отдых и личные надобности (4% от $T_{оп}$) 5.Подготовительно-заключительное время на партию, на наладку станка, инструмента и приспособлений, на другие дополнительные приёмы. Штучное время Штучно-калькуляционное время	6,86 1,3 1,1 0,33 0,33 8 8,95 9,48
060	Заточная 1. Основное время 2.Вспомогательное время: Коэффициент вспомогательного времени 3.Время на обслуживания рабочего места (4% от $T_{оп}$) 4.Время на отдых и личные надобности (4% от $T_{оп}$) 5.Подготовительно-заключительное время на партию, на наладку станка, инструмента и приспособлений, на другие дополнительные приёмы. Штучное время Штучно-калькуляционное время	4,32 1,3 1,1 0,23 0,23 8 6,21 6,74

Расчёт потребного количества оборудования и коэффициентов его загрузки

$$C_P = \frac{t_{шт-к} \cdot N}{60 \cdot F_{\phi}} \quad (3.11)$$

Полученное значение округляем в большую сторону до ближайшего целого числа.

Коэффициент загрузки оборудования:

$$K_3 = \frac{C_P}{C_{\Pi}} \quad (3.12)$$

где C_{Π} – принятое количество станков на операции, шт.

Полученные значения сведены в таблицу 3.13.

Таблица 3.13 – Загрузка оборудования

№	Операции	$t_{шт-к}$, мин	C_P	C_{Π}	K_3
005	Отрезная	2,78	0,01	1	0,01
010	Токарная с ЧПУ	2,01	0,01	1	0,01
015	Токарная с ЧПУ	1,8	0,01	1	0,01
025	Круглошлифовальная	1,63	0,01	1	0,01
030	Фрезерная с ЧПУ	20,9	0,09	1	0,09
045	Круглошлифовальная	1,71	0,01	1	0,01
050	Круглошлифовальная	1,63	0,01	1	0,01
055	Заточная	8,95	0,04	1	0,04
060	Заточная	6,21	0,03	1	0,03

Средний коэффициент загрузки оборудования:

$$K_{3,CP} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{3_i}}{n} \quad (3.13)$$

где n – количество операции в технологическом процессе

$$K_{3,CP} = \frac{0,01 + 0,01 + 0,01 + 0,01 + 0,09 + 0,01 + 0,04 + 0,03}{9} = 0,024$$

Недостаточно высокие коэффициенты загрузки требуют дозагрузки ряда единиц оборудования другими изделиями. Модели оборудования допускают переналадку.

3.9 Конструкторская часть

В данной работе было спроектировано приспособление для контроля износа [39]. Его задачей является контроль износа по задней поверхности на торце и цилиндре.

Приспособление состоит из плиты(24), стойки(27) с закрепленной на ней электронной лупой(2) и корпуса(19).

Фреза устанавливается в цангу(30), затем вставляют в пиноль(23) и закручивая штревель(35) в цангу(30) производится зажим фрезы. После устанавливают перо(32) на переднюю поверхность режущей кромки. На стойку(27) устанавливают электронную лупу(2) и подключают её к ПК.

Для измерения износа на заднем углу по цилиндрической поверхности, устанавливают лупу в первое положение, микрометрическим приводом выставляют на требуемое расстояние, а затем выставляют фокус. Затем совершают продольное перемещение пиноли с поворотом так, чтобы передняя поверхность постоянно контактировала с пером и производят съём данных с определенным интервалом.

Для измерения износа на задней поверхности торцевых зубьев, устанавливают электронную лупу во второе положение и совершают поперечное перемещение с помощью микрометрического привода.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННОГО ИСЛЕДОВАНИЯ

Студент гр. 10300

(Подпись)

А.Н. Ивкин

(Дата)

Руководитель
к.т.н., зав. кафедры ТМС

(Подпись)

А.А. Моховиков

(Дата)

Нормоконтроль,
к.т.н., доцент кафедры ТМС

(Подпись)

А.А. Ласуков

(Дата)

Создание электронного макета концевой фрезы.

Для создания и исследования электронных моделей фрез в данной работе были использованы современные вычислительные рабочие станции, входящие в состав ЛВС кафедры ТМС ЮТИ ТПУ, с предустановленными на них программными продуктами: САПР Компас 3D и Simens NX10.

Первым этапом построения твердотельной 3D модели концевой фрезы с волнообразным зубом, это создание основания модели (рисунок 4.1) цилиндрической части фрезы с прорезанными пазами и центровочными отверстиями на ее торцах, для этого были применены стандартные операции вращения и вырезания выдавливанием, доступные в Компас 3D

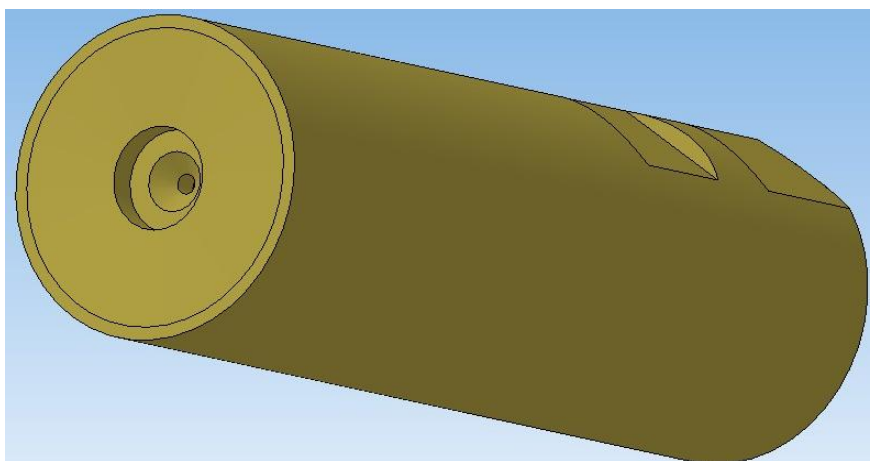


Рисунок 4.1 Основание фрезы

Следующей задачей стало построение стружечной канавки на боковой поверхности фрезы. Для ее создания в качестве направляющей была создана цилиндрическая спираль с заданным параметром V2 шага, и параметрический эскиз эмитирующий след шлифовального круга. С помощью операции кинематического вырезания данного эскиза вдоль спиральной направляющей была получена требуемая поверхность. Затем был создан массив по концентрической сетке для создания еще 5 идентичных канавок как видно на рисунке 4.2.

