



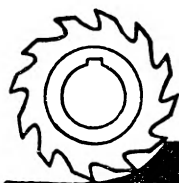
641.814
22-91

С. А. ЖУРАВЛЕВ, А. Ш. ШИФРИН

30808

ОСНОВЫ ФРЕЗЕРОВАНИЯ И РЕЖИМЫ РЕЗАНИЯ

• МАШИНОСТРОЕНИЕ •



Библиотека

В Ы П У С К 1

ФРЕЗЕРОВЩИКА

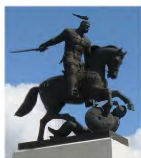
С. А. ЖУРАВЛЕВ, А. Ш. ШИФРИН

ОСНОВЫ. ФРЕЗЕРОВАНИЯ И РЕЖИМЫ РЕЗАНИЯ

Под редакцией
канд. техн. наук С. А. ЖУРАВЛЕВА



ИЗДАТЕЛЬСТВО «МАШИНОСТРОЕНИЕ»
МОСКВА 1964 ЛЕНИНГРАД



УДК 621.914 : 621.910.71

ЖУРАВЛЕВ С. А., ШИФРИН А. Ш.

Основы фрезерования и режимы резания

М. — Л., изд. „Машиностроение“, 1964. 152 стр. с илл.

С целью помочь фрезеровщикам повысить свою квалификацию и углубить теоретические знания, а также для ознакомления их с передовой технологией и опытом новаторов Ленинградское отделение издательства «Машиностроение» выпускает Библиотечку фрезеровщика, состоящую из отдельных выпусков, перечень которых приведен в конце брошюры.

В настоящем выпуске даются основные понятия о процессе фрезерования и рассматривается работа цилиндрическими, дисковыми, фасонными и торцовыми фрезами. Рассматривается также износ и стойкость фрез и приводятся основные зависимости для определения сил и скорости резания при обработке обычных и труднообрабатываемых материалов.

Библиотечка рассчитана на рабочих фрезеровщиков и может быть полезна мастерам и технологам.

Рецензент инж. М. И. Гольдберг



ВВЕДЕНИЕ

Фрезерование является одним из весьма распространенных процессов обработки металлов и неметаллических материалов резанием и осуществляется инструментом, называемым фрезой.

Фреза представляет собой тело вращения, на образующей поверхности или на торце которого имеются режущие зубья.

Название инструмента происходит от французского слова *fraise*, что означает земляника. Первые фрезы появились в XVI в., имели сферическую форму с насеченным зубом и по внешнему виду действительно напоминали землянику.

В течение длительного времени фрезы не имели значительного распространения как вследствие несовершенства их конструкции, так и вследствие отсутствия средств для их заточки.

Фрезерование как метод обработки металлов вошло в практику машиностроения в конце XIX в. и в настоящее время имеет широкое распространение как в индивидуальном, так и массовом производстве.

Фрезерование находит применение при обработке плоскостей, пазов, фасонных поверхностей, тел вращения, а также при изготовлении прорезей (шлицев), разрезке заготовок и др.

Для того чтобы сознательно управлять процессом резания при работе любым режущим инструментом, необходимо знать явления, происходящие в зоне образования и отделения стружки, т. е. в зоне резания.

Как известно, процесс резания сопровождается следующими физическими явлениями:

1) пластической деформацией, которая охватывает срезаемый слой и распространяется под линию среза, т. е. под обработанную поверхность;

2) нагревом инструмента, стружки и изделия;

3) трением и износом режущего инструмента;

4) вибрациями, возникающими в процессе резания.

Изучением перечисленных явлений занимается наука о резании металлов.

Первые исследования процесса резания принадлежат русским ученым И. А. Тиме, К. А. Зворыкину, Я. Г. Усачеву. Труды советских ученых В. А. Кривоухова, Н. И. Резникова, А. М. Розенберга и др. также направлены на тщательное и всестороннее изучение процесса резания.

Настоящая работа посвящена изложению основных сведений о процессе фрезерования и режимах резания. Знание этих данных позволит рабочему более сознательно управлять процессом фрезерования и будет способствовать повышению его квалификации.

Необходимо отметить, что с 1/1 1963 г. введена Международная система единиц измерения (СИ). Во всех выпусках «Библиотечки фрезеровщика» использована старая система единиц измерения. Переход от старой системы единиц измерения к новой может быть осуществлен по таблице приложения 1, помещенного в конце выпуска 1.



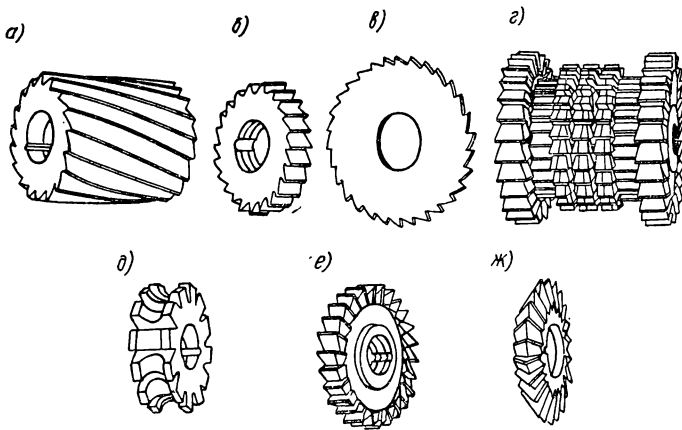


ГЛАВА I

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОЦЕССЕ ФРЕЗЕРОВАНИЯ

1. ТИПЫ ФРЕЗ И ИХ НАЗНАЧЕНИЕ

Фреза представляет собой тело вращения, на образующей поверхности или на торце которого имеются зубья. По форме и назначению фрезы можно разделить на следующие группы:



Фиг. 1. Различные типы фрез с горизонтальной осью.

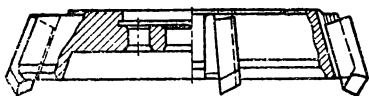
- 1) фрезы с горизонтальной осью (фиг. 1);
- 2) торцовые фрезы (фиг. 2);
- 3) концевые фрезы (фиг. 3).

Фрезы с горизонтальной осью применяются при работе на горизонтальнофрезерных станках. Для этой

цели фрезы имеют отверстия и крепятся на оправках. Оправка одним концом устанавливается в конусную опору шпинделя, другим — в подвесную опору станка.

По назначению работы эти фрезы делятся на следующие виды:

- а) цилиндрические для обработки плоскостей;
- б) дисковые пазовые для обработки точных по ширине пазов;
- в) отрезные для разрезки металла;
- г) набор фрез для обработки поверхностей сложного профиля;



Фиг. 2. Торцовая фреза.