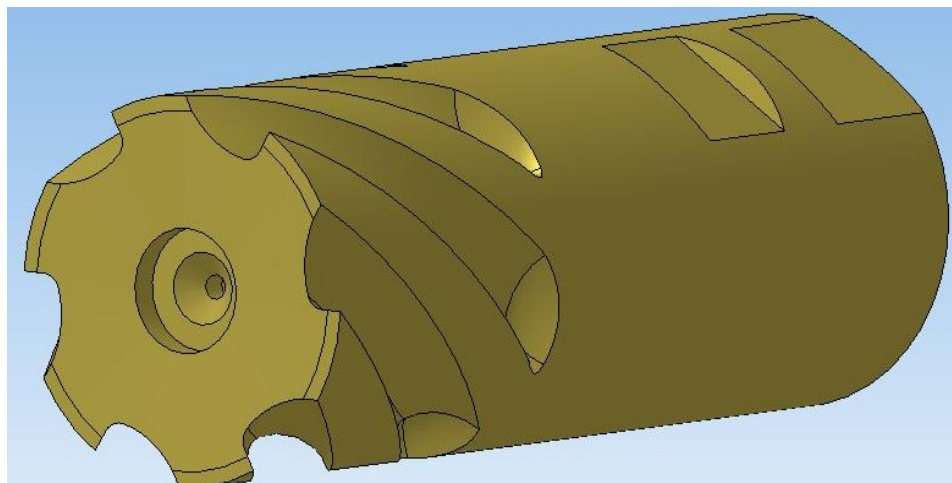


Рисунок 4.2 Винтовые стружечные канавки

Для создания передней и задней поверхностей концевой фрезы с волнообразным зубом была применена операция вырезания по сечениям. Чтобы обеспечить постоянство заднего и переднего угла в осевом сечении была принята следующая последовательность действий:

- создан такой параметрический эскиз сечения, положение в пространстве которого зависело бы только от одного углового параметра (переменной UG1) с сохранением взаимосвязи между остальными элементами эскиза при изменении данного параметра.

- для создания всех необходимых сечений построен массив элементов по таблице (Рисунок 4.3). В таблицу внесены сведения о положении эскиза вдоль оси согласно чертежу детали, а так же внесена переменная UG1 отвечающая за угловое положение каждого последующего эскиза в пространстве. В качестве системы координат для данного массива была выбрана цилиндрическая система R, A, Z. Для ориентирования эскизов так же был задана ориентация эскизов по радиальному направлению от оси детали.

- с использованием полученного массива эскизов применена операция вырезания по сечением и получен полный профиль одного зуба с образованием всех необходимых (передней и задней) поверхностей.

Экземпляр	UG1
	0
(1)	-32.095
(2)	12°53'
(3)	16°46'
(4)	24°31'
(5)	30°46'
(6)	31°55'
(7)	38°6'
(8)	50°24'
(9)	56°38'
(10)	57°48'
(11)	64°2'
(12)	76°16'
(13)	82°31'
(14)	83°39'

Рисунок 4.3 Угловой поворот эскиза в зависимости от смещения от торца

Так как, каждый последующий зуб фрезы имеет смещение по фазе волны относительно предыдущего то для создания массива концентрических элементов необходимо применить дополнительные параметры: осевой шаг заданный чертежом и переменной H, и дополнительное осевое смещение заданное как разница углового шага для 6 зубьев(60 градусов) и переменной Ug отвечающей за расчет смещения для каждого зуба.

Таким образом, в результате данных построений была получена концевая фреза с полностью определенным и построенным профилем периферийной части фрезы (рисунок 4.4), удовлетворяющая требованиям чертежа по обеспечению переднего и заднего угла в осевом сечении.

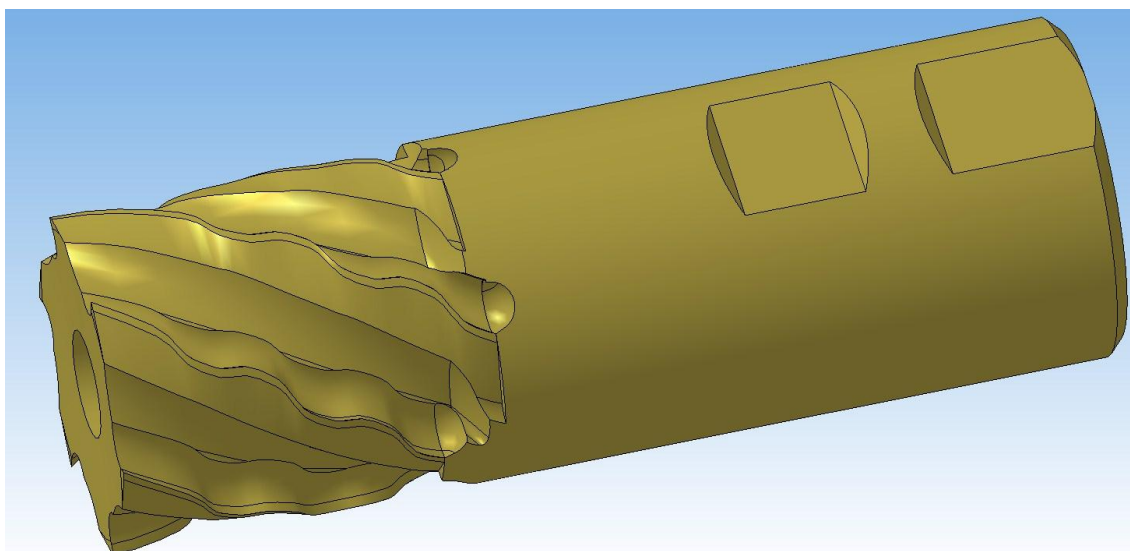


Рисунок 4.4 Режущая кромка на периферии

Дальнейшие построения направлены на создание торцевой части зуба фрезы. Данные поверхности построены с помощью нескольких операций вырезания выдавливанием, каждое сечение лежащее в основе данных операций представляет собой профиль канавки образующий переднюю или заднюю поверхность торцевого зуба (рисунок 4.5).

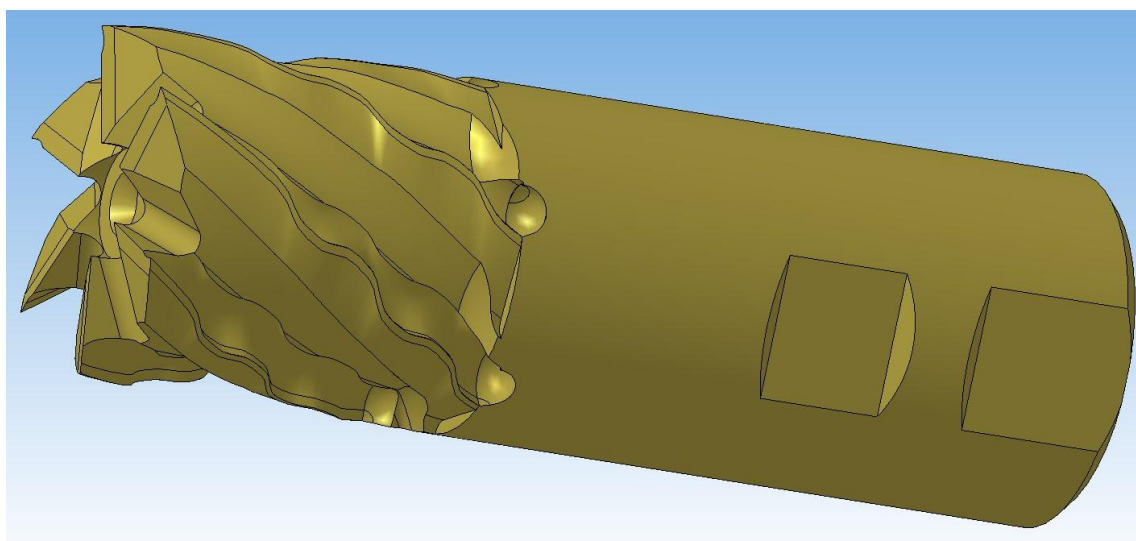


Рисунок 4.5

Анализ геометрии полученного электронного макета концевой фрезы с волнообразной режущей кромкой, представленный в таблице 4.1, показал, что постоянство переднего угла в осевом сечении уменьшает передний угол в нормальном сечении. Согласно ряду исследований [7,23,30] низкие значения переднего угла отрицательно сказываются на качестве обработанной поверхности: увеличивают шероховатость и величину наклепанного слоя.

Таблица 4.1 – Полученные данные с 3D модели

Угол поворота	Расстояние от торца	$\lambda, ^\circ$	$\alpha_n, ^\circ$	$\gamma_n, ^\circ$	$\alpha_o, ^\circ$	$\gamma_o, ^\circ$
2,5	1,56	35	11,07	6,31	7,5	10
9,92	5,16	36,55	13,15	6,05	7,5	10
12,89	5,98	43,92	13,42	5,42	7,5	10
16,76	7,05	50,18	15,13	4,82	7,5	10
22,11	9,72	61,35	16,06	3,59	7,5	10
24,51	15,46	45,53	15,01	5,26	7,5	10
27,7	18,42	32,04	12,08	5,8	7,5	10
30,77	19,57	17,58	10,68	7,16	7,5	10
31,91	19,88	17,49	10,28	7,16	7,5	10
34,77	20,67	34,25	12,25	6,2	7,5	10
38,1	21,6	36,92	12,43	5,56	7,5	10
42,12	22,72	62,85	16,61	3,39	7,5	10
47,06	24,72	61,14	16,66	3,66	7,5	10
50,4	31,29	42,62	14,48	5,52	7,5	10
54,25	34,54	32,79	11,61	6,33	7,5	10
56,64	35,37	17,63	10,68	7,15	7,5	10
57,8	35,69	17,63	10,28	7,15	7,5	10
61	36,58	35,45	12,12	6,12	7,5	10
64,04	37,42	42,58	12,47	5,53	7,5	10
68,54	38,66	63,56	15,94	3,45	7,5	10
71,7	39,81	57,07	16,83	4,13	7,5	10

Для наглядности построен график по полученным данным, представленный на рисунке 4.6.