Фиг. 3. Концевая фреза.

д) фасонные для обработки фасонных поверхностей;

е) дисковые трехсторонние для обработки менее точных по ширине пазов;

ж) угловые для обработки различных канавок.

Торцовые фрезы крепятся в шпинделе станка и служат для обработки плоскостей. Эти фрезы могут нести большую нагрузку и работать с высокой производительностью.

Концевые фрезы крепятся в отверстии шпинделя и служат для обработки небольших плоскостей, пазов, работы по копиру и других работ.

2. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФРЕЗ

Материалы, применяемые для изготовления различных инструментов, носят название инструментальных материалов.

Режущий инструмент в процессе работы подвергается действию большого давления, трения и нагрева за счет выделяющейся при резании теплоты. Все это приводит к износу и разрушению режущей кромки.

По условиям работы инструментальные материалы должны обладать следующими свойствами:

- 1) достаточной твердостью и прочностью;
- 2) необходимой вязкостью;
- 3) красностойкостью;
- 4) износостойкостью.

Фреза может быть выполнена либо полностью из инструментального материала, либо иметь только режущую часть из него.

Для осуществления процесса резания твердость режущей части фрезы должна быть выше твердости обрабатываемого материала. В то же время инструментальный материал должен обладать необходимой прочностью, чтобы противостоять действующим при резании силам. Чем выше твердость инструментального материала, тем выше его режущая способность.

Однако с повышением твердости повышается и хрупкость материала, что приводит к разрушению режущих кромок вследствие выкрашивания. Поэтому наряду с достаточной твердостью инструментальный материал должен обладать и необходимой вязкостью.

На твердость и прочность инструментального материала большое влияние оказывает температура резания. Увеличение температуры снижает твердость и прочность, а также снижает режущие свойства инструмента. Способность инструмента сохранять свою твердость при нагреве называется красностойкостью.

Инструментальный материал должен обладать также высокой износостойкостью, определяющей длительность работы инструмента до затупления.

Необходимо заметить, что одновременное соблюдение перечисленных выше требований представляет собой весьма трудную задачу, поэтому ни один из современных инструментальных материалов не обладает в полной мере указанными свойствами.

Для изготовления фрез находят применение главным образом:

- 1) быстрорежущие стали;
- 2) металл-керамические твердые сплавы;
- 3) минералокерамика.

Быстрорежущие стали. Быстрорежущими называются хромовольфрамовые стали с содержанием вольфрама более 8% и хрома от 3,8 до 5,4%.

Эти стали отличаются повышенной износостойкостью и красностойкостью (сохраняют свою твердость при нагреве до 600—650°) и успешно применяются при фрезеровании различных материалов.

Быстрорежущие стали по ГОСТ 9373—60 могут быть разделены на стали [1] *нормальной* и *повышенной* производительности (табл. 1).

Таблица 1

Марки и химический состав быстрорежущих сталей по ГОСТ 9373—60

Марка стали	Химический состав (в %)					
	углерод С	вольфрам W	хром Cr	ванадий V	молибден Mo	кобальт Co
Стали нормальной производительности						
P18	0,7—0,8	17,5—19	3,8—4,4	1,0—1,4	До 0,3	—
P9	0,85—0,95	8,5—10	3,8—4,4	2,0—2,6	„ 0,3	—
P18Ф2	0,85—0,95	17,5—19	3,8—4,4	1,8—2,4	„ 0,5	—
Стали повышенной производительности						
P18Ф2К5	0,85—0,95	17,5—19	3,8—4,4	1,8—2,4	До 0,5	5,0—6,0
P9К5	0,9—1,0	9—10,5	3,8—4,4	2—2,6	„ 0,3	5,0—6,0
P9К10	0,9—1,0	9—10,5	3,8—4,4	2—2,6	„ 0,3	9,5—10,5
P9Ф5	1,4—1,5	9—10,5	3,8—4,4	4,3—5,1	0,4	—
P14Ф4	1,2—1,3	13—14,5	4—4,6	3,4—4,1	„ 0,4	—
P10Ф5К5	1,45—1,55	10—11,5	4—4,6	4,3—5,1	0,3	5,0—6,0

Примечание. При содержании в сталях P18 и P9 молибдена более 0,3% содержание вольфрама снижается с учетом следующего соотношения: 1% Mo заменяет 2% W. Такие стали обозначаются марками P18M и P9M.

Буквы в марках стали имеют следующие обозначения: P характеризует группу быстрорежущих сталей, Ф — ванадий, К — кобальт. Цифры за буквами означают соответственно среднее содержание (в процентах) вольфрама, ванадия и кобальта.

В обозначениях сталей P18 и P9 ванадий не указывается. Кроме указанных элементов в быстрорежущих сталях содержится также марганец, кремний, никель, сера и фосфор. В дополнение к указанным сталям в настоящее время проходит производственную проверку новая марка быстрорежущей стали P12, поставляемая по

техническим условиям как сталь ЭП201. Эта сталь имеет следующий состав: 0,8—0,9% С, 12—13% W, 2,8—3% Cr и 1,4—1,8% V.

Для изготовления фрез разных типов применяют в основном быстрорежущие стали P18, P9, а также рекомендуется сталь P12.

Фрезы из сталей P18 и P9 применяют для обработки сталей с пределом прочности σ_s до 90—100 кг/мм² и чугунов твердостью HB 270—290. При обработке обычных сталей режущие свойства их примерно равноценны.

Сталь P18 несколько превосходит сталь P9 по производительности при обработке сталей повышенной прочности с $\sigma_s > 75$ кг/мм². Недостатком стали P9 по сравнению со сталью P18 является ее худшая шлифуемость. Сталь P12 по режущим свойствам почти не отличается от стали P18.

Для обработки труднообрабатываемых материалов, жаропрочных сталей и сплавов нержавеющей сталей и др. фрезы изготовляют из сталей P18Ф2К5, P10Ф5К5, P14Ф4, P9Ф5.

Хорошие результаты при фрезеровании жаропрочных материалов показала и кобальтованадиевая сталь, предложенная Ленинградским Политехническим институтом им. М. И. Калинина, марки P18Ф2К8М. В отличие от сталей по ГОСТ 9373—60 она имеет повышенное содержание углерода и иное соотношение легирующих элементов, что в сочетании с рациональной термической обработкой позволяет получать высокую твердость и износостойчивость режущего инструмента. Сталь P18Ф2К8М имеет следующий состав: 0,95—1,05% С, 17—19% W, 3,8—4,2% Cr, 2—2,5% V, 7,5—8,5% Co, 1—1,2% Mo, > 0,4% Mg, > 0,4% Si, > 0,4% Ni, 0,03% S, 0,03% P.