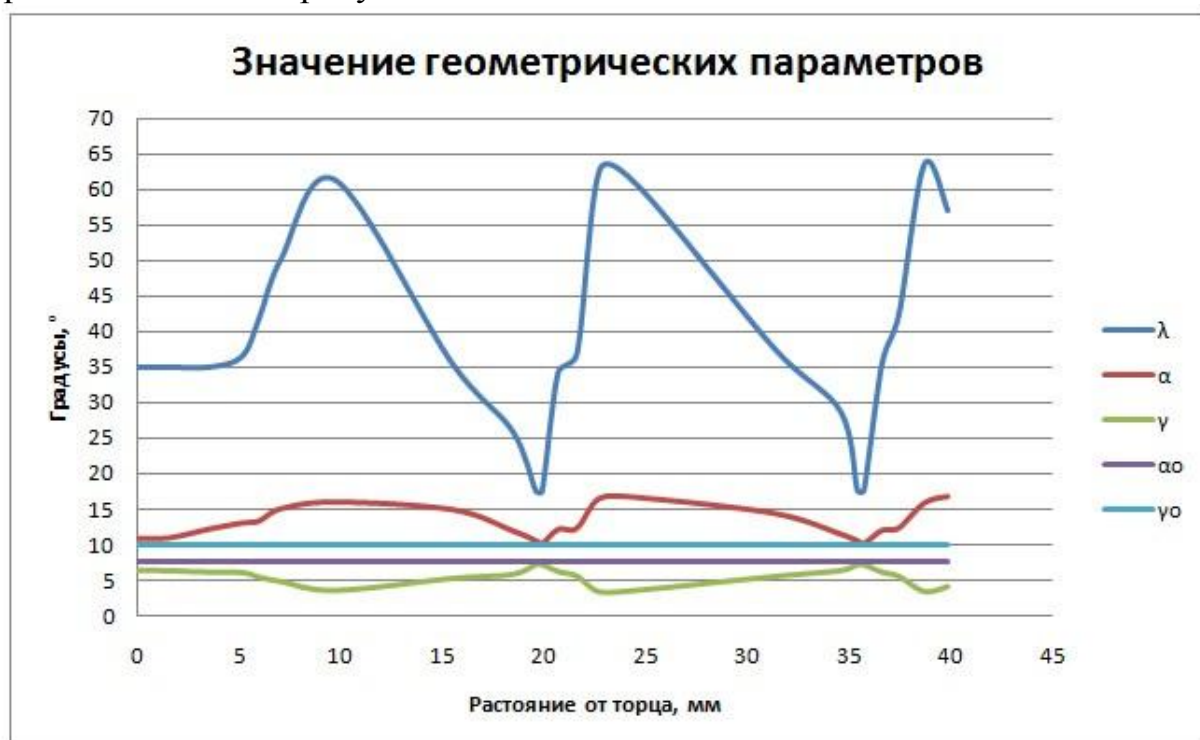


Рисунок 4.6

Для обеспечения постоянства переднего угла в нормальном сечении, мы решили усовершенствовать метод обработки передней поверхности и построить макет данной фрезы.

Основным отличием построения передней поверхности, является использование метода заметания сечения по двум направляющим и ортогональному положению к спроецированному сплайну профиля зуба как видно из рисунка 4.7.

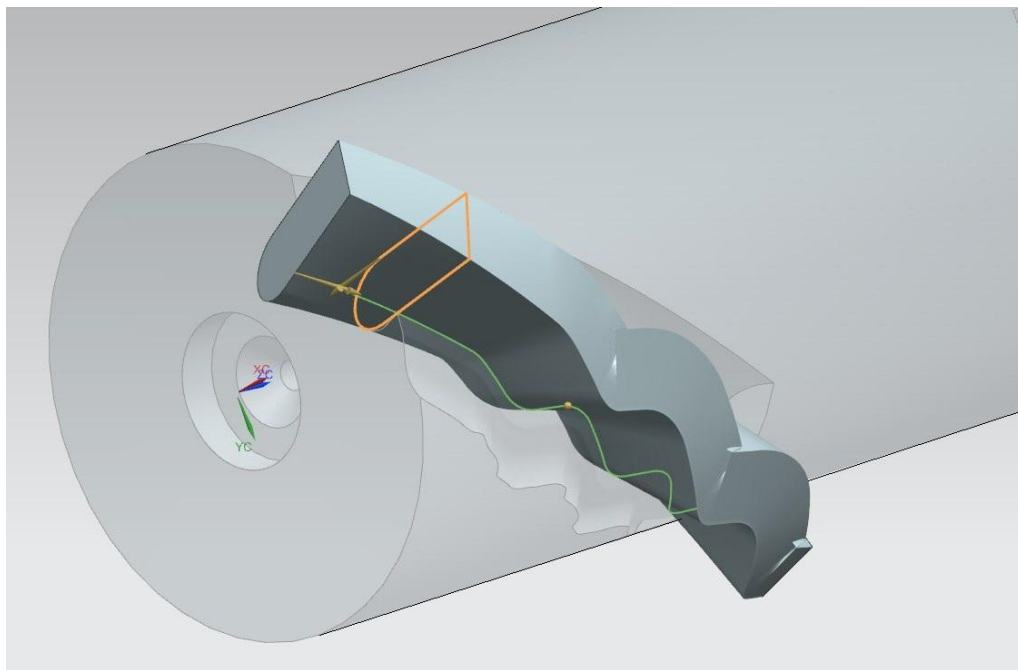


Рисунок 4.7 Заметание эскиза передней поверхности

Получение передней поверхности фрезой в САМ модуле представлено на рисунке 4.8

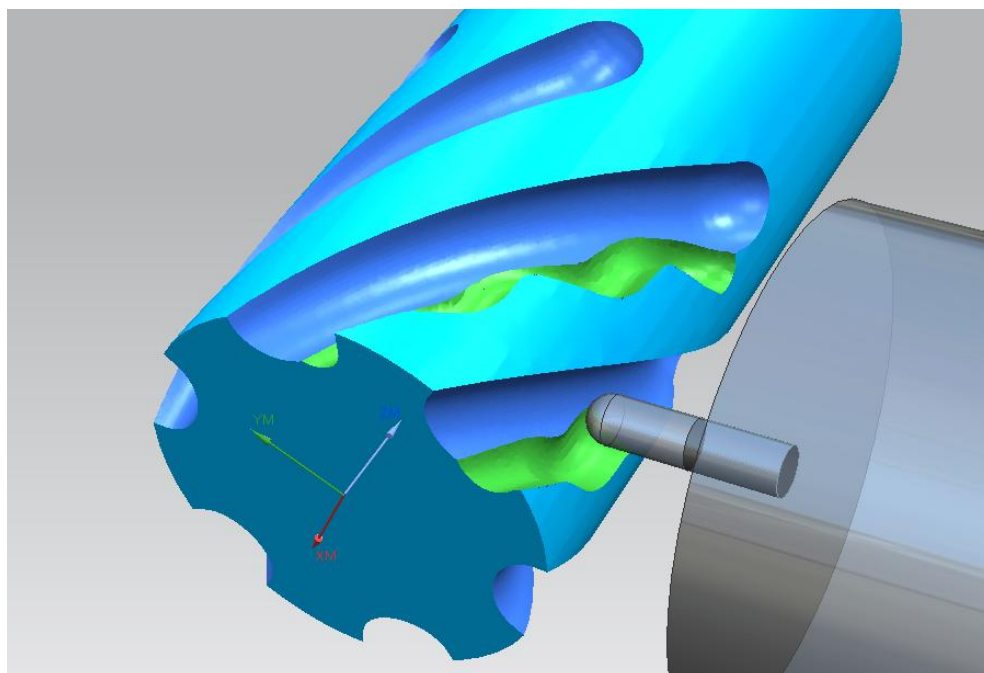


Рисунок 4.8

Получение задней поверхности производим методом заметания по сечениям с выбранной кромкой, полученной на предыдущей операции, в роли направляющей (Рисунок 4.9).

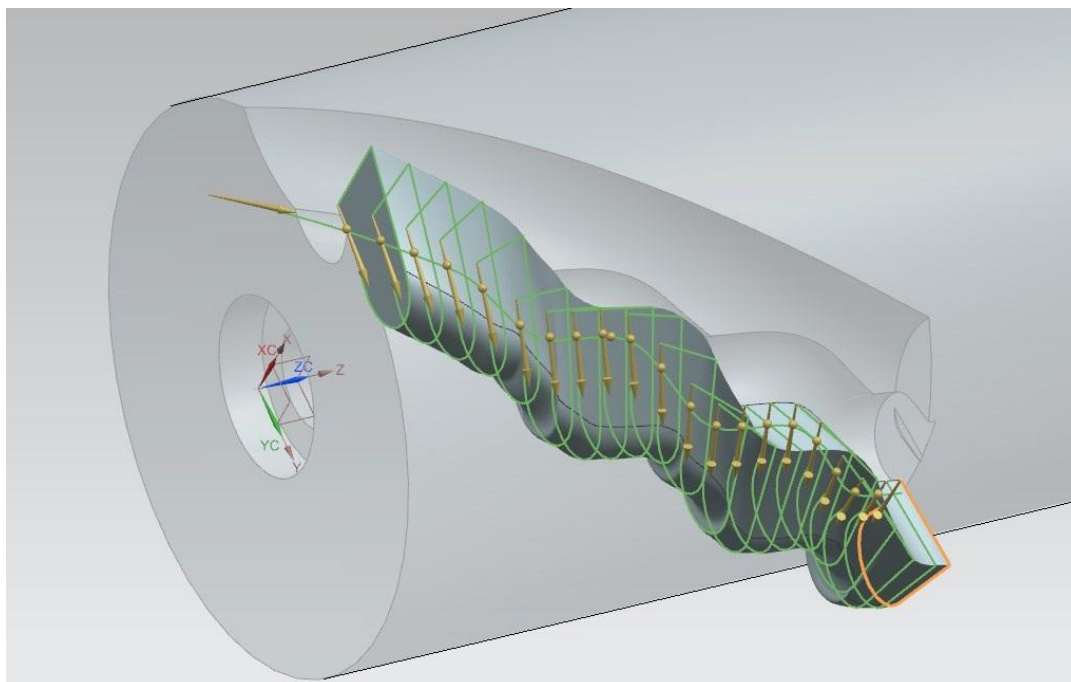


Рисунок 4.9

Анализ геометрии данной конструкции фрезы производим аналогично выше изложенному методу, полученные данные сводим в таблицу 4.2

Таблица 4.2

Угол поворота, °	Расстояние от торца, мм	$\lambda, ^\circ$	$\alpha_n, ^\circ$	$\gamma_n, ^\circ$	$\alpha_o, ^\circ$	$\gamma_o, ^\circ$
2,5	1,56	35	11,15	11,4	9,50	13,28
9,92	5,16	57,49	15,36	11,4	9,49	19,31
12,89	5,98	57,27	17,15	11,3	10,27	19,11
16,76	7,05	57,19	16,3	11,4	9,17	18,52
22,11	9,72	24,23	10,36	11,3	10,2	11,58
24,51	15,46	9,35	10,8	11,4	9,59	11,12
27,7	18,42	41,6	13,2	11,5	9,57	14,32
30,77	19,57	57,9	13,8	11,4	9,32	19,26
31,91	19,88	57,47	14,54	11,4	9,29	19,36
34,77	20,67	57,33	14,94	11,4	10,16	19,26
38,1	21,6	57,22	16,59	11,4	10,42	19,24
42,12	22,72	57,12	15,13	11,4	10,6	19,22
47,06	24,72	43,18	11,58	11,4	10,19	13,11
50,4	31,29	10,2	10,1	11,4	10,6	11,13
54,25	34,54	45,14	11,2	11,5	10,14	15,39
56,64	35,37	56,52	13,3	11,3	10,2	19,22
57,8	35,69	57,54	14,3	11,3	10,18	19,14
61	36,58	57,2	15,5	11,5	10,25	19,4
64,04	37,42	57,29	16,19	11,3	10,19	19,15
68,54	38,66	57,29	14,41	11,3	9,21	17,44
71,7	39,81	40,38	11,2	11,5	9,54	13,46

Для наглядности построен график по полученным данным, представленный на рисунке 4.10.