По сравнению со сталью P18 кобальтованадиевые стали P18Ф2К5 и P10Ф5К5 отличаются повышенной красностойкостью, а также достаточно высокой износостойкостью.

Высокованадиевые стали P14Ф4 и P9Ф5 характеризуются главным образом повышенной износостойкостью и применяются при работе с тонкими срезами, а также для обработки жаропрочных и титановых сплавов, различных пластмасс, фибры, эбонита и т. д.

Следует иметь в виду, что стали, содержащие кобальт, имеют склонность к обезуглероживанию при нагреве

в процессековки, отжига и закалки. Поэтому необходимо принимать меры против обезуглероживания и увеличивать припуск на инструменте при черновой обработке и шлифовке после закалки.

Высокованадиевые стали характеризуются низкой шлифуемостью.

Твердость после термической обработки (закалка и отпуск) фрез из быстрорежущих сталей нормальной производительности составляет *HRC* 62—65, а твердость фрез из кобальтованадиевых сталей может достигать *HRC* 67—68¹.

Твердые сплавы. Твердые сплавы отличаются более высокими по сравнению с быстрорежущей сталью режущими свойствами, не теряют своей твердости при температуре нагрева до 900—1000°С и позволяют работать с высокими скоростями резания.

Твердые сплавы состоят из карбидов тугоплавких материалов вольфрама, титана, тантала, связанных кобальтом.

Чем больше в сплаве карбидов, тем выше его твердость; чем больше кобальта, тем выше вязкость.

Твердые сплавы получают путем прессования соответствующих порошков и последующего их спекания.

Различают следующие твердые сплавы:

1) вольфрамовые типа ВК, состоящие из карбида вольфрама, цементированного кобальтом;

2) титановольфрамовые типа ТК, состоящие из карбида титана, карбида вольфрама и кобальта;

3) титанотанталовольфрамовые типа ТТК, состоящие из карбида титана, карбида тантала и карбида вольфрама, цементированных кобальтом.

Марки применяемых твердых сплавов приведены в ГОСТ 3882—61.

¹ Испытание твердости закаленного режущего инструмента производят на приборе Роквелла путем вдавливания алмазного конуса с углом при вершине 120° в испытываемую поверхность с усилием 150 кг. О числе твердости судят по глубине проникновения конуса. Прибор имеет три шкалы *A*, *B*, *C*. Для испытания твердости закаленных сталей пользуются шкалой *C*, и твердость в этом случае обозначают *HRC*. Шкала *A* используется для испытания твердых сплавов, и твердость обозначается *HRA*. Шкала *B* используется для испытания мягких материалов. В последнем случае вдавливается стальной шарик диаметром 1/16" и твердость обозначается *HRB*.

Для изготовления фрез применяются твердые сплавы, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Марки твердых сплавов, применяемые для изготовления фрез

Группы твердых сплавов	Марки твердых сплавов	Ориентировочный состав смеси без учета примесей (в %)			
		Карбид вольфрама	Карбид титана	Карбид тантала	Кобальт
Вольфрамовая	ВК4	96	—	—	4
	ВК6М	94	—	—	6
	ВК6	94	—	—	6
	ВК8	92	—	—	8
Титановольфрамовая	T15K6	79	15	—	6
	T14K8	78	14	—	8
	T5K10	85	6	—	9
	T5K12B	83	5	—	12
Титанотанталовольфрамовая	ТТ7К12	81	4	3	12

Буквы в марках вольфрамовых твердых сплавов означают: В — наличие карбидов вольфрама и К — кобальта. Цифра за буквой К указывает количество (в процентах) содержания кобальта.

Буква после цифры означает особенность технологии изготовления сплава. Так, буква М в сплаве ВК6М означает, что сплав имеет более мелкозернистую структуру. Такие сплавы обладают более высокой износостойкостью.

Таким образом, например, сплав ВК8 содержит: 92% карбида вольфрама и 8% кобальта.

В титановольфрамовых сплавах буква Т означает наличие карбида титана, буква К — кобальта, а цифры за буквами показывают содержание этих элементов в процентах. Буква В в сплаве Т5К12В означает, что сплав

имеет более крупнозернистую структуру. Такие сплавы обладают более высокой эксплуатационной прочностью, но меньшей износостойкостью.

Таким образом, например, сплав Т15К6 содержит 15% карбида титана, 6% кобальта, остальные 79% карбида вольфрама.

Область применения перечисленных марок твердых сплавов при фрезеровании приведена в табл. 3.

Кроме перечисленных, в настоящее время проходят испытания ряд опытных марок твердых сплавов, которые могут быть успешно применены при фрезеровании [2]. Сюда относятся универсальные сплавы ТТ10К8А и ТТ10К8Б, а также сплавы с молибденом ВК8Мо и Т5К10Мо. Универсальные сплавы ТТ10К8А и ТТ10К8Б целесообразно применять для обработки закаленных, жаропрочных и других труднообрабатываемых сталей и сплавов при работе с тонкими срезами. При этом следует иметь в виду, что сплав ТТ10К8А имеет несколько большую хрупкость по сравнению со сплавом ТТ10К8Б. Сплавы с молибденом характеризуются высокой износостойкостью.

При одних и тех же условиях фрезерования износостойкость сплава Т5К10Мо в 2 раза выше, чем у сплава Т5К10, а сплава ВК8Мо в 3 раза по сравнению со сплавом ВК8.

Сплавы с молибденом целесообразно применять при тяжелых условиях обработки различных труднообрабатываемых материалов.

Фрезы дисковые, фасонные и др. малых размеров могут быть целиком изготовлены из твердого сплава.

Фрезы больших размеров оснащаются пластинками твердых сплавов. Форма и размеры пластинок твердых сплавов приведены в ГОСТ 2209—55.

Кроме указанных в ГОСТ 2209—55 пластин в последнее время находят применение многогранные (трехгранные, четырехгранные, пятигранные и шестигранные) неперегачиваемые пластинки твердых сплавов.

Для торцовых фрез успешно применяются пятигранные твердосплавные пластинки.