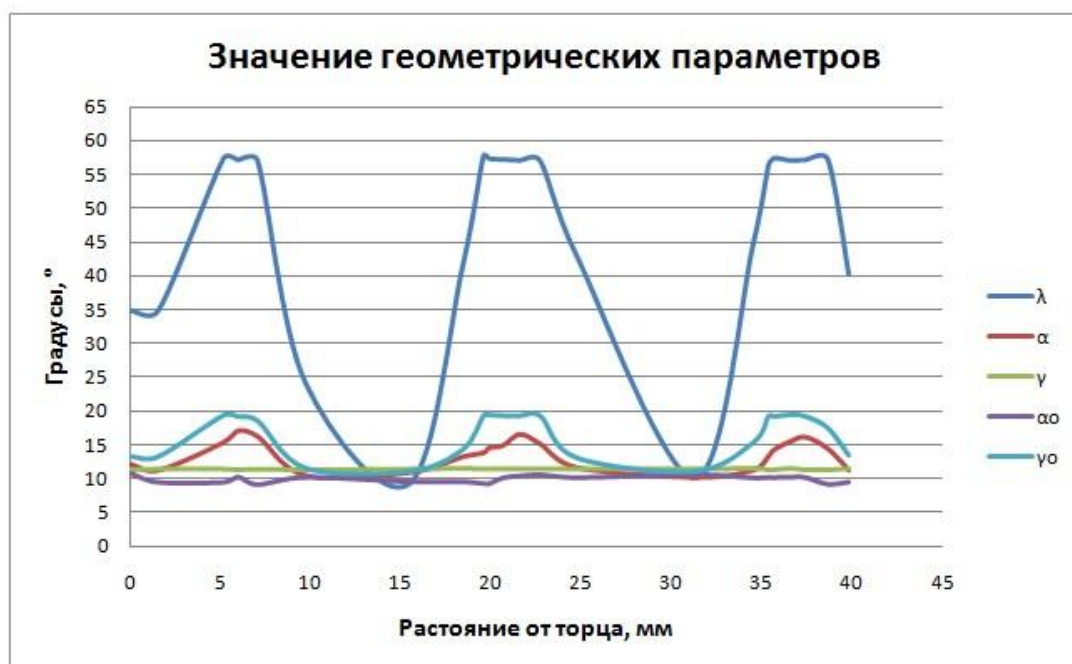


Рисунок 4.10

Для наглядного сравнения изменения переднего угла и угла наклона стружечной канавки мы составили графики которые представлены далее. На рисунке 4.11 сравнение угла наклона стружечной канавки, на рисунке 4.12 сравнение передних углов в осевом сечении, на рисунке 4.13 сравнение передних углов в нормальном сечении. Вариант 1 – Фреза МИОН 710-50-50-150-W50, вариант 2 – фреза с предложенным усовершенствованием.