Минералокерамические сплавы. Минералокерамические сплавы представляют собой неметаллический режущий материал, который применяют в виде пластин разной формы и размеров, изготовленных из окиси

Назначение марок твердых сплавов

Марка сплава	Область применения
ВК4	Черновое и чистовое фрезерование при обработке чугуна, цветных металлов и их сплавов, неметаллических материалов, титана и титановых сплавов, а также нержавеющей сталей и жаропрочных сталей и сплавов
ВК6М	Чистовое и получистовое фрезерование жаропрочных сталей и сплавов, нержавеющей сталей, аустенитного класса, специальных твердых чугунов, в том числе и отбеленных, закаленного чугуна, твердой бронзы, сплавов легких металлов, твердых и абразивных изоляционных материалов, пластмасс, твердой бумаги, стекла, фарфора. Обработка сырых углеродистых и легированных сталей при тонких сечениях среза на малых скоростях резания
ВК6	Получистовое и чистовое фрезерование сплошных поверхностей при обработке чугуна, цветных металлов и сплавов и неметаллических материалов
ВК8	Черновое фрезерование при обработке чугуна, цветных металлов и их сплавов и неметаллических материалов; обработка специальных труднообрабатываемых жаропрочных сталей и сплавов
Т15К6	Чистовое и получистовое фрезерование сплошных поверхностей при обработке углеродистых и легированных сталей
Т14К8	Черновое фрезерование сплошных поверхностей при обработке углеродистых и легированных сталей
Т5К10	Черновое фрезерование прерывистых поверхностей при обработке углеродистых и легированных сталей преимущественно в виде поковок, штамповок и отливок по корке и окалине
Т5К12В, ТТ7К12	Тяжелое черновое фрезерование углеродистых и легированных сталей

алюминия Al_2O_3 . В настоящее время наиболее распространен минералокерамический сплав марки ЦМ332. Этот сплав имеет высокую твердость и износостойкость и сохраняет режущие свойства до температуры $1200^\circ C$.

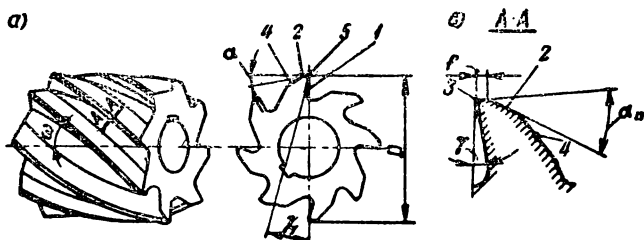
По своим режущим свойствам сплав ЦМ332 не уступает режущим свойствам твердых сплавов, а при обработке чугуна, бронзы и др. даже превосходит их.

Основным недостатком минералокерамических сплавов является повышенная хрупкость, способствующая выкрашиванию режущих кромок.

Сплав ЦМ332 успешно используется при торцовом фрезеровании чугуна, цветных сплавов и других материалов.

3. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РЕЖУЩЕЙ ЧАСТИ ФРЕЗ [3]

Всякий режущий инструмент имеет форму клина, который врезается в обрабатываемый материал и удаляет слой металла в виде стружки.



Фиг. 4. Элементы и углы цилиндрической фрезы: *a* — цилиндрическая фреза; *б* — форма зуба в нормальном сечении *A—A*.

Углы заточки инструмента получили название геометрии или геометрических параметров режущей части инструмента.

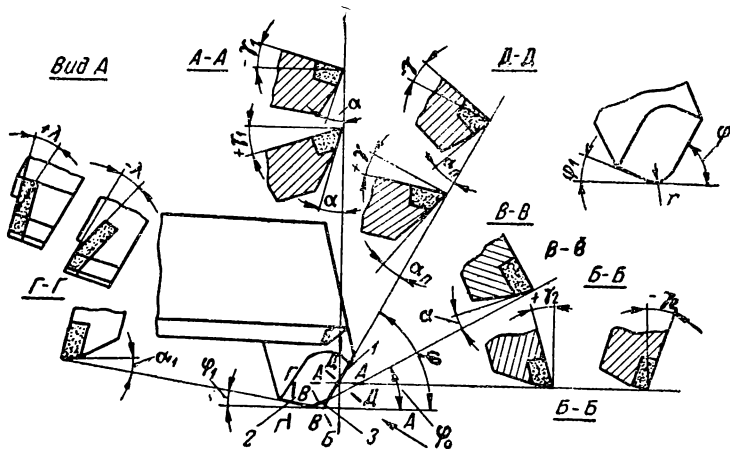
На фиг. 4 приведены элементы и углы цилиндрической фрезы из быстрорежущей стали, а на фиг. 5 — элементы торцевой фрезы с пластинками твердого сплава.

На режущем инструменте (фиг. 4) различают следующие основные элементы:

передняя поверхность 1 — это такая поверхность, по которой сходит образующая в процессе фрезерования стружка;

задняя поверхность 2 — это поверхность, которая обращена в процессе фрезерования к обработанной поверхности;

ленточка 3 — цилиндрическая полоска шириной $f = 0,05 - 0,1$ мм, оставляемая на задних поверхностях у вершин лезвий зубьев фрезы для обеспечения их концентричности после заточки;



Фиг. 5. Геометрические параметры режущей части торцовых фрез с пластинками твердого сплава.

затылочная поверхность 4;

режущее лезвие 5, или режущая кромка, — это линия пересечения передней и задней поверхностей.

У цилиндрических фрез режущее лезвие выполняется винтовым, наклоненным к оси фрезы под углом ω .

Инструмент может иметь одну, как, например, у цилиндрической фрезы, и более, как, например, у торцовой фрезы, режущих кромок. У торцовой фрезы (фиг. 5) различают: главную режущую кромку 1, выполняющую основную работу резания; вспомогательную режущую кромку 2, зачищающую обработанную поверхность; переходную режущую кромку 3, которая увеличивает прочность вершины зуба. Переходная кромка может

быть либо выполнена по радиусу, либо срезана под некоторым углом φ_0 . Число задних граней у инструмента соответствует числу режущих кромок.

У цилиндрических фрез (фиг. 4) различают углы: передний угол γ , нормальный задний угол α_n , поперечный передний угол γ_1 , задний угол α и угол наклона режущей кромки ω .

Углами, характеризующими режущую часть зуба, у цилиндрической фрезы являются γ , α_n и ω .

У торцовой фрезы (фиг. 5) различают углы: передний угол γ , нормальный задний угол α_n , на угловом лезвии; поперечный передний угол γ_1 ; задний угол α ; продольный угол γ_2 ; углы в плане φ главной режущей кромки; φ_0 — переходной и φ_1 — вспомогательной режущих кромок; угол наклона главной режущей кромки λ .

Углами, характеризующими режущую часть зуба, торцовой фрезы являются γ , α_n , φ , φ_0 , φ_1 и λ .

Главными углами называются передний угол γ и задний угол α , играющие наибольшую роль в процессе резания.

Передний угол. Передним углом γ называется угол между касательной к передней поверхности и осевой плоскостью, измеряемый в плоскости, перпендикулярной к проекции режущего лезвия на осевую плоскость.

В этой плоскости совершаются основные деформации в срезаемом слое в процессе резания.

Основным назначением угла γ является уменьшение силы, необходимой на деформацию срезаемого слоя металла. Угол γ выбирается в зависимости от физико-механических свойств обрабатываемого материала, а также материала режущей части фрезы.

Поперечный передний угол γ_1 измеряется в плоскости, перпендикулярной оси, как угол между касательной к передней поверхности и осевой плоскостью, проходящей через рассматриваемую точку. Продольный передний угол γ_2 измеряется в продольной плоскости, проходящей через рассматриваемую точку, как угол между касательной к передней поверхности и осевой плоскостью. Между углами γ , γ_1 и γ_2 существуют следующие зависимости:

для цилиндрических, концевых и дисковых фрез с наклонными зубьями

$$\operatorname{tg} \gamma = \operatorname{tg} \gamma_1 \cos \omega; \quad (1)$$

для торцовых фрез с угловым лезвием.

$$\operatorname{tg} \gamma = \operatorname{tg} \gamma_2 \cos \varphi + \operatorname{tg} \gamma_1 \sin \varphi \quad (2)$$

Углы γ , γ_1 и γ_2 могут быть равны нулю, иметь положительное или отрицательное значение.

Задний угол. Задним углом α называется угол между касательной к задней поверхности зуба фрезы и касательной к окружности вращения рассматриваемой точки. Угол α измеряется в плоскости, перпендикулярной к оси фрезы, совпадающей с плоскостью движения траектории данной точки режущей кромки.

Нормальным задним углом α_n называется угол между касательной к задней поверхности и нормалью к осевой плоскости. Угол α_n измеряется в плоскости, перпендикулярной к проекции главного режущего лезвия на осевую плоскость, проходящую через рассматриваемую точку лезвия фрезы.

Между углами α_n и α существуют следующие зависимости:

для цилиндрических, дисковых и концевых фрез

$$\operatorname{tg} \alpha_n = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\cos \omega}; \quad (3)$$

для торцовых фрез с угловой кромкой и угловых фрез

$$\operatorname{tg} \alpha_n = \frac{\operatorname{tg} \alpha \sin \varphi}{\cos \lambda}; \quad (4)$$

для фасонных затылованных фрез

$$\operatorname{tg} \alpha_n = \operatorname{tg} \alpha \sin \varepsilon \frac{R}{r_x}; \quad (5)$$

для фасонных косозатылованных фрез

$$\operatorname{tg} \alpha_n = \operatorname{tg} \alpha \sin (\varepsilon + \tau) \frac{R}{r_x}; \quad (6)$$

для фасонных острозаточенных (с применением ко-пира) фрез

$$\operatorname{tg} \alpha_n = \operatorname{tg} \alpha \sin \varepsilon - \frac{h_x \operatorname{tg} \gamma}{R - h_x} \sin \varepsilon. \quad (7)$$

В этих формулах: α — угол между касательной к профилю фрезы в рассматриваемой точке и линией, перпендикулярной к оси фрезы (см. фиг. 22, б);
 R — наибольший радиус фрезы в мм;
 r_x — радиус рассматриваемой точки профиля фрезы в мм;
 τ — угол поворота суппорта при косом затыловании;
 h_x — расстояние от рассматриваемой точки x на режущей кромке до точки s с наибольшим радиусом R в мм.

Основным назначением заднего угла α является уменьшение трения задней поверхности зуба об обрабатываемую поверхность. Задний угол α_1 на вспомогательной режущей кромке устраняет трение вспомогательной режущей кромки об обработанную поверхность в процессе резания.

Примечание. При определении задних углов α_n ; α_1 ; α и передних γ ; γ_1 ; γ_2 фреза рассматривается как геометрическое тело в состоянии покоя.

Угол в плане φ и угол переходного лезвия φ_0 . Углом в плане φ называется угол между проекцией углового лезвия фрезы на осевую плоскость, проходящую через рассматриваемую точку лезвия и направлением подачи. При постоянных значениях глубины резания и подачи угол φ определяет соотношение между толщиной и шириной снимаемого слоя металла.

С уменьшением угла φ уменьшается толщина и увеличивается ширина среза, вследствие чего улучшается отвод тепла из зоны резания и улучшаются условия работы фрезы. Вместе с тем с уменьшением угла φ резко возрастают радиальная и осевая составляющие силы резания, вследствие чего фрезы с малым углом в плане φ могут быть использованы только при работе на жестких и мощных станках. Создание переходного лезвия $f = 1 - 2$ мм с углом в плане φ_0 упрочняет режущую кромку у вершины, что способствует увеличению времени работы фрезы без переточки.

Угол в плане φ_0 переходного лезвия обычно принимают равным половине угла φ т. е. $\varphi_0 = \frac{\varphi}{2}$

Вспомогательный угол в плане φ_1 Вспомогательным углом в плане φ_1 называется угол между направлением подачи и проекцией вспомогательного лезвия на осевую плоскость, проходящую через рассматриваемую точку лезвия.

Назначением угла φ_1 является уменьшение трения вспомогательной кромки в процессе резания по обработанной поверхности.

Кроме того, угол φ_1 оказывает влияние на чистоту обработанной поверхности. С уменьшением угла φ_1 чистота поверхности улучшается.

Угол наклона режущей кромки Углом наклона режущей кромки называется угол между режущим лезвием и его проекцией на осевую плоскость, проходящую через вершину в месте стыка главного и переходного режущих лезвий (фиг. 5). Угол λ может быть равным нулю, иметь положительное или отрицательное значение и рассчитывается по следующей формуле

$$\operatorname{tg} \lambda = \operatorname{tg} \gamma_1 \cos \varphi - \operatorname{tg} \gamma_2 \sin \varphi. \quad (8)$$

Для цилиндрических фрез с винтовыми или наклонными зубьями угол наклона зубьев ω является углом λ .

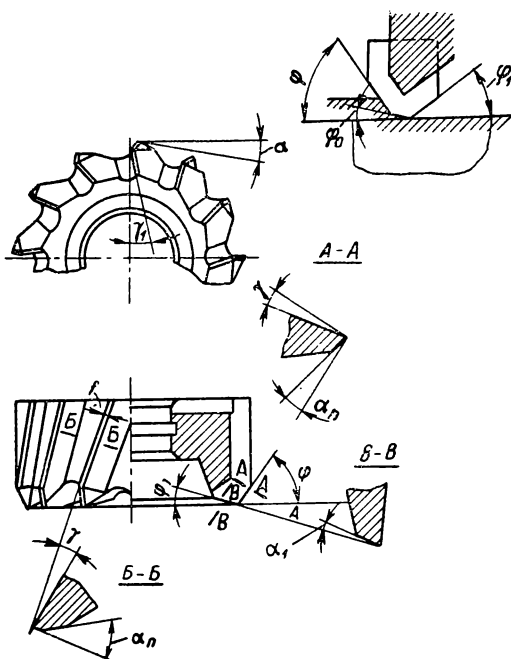
С помощью угла λ можно регулировать первоначальное место контакта инструмента и заготовки и направление отвода стружки.