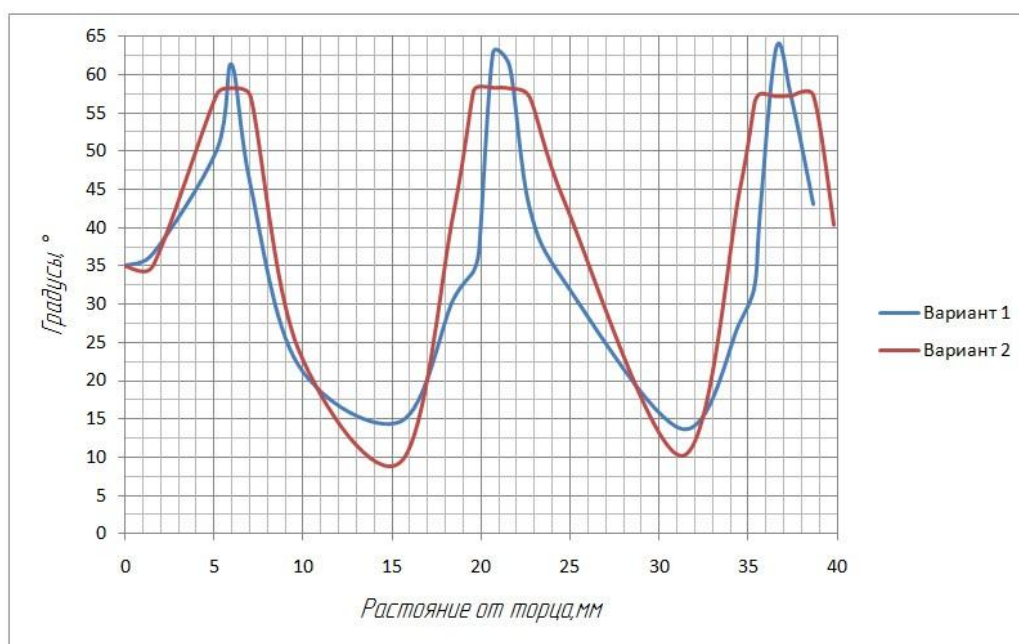


Рисунок 4.11 Сравнение углов наклона стружечной канавки

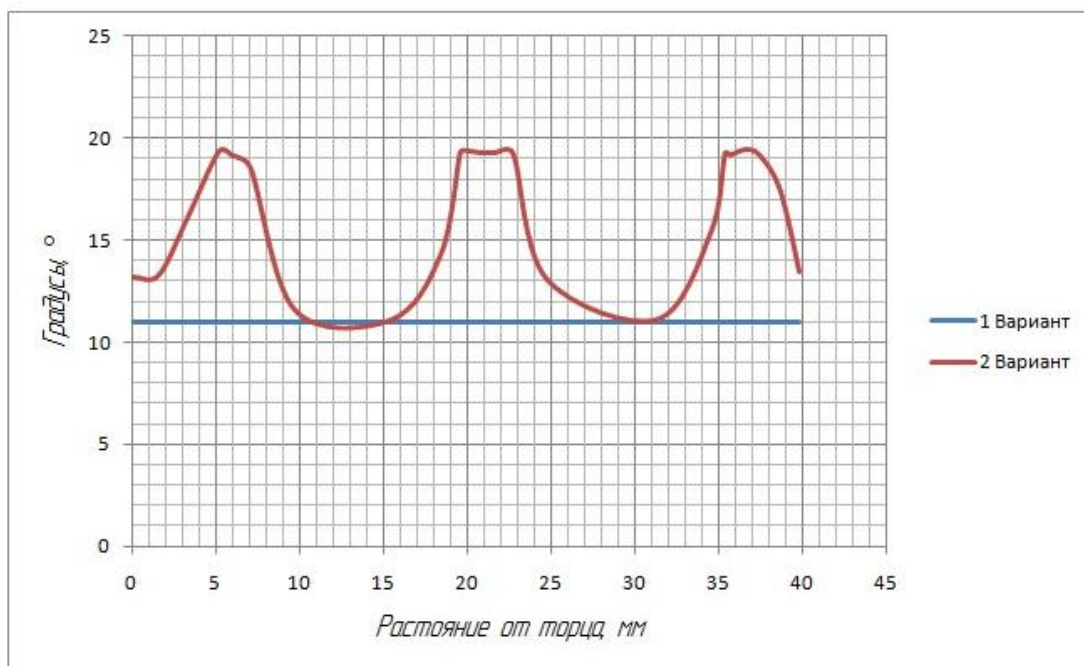


Рисунок 4.12 Сравнение передних углов в осевом сечении

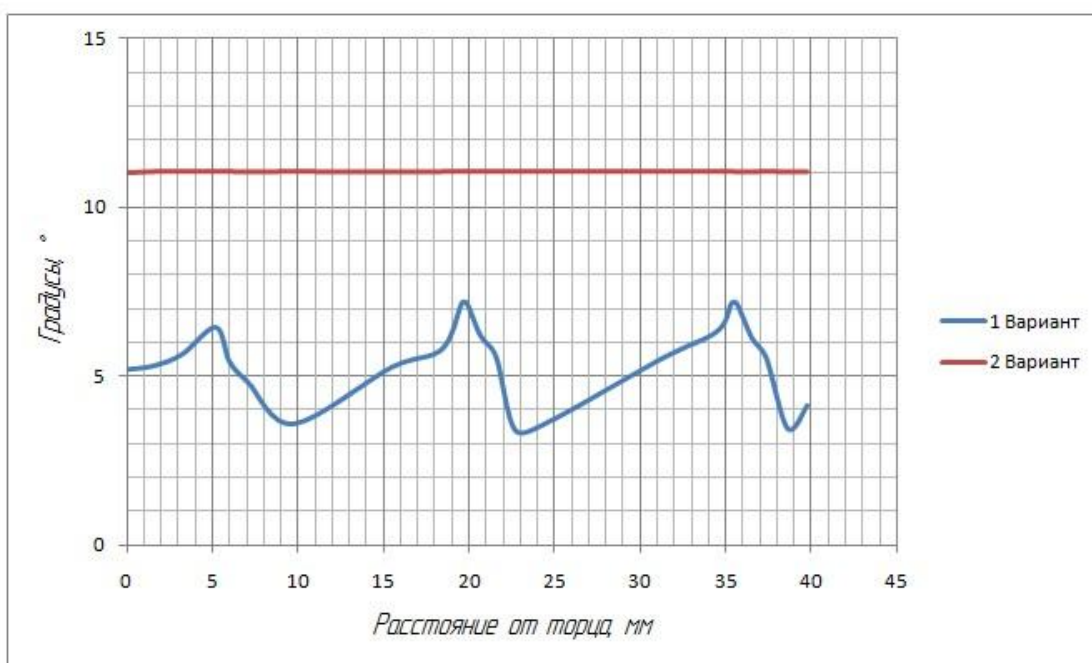


Рисунок 4.12 Сравнение передних углов в нормальном сечении

В ходе исследования изучили конструкцию и геометрические параметры концевой фрезы с волнообразными зубьями, и предложили другой метод получения передней поверхности для увеличения значения и постоянства переднего угла в нормальном сечении, что должно увеличить качество обрабатываемой поверхности, за счет снижения наклепа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения выпускной квалификационной работы была исследована конструкция и геометрия концевой фрезы с волнообразными зубьями.

В ходе работы был проведен аналитический обзор литературы в ходе которого было определено влияние геометрических параметров на процесс стружкообразования, снижения вибраций и на образование наклепа. Рассмотрены виды фрез изготавливаемые мировыми производителями инструмента, определено предпочтение материала фрезы и тип режущей кромки. Был спроектирован электронный макет концевой фрезы «ПК МИОН» 710-50-50-150-W50, проведен анализ и определены геометрические параметры такие как, угол наклона винтовой канавки, передний и задний углы в осевых и нормальных сечениях. Был предложен альтернативный метод получения передней поверхности для обеспечения увеличения переднего угла в нормальном сечении и его постоянства.

Также был разработан технологический процесс изготовления концевой фрезы с волнообразными зубьями с годовой программой выпуска 1200 шт. И спроектировано приспособление для измерения износа.

В разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» была определена себестоимость изготовления концевой фрезы с волнообразными зубьями. Себестоимость изготовления детали составляет 1816,8 руб.

В разделе «Социальная ответственность» произведен анализ опасных и вредных факторов в процессе изготовления концевой фрезы с волнообразными зубьями. Разработаны мероприятия по охране труда и защите окружающей среды от выявленных вредных факторов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Корбут Е. В., Лабунец В. Ф. Особенности изнашивания инструмента при обработке титановых сплавов // Проблемы тертя та зношування. – 2011. – №. 55. – С. 83-93.
2. Трудности обработки титана. [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://www.tochmeh.ru/info/obrtit.php> – Загл. с экрана.
3. Основные сведения о титане и его сплавах. [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://www.metotech.ru/titan-opisanie.htm#> – Загл. с экрана.
4. Механическая обработка титана. [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://www.npprusmet.ru/articles.php?id=57>-Загл. с экрана.
5. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: Справочник / Я.Л. Гуревич, М.В. Горохов, В.И. Захаров и др. 2-е изд., перераб. И доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 240 с.
6. Резников Н.И., Бурмистров Е.В., Жарков И.Г. Обработка резанием жаропрочных, высокопрочных и титановых сплавов. – М.: Машиностроение, 1972. – 200 с.
7. Huang P. et al. Milling force vibration analysis in high-speed-milling titanium alloy using variable pitch angle mill // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2012. – Т. 58. – №. 1-4. – С. 153-160.
8. Wang Z., Nakashima S., Larson M. Energy Efficient Machining of Titanium Alloys by Controlling Cutting Temperature and Vibration // Procedia CIRP. – 2014. – Т. 17. – С. 523-528.
9. Сутягин В. В., Сайкин С. А. Повышение ресурса концевых инструментов за счет применения нанокompозитных PVD-покрытий при обработке титановых сплавов в авиастроении // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – №. 5. – С. 41-44.
10. Полетика М. Ф. Фрезерование. – 1994.
11. Zelinski P. Tips for Titanium //Modern Machine Shop. – 2013. – Т. 78. – №. 10. – С. 92-97.
12. Куприянов В. А. Мелкоразмерный инструмент для резания труднообрабатываемых материалов. – 1989.
13. Казимиров А. А., Кугаевский С. С., Огородникова О. М. Конечно-элементный анализ концевых фрез для учета упругих отжатий при выборе режимов резания в точном приборо- и машиностроении // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2012. – №. 12 (271).
14. Петрушин С.И. Основы формообразования резанием лезвийными инструментами: учебное пособие для вузов / С. И. Петрушин; Томский политехнический университет. — Томск: Изд-во НТЛ, 2004. – 204 с.
15. Петрушин С.И., Баканов А.А., Махов А.В. Геометрический анализ конструкций сборных режущих инструментов со сменными многогранными пластинами. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 101 с.