Если угол λ больше нуля, то первоначальное место контакта инструмента и заготовки удалено от вершины, что способствует предохранению от разрушения наиболее ослабленного места, каким является вершина зуба фрезы. Особенно большое значение это имеет для фрез с пластинками твердых сплавов.

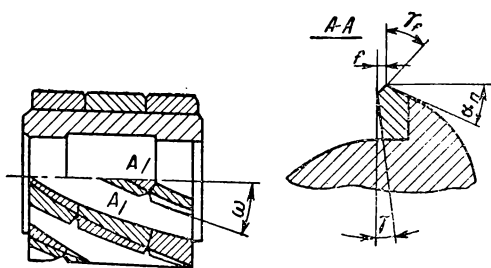
Угол наклона винтовых зубьев ω Углом наклона винтовых зубьев ω называется угол между касательной к винтовому лезвию и осью фрезы. Угол ω служит для более плавной работы фрезы и для создания направления сходящей стружки.

На фиг. 4 и 6 приведены геометрические параметры фрез из быстрорежущей стали, а в табл. 4 и 5 — их рекомендуемые значения [4].

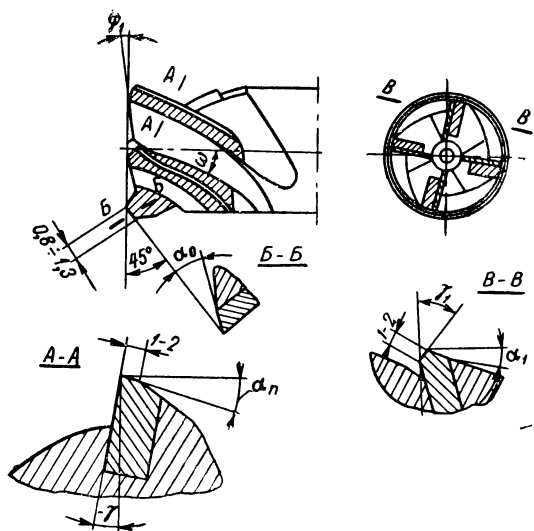
На фиг. 5, 7, 8, 9 приведены геометрические параметры фрез с пластинками твердых сплавов, а в табл. 6—9 — их рекомендуемые значения [4].



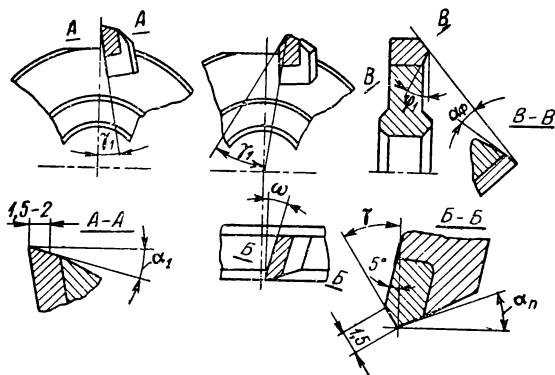
Фиг. 6. Геометрические параметры режущей части фрез из быстрорежущей стали.



Фиг. 7. Геометрические параметры режущей части цилиндрических фрез с винтовыми пластинками из твердого сплава.



Фиг. 8. Геометрические параметры режущей части концевых фрез с винтовыми пластинками из твердого сплава.



Фиг. 9. Геометрические параметры режущей части дисковых фрез с пластинками из твердого сплава.

Таблица 4

Геометрические параметры режущей части фрез из стали Р18
(см. фиг. 4 и 6)

I. Передние углы						
Обрабатываемый материал		Фреза торцовая, шпильчатая, дисковая, концевая	Фреза дисковая, пазовая и отрезная		Фреза фасонная и угловая	
			$B < 3$	$B > 3$	для черновой обработки	для чистовой обработки
передний угол γ в град						
Сталь углеродистая и легированная	$\sigma_s \leq 60 \text{ кг/мм}^2$	20	5	10	15	10
	$\sigma_s = 60-100 \text{ кг/мм}^2$	15	5	10	15	5
	$\sigma_s > 100 \text{ кг/мм}^2$	10	5	10	10	5
Сталь жаропрочная		12—20	—	—	5	—
Чугун серый	$HB \leq 150$	15	5	10	15	5
	$HB > 150$	10	5	10	10	5
Медный сплав		10	5	10	10	5
II. Задние углы						
Типы фрез			Задний угол в град			
			Нормальный α_n		Торцовый α_t	
Торцовая и цилиндрическая	с мелкими зубьями		16		8	
	со вставными ножами		12		8	
Дисковая пазовая и отрезная			20		—	
Дисковая трехсторонняя	цельная		20		6	
	со вставными ножами		16		6	
Концевая			14		—	
Прорезная (шлицевая)			30		—	

Типы фрез		Задний угол в град			
		Нормальный α_n	Торцовый α_1		
Фасонная и угловая	с незатылованным зубом	16	8		
	с затылованным зубом	12	—		
III. Угол в плане и угол переходной кромки					
Типы фрез		Угол в плане в град			
		Главный φ	Вспомогательный φ_1	Переходной кромки φ_0	Длина переходной кромки (или радиус) f в мм
Торцовая для стали и медных сплавов	со вставными ножами	45—60	1—2	—	—
	цельная	90	1—2	45	1,0—2,0
Торцовая для жаропрочных сталей		30—60	10	—	1,0
Концевая		—	3	45	0,5—1,0
Дисковая	трехсторонняя	—	1—2	45	1,0—1,5
	пазовая	—	1—2	—	—
Прорезная (шлицевая)		—	15'—1°30'	—	—
Отрезная (шириной свыше 3 мм)		—	15'—1°	45	0,5
Примечания.					
1. У фрез цилиндрических с углом наклона зубьев свыше 30° передний угол γ при обработке стали $\sigma_B < 60 \text{ кг/мм}^2$ берется равным 15°.					
2. У фасонных фрез с передним углом $\gamma > 0$ необходима коррекция контура при обработке точных профилей.					
3. При обработке жаропрочных сталей торцовыми фрезами брать верхние значения передних углов, концевыми и цилиндрическими — нижние и средние.					
4. На задней грани фрез при заточке оставлять круглошлифованную ленточку шириной не более 0,1 мм. Зубья у фрез концевых (прорезных) и отрезных (круглых пил) затачиваются без оставления ленточки.					

Таблица 5

Рекомендуемые значения угла наклона ω винтовых канавок для фрез из быстрорежущей стали

Типы фрез		Угол ω в град
Цилиндрическая	с крупными зубьями	40
	с мелкими зубьями	30—35
	со вставными ножами	20—45
Концевая		30—45
Шпоночная		15—25
Дисковая	двухсторонняя	15
	трехсторонняя	8—15
	трехсторонняя с разнонаправленным зубом	10—15
	трехсторонняя сборная при $B^1 > 15$ мм при $B < 15$ мм	12—15 8—10
Торцовая	с цельными зубьями	25—40
	со вставными ножами	10

¹ B — ширина фрезы.

Таблица 6

Геометрические параметры режущей части торцовых фрез с пластинками твердого сплава (см. фиг. 5)

Обрабатываемый материал		Углы заточки зубьев фрезы в град в сборе								
		Угол в плане			Задний угол		Передний угол	Угол наклона режущей кромки	Радиус при вершине в мм	
		главный	переходной кромки	в-помогательный	для работы с подачей в мм/зуб					
		φ	φ_0	φ_1	$s_z < 0,25$	$s_z > 0,25$	γ	λ	r	
Сталь конструкционная, углеродистая и легированная	$\sigma_B \leq 80$ кг/мм ²	15—60	$\frac{-6}{2}$	5	12—15	6—8	$\frac{-5}{-10}$	12	15	—
	$\sigma_B > 80$ кг/мм ²									
Сталь жаропрочная		30—60	—	10	10	10	+8	0	1,0	
Чугун серый		15—60	$\frac{-6}{2}$	5	12—15	6—8	+5	12—15	—	
Чугун ковкий		60	$\frac{-6}{2}$	2		6—8	+7	12—15	—	

Примечание. Малые углы в плане $\varphi = 15 - 30^\circ$ следует применять при обработке на жестких станках для черновых проходов с малыми глубинами резания или для чистовых проходов с невысокими требованиями чистоты и точности обрабатываемой поверхности.

Таблица 7

Геометрические параметры режущей части цилиндрических фрез с пластинками из твердого сплава (см. фиг. 7)

Обрабатываемый материал		Углы заточки зубьев фрезы в град			Фаска	
		Задний угол α_n	Передний угол γ	Угол наклона спирали ω	передний угол $\gamma_{ф}$ на фаске в град	ширина ленточки f в мм
Сталь углеродистая и легированная Чугун	$\sigma_b < 75 \text{ кг/мм}^2$ $HB < 200$	16	5	24—30	—	—
Сталь углеродистая и легированная Чугун	$\sigma_b = 75 - 110 \text{ кг/мм}^2$ $HB > 200$	16	5	24—30	0	0,2—0,6
Сталь углеродистая и легированная	$\sigma_b > 110 \text{ кг/мм}^2$	16	5	24—30	-5	1,0—2,0

Таблица 8

Геометрические параметры режущей части концевых фрез с пластинками из твердого сплава (см. фиг. 8)

Обрабатываемый материал	Конструкция фрезы	Углы заточки зубьев фрезы в град						
		Задний угол			Передний угол		Угол наклона на винтовых пластинках ω	Вспомогательный угол в плане φ_1
		на периферии зуба α_n	на торце зуба α_1	на переходной кромке α_0	на периферии зуба γ	на торце зуба γ_1		
Сталь конструкционная углеродистая и легированная	Фрезы с коронками	20	6	20	-5 ¹	(+3) — (-3) ²	25	3
	Фрезы с винтовыми пластинками	20	6	20	-5 ¹	(+3) — (-3) ²	28—42	3

¹ При малой жесткости системы станок — инструмент — деталь при больших сечениях стружки ($B \geq D$; $t \geq 0,5 D$), а также при работе с низкими скоростями резания, при недостаточном числе оборотов шпинделя ($v < 100 \text{ м/мин}$) передний угол γ назначается положительным +5 — +8°.

² Положительные значения для мягких сталей, отрицательные для твердых сталей.

Геометрические параметры режущей части дисковых фрез с пластинками из твердого сплава (см. фиг. 9)

Обрабатываемый материал		Углы заточки зубьев фрезы в град					
		Задний угол			Передний угол	Угол наклона зуба	Вспомогательный угол в плече
		на периферии зуба	боковой стороны зуба	на переходной кромке			
		α_n	α_1	α_ϕ	γ	ϵ	φ_1
Сталь кон- струкционная, углеродистая и легированная	$\sigma_B \leq 80 \text{ кг/мм}^2$	20	4	20	-5	5-10	2-8
	$\tau_B > 80 \text{ кг/мм}^2$	20-25	4	20-25	-10		
Чугун серый		10-15	4	10-15	+5	5-10	2-5

4. ПРОЦЕСС РЕЗАНИЯ И ЕГО ОСОБЕННОСТИ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ

Процесс резания характеризуется следующими явлениями:

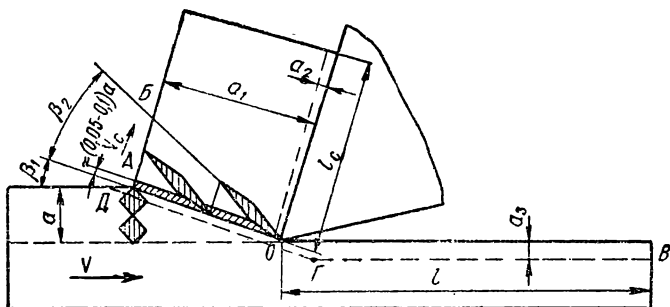
- 1) деформацией металла как в срезаемом слое, так и ниже линии среза под обработанной поверхностью;
- 2) трением стружки о переднюю грань и обрабатываемой поверхности о заднюю грань инструмента;
- 3) выделением теплоты, которая рассеивается в стружку, инструмент, изделие и окружающую среду;
- 4) износом режущего инструмента.

Деформация металла при резании. Так как явления, сопровождающие процесс резания, являются общими для всех режущих инструментов, то рассмотрим работу резца как наиболее простого режущего инструмента.

Если затовке (фиг. 10) сообщить движение в направлении стрелки v , то резец, внедряясь в металл,

вызовет сначала упругую, затем пластическую деформацию¹.

По мере продвижения заготовки сила сопротивления металла деформации будет увеличиваться и, когда она превысит прочность данного металла, произойдет сдвиг элемента по плоскости OA . Плоскость OA проф. И. А. Тиме, один из первых исследователей процесса резания



Фиг. 10. Схема образования стружки при резании пластичных металлов.

(1868—1870 гг.), назвал плоскостью скалывания. В более поздних исследованиях эта плоскость получила название *плоскости сдвига*.