16. Каталог фирмы PRAMET. 2012.
17. Каталоги фирмы Sandvic Coromant. 2010-2015.
18. Виноградов Д. В., Потапова М. С. Обзор фрез с криволинейной режущей кромкой // наука и образование: электронное научно-техническое издание. – 2014. – №. 11.
19. Потапова М. С., Виноградов Д. В. Компьютерное моделирование рельефа поверхности, обработанной фрезой с криволинейной режущей кромкой // наука и образование: электронное научно-техническое издание.–2015.– №.6.
20. Пат. 2507038 Российская Федерация, МПК7 В 23 С 5/10. Фреза концевая для обработки труднообрабатываемых материалов / Никулин Д.С., Каверзин Е.Я., Габанов Э.В., Савилов А.В., Фурсов Е.А.; Владелец патента ОАО «Научно-производственная корпорация «Иркут».
21. M. Fontaine et al., “Modeling of cutting forces in ball end-milling with tool-surface inclination, Part I: Predictive force model and experimental validation,” J. Mater. Process. Tech., vol. 189, pp. 73-84, 2007.
22. M. Martellotti, “An analysis of the milling process,” Transaction of ASME, vol. 63, pp. 677-700, 1941.
23. M. Martellotti, “An analysis of the milling process, Part II: Down-milling,” Transaction of ASME, vol. 67, pp. 233-251, 1945.
24. L. Zheng et al., “Three dimensional cutting force analysis in endmilling,” International Journal of Mechanical Sciences, vol. 38, no. 3, pp. 259-269, 1996.
25. E. Budak et al., “Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data,” J. Manuf. Sci. and E.-T. ASME, vol. 118, pp. 216-224, 1996.
26. V. Talekar, “Determination of specific cutting force coefficients for web-based cutting force modeling and simulation in machining titanium alloys,” M.S. thesis, Dept. Mech. & Aerosp. Eng., MO Univ. Sci. & Tech., 2011.
27. J. Gradisek et al., “Mechanistic identification of specific force coefficients for a general endmill,” Int. J. Mach. Tool. Manu., vol. 44, pp. 401-414, 2004.
28. S. Engin and Y. Altintas, “Generalized modeling of milling mechanics and dynamics: Part I - Helical endmills,” Int. J. Mach. Tool. Manu., vol. 41, issue 15, pp. 2195-2212, 2001.
29. S. Engin and Y. Altintas, “Generalized modeling of milling mechanics and dynamics: Part II,” Int. J. Mach. Tool. Manu., vol. 41, issue 15, pp. 2213-2231, 2001.
30. O. Adetoro and P. Wen, “Prediction of mechanistic cutting force coefficients using ALE formulation,” Int. J. Mach. Tool. Manu., vol. 46, pp. 79-90, 2010.
31. O. Gonzalo et al., “Prediction of specific force coefficients from a FEM cutting model,” Int. J. Adv. Manuf. Tech., vol. 43, no. 3-4, pp. 348-356, 2009.

32. M. S. Ameen, "Mechanistic identification of specific cutting force coefficients in of end-milling Inconel 718 under four cooling strategies," M.S. thesis, Mech. & Aerosp. Eng. Dept., MO Univ. Sci. & Tech, Rolla, MO, 2014.
33. Y. Altinta and P. Lee, "Mechanics and dynamics of ball endmilling," J. Manuf. Sci. and E.-T. ASME, vol. 120, pp. 684-692, 1998.
34. Okafor A. C., Sultan A. A. Development of a mechanistic cutting force model for wavy-edge bull-nose helical end-milling of inconel 718 under emulsion cooling strategy //Applied Mathematical Modelling. – 2015.
35. Справочник технолога машиностроителя. В 2-х томах / Под редакцией А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. 4-е издание, переработанное и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
36. Григорьев С.М., Кохомский Н.В., Маслов А.Р. Инструментальная оснастка станков с ЧПУ: Справочник под общ. ред. А.Р. Маслова. – М.: Машиностроение, 2006. – 544 с.
37. Общемашиностроительные нормативы времени вспомогательного, на обслуживание рабочего места и подготовительно-заключительного при работе на металлорежущих станках. Мелкосерийное и единичное производство. [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://www.bestpravo.ru/federalnoje/bz-instrukcii/a9r/page-15.htm>
38. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управлением.– М.: Машиностроение, 1990. – 465с.
39. Контрольно-измерительные приборы и инструменты: Учебник для нач. проф. образования / С.А. Зайцев, Д.Д. Грибанов, А.Н. Толстов, Р.В. Меркулов. – М.: Издательский центр «Академия»; ПрофОбрИздат, 2002. – 464 стр.
40. ГОСТ 23248 – 78. Фрезы концевые для обработки деталей из высокопрочных сталей и титановых сплавов на станках с программным управлением. Конструкция и размеры. – М.: 1980. – 44 с.
41. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: Методические указания по выполнению части выпускной квалифицированной работы для студентов 151001 «Технология машиностроения» всех форм обучения. – Юрга: ЮТИ ТПУ, 2014. – с.24
42. Охрана труда и производственная безопасность: учебник / А.А. Раздорозный. – М.: Издательство «Экзамен», 2006. – 510с.
43. Расчеты по обеспечению комфорта и безопасности: учебное пособие. В.М. Гришагин, В.Я. Фарберов – Томск: Изд-во томского политехнического университета, 2007. – 155с.