Угол β_1 называется углом сдвига. Для вязких металлов, по опытам И. А. Тиме, этот угол находится в пределах $\beta_1 = 25\text{—}35^\circ$.

Как следует из более поздних исследований, плоскость сдвига в действительности представляет собой узкую зону толщиной $\sim (0,05\text{—}0,1) a$. В результате деформации срезаемый слой толщиной a превращается в стружку толщиной a_1 .

Пластическая деформация при резании распространяется как впереди резца, так и под обработанную поверхность, охватывая область $BГД$.

В процессе сдвига вследствие различных скоростей перемещения отдельных частиц металла как по величине,

¹ Упругой называют такую деформацию, когда при приложении нагрузки материал изменяет свою форму, а после снятия нагрузки — вновь ее восстанавливает. При пластической деформации первоначальная форма материала после снятия нагрузки не восстанавливается.

так и по направлению происходит поворот линий скольжения, в результате чего линии скольжения в стружке располагаются не параллельно плоскости сдвига OA , а под углом β_2 к ней. Это явление впервые обнаружил Я. Г. Усачев (1912—1914 гг.), наблюдая строение стружки под микроскопом. Угол β_2 носит название угла текстуры в стружке. По опытам Я. Г. Усачева, угол β_2 изменяется в пределах $0—30^\circ$. Если зерно металла до деформации представить в виде квадрата, то после деформации оно превращается в вытянутый ромб (на фиг. 10 заштрихованы), ориентированный в направлении OB . Это объясняется тем, что частицы металла, расположенные, например, на вертикальной диагонали квадрата, попадают в разное время на плоскость сдвига.

В то время как часть частиц металла, достигнув плоскости сдвига и претерпев деформацию, перемещается в направлении AB со скоростью стружки v_c , другая часть еще продолжает перемещение к плоскости сдвига со скоростью v [5].

Плоскость сдвига является границей между деформированным слоем и остальной массой металла. Слой стружки толщиной a_2 вблизи передней поверхности резца претерпевает сильную деформацию, и линии скольжения в этом слое располагаются параллельно передней поверхности резца.

После скалывания одного элемента стружки процесс резания повторяется, происходит скалывание второго элемента и т. д.

Виды стружек. Наблюдая за процессом резания, проф. И. А. Тиме установил, что в зависимости от условий работы возникают различные виды стружек. При резании пластичных металлов с малой скоростью стружка образуется в виде отдельных элементов, не связанных между собой. Такая стружка называется *элементной*.

При увеличении скорости образуется стружка, у которой прирезцовая сторона гладкая, а противоположная имеет ярко выраженные зазубрины или суставы. Такая стружка называется *стружкой скалывания или суставчатой*.

При работе с высокой скоростью стружка сходит с резца в виде ленты без заметных зазубрин. Такая стружка называется *сливной*.

Следует иметь в виду, что при изменении условий резания могут образовываться разнообразные переходные виды стружки.

При обработке малопластичных металлов (чугун, бронза) стружка образуется в виде отдельных неравномерных кусочков. Такая стружка называется стружкой *надлома*.

Нарост. При некоторых условиях резания на передней грани инструмента задерживается часть сильно деформированного металла, названная *наростом* (фиг. 11).

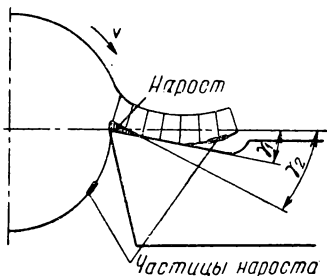
Это явление впервые было описано Я. Г. Усачевым, который показал, что нарост имеет большую по сравнению с обрабатываемым материалом твердость и способен резать металл.

Имея форму клина, нарост изменяет передний угол резца и оказывает влияние на деформацию срезаемого слоя, действующие при резании силы, износ резца и шероховатость обработанной поверхности. Так как при наличии нароста передний угол увеличивается $\gamma_2 > \gamma_1$

(фиг. 11), то снижается сила резания, вместе с тем нарост защищает режущую кромку от истирающего действия стружки и обработанной поверхности, уменьшая ее износ. В то же время в процессе резания происходит периодическое разрушение и восстановление нароста, при этом часть нароста уносится стружкой, а часть — обработанной поверхностью, ухудшая ее чистоту.

Таким образом, в условиях чистовой и получистовой обработки нарост является вредным явлением, так как способствует резкому ухудшению шероховатости обработанной поверхности, и поэтому необходимо вести борьбу с наростом. Наиболее эффективными мерами борьбы с наростом является работа с большими скоростями резания и применение смазочно-охлаждающих жидкостей.

Усадка стружки. В результате пластической деформации длина стружки l оказывается короче длины участка l , с которого она срезана (фиг. 10).



Фиг. 11. Нарост на резце.

Отношение пути, пройденного резцом, к длине стружки называют продольной усадкой стружки

$$k_l = \frac{l}{l_c}, \quad (9)$$

где k_l — коэффициент усадки стружки;

l — путь, пройденный резцом;

l_c — длина стружки.¹

Коэффициент усадки характеризует способность материалов претерпевать под действием нагрузки большие или меньшие пластические деформации. Чем пластичнее материал, тем больше коэффициент усадки стружки.

Так как объем деформируемого материала сохраняется неизменным, то вследствие укорочения длины стружки толщина и ширина ее оказываются больше толщины и ширины срезаемого слоя. При этом ширина стружки увеличивается в меньшей степени по сравнению с толщиной.

Приравнивая объем срезаемого слоя к объему стружки, будем иметь

$$fl = f_c l_c \text{ и } \frac{l}{l_c} = \frac{f_c}{f} = k_l. \quad (10)$$

Отношение $\frac{f_c}{f}$ называют поперечной усадкой стружки,

где f — площадь поперечного сечения среза в $мм^2$;

f_c — площадь поперечного сечения стружки в $мм^2$.

Из приведенной формулы следует, что продольная усадка равна поперечной усадке стружки.

Опыты показывают, что усадка стружки зависит не только от вязкости металла, но и от толщины срезаемого слоя, величины переднего угла, скорости резания и др.

С увеличением толщины среза, переднего угла и скорости резания усадка стружки уменьшается.

Упрочнение. Пластическая деформация при резании охватывает определенную область и распространяется как впереди резца, так и под обработанную поверхность, вызывая упрочнение или наклеп.

¹ Для более точных расчетов в расчет принимают среднюю длину стружки, равную $l_c = \frac{l_1 + l_2}{2}$, где l_1 — длина стружки по наружной поверхности; l_2 — длина стружки по внутренней поверхности.

Таким образом, упрочнению подвергаются как стружка, так и обработанная поверхность.

Глубина наклепа a_3 (фиг. 10) зависит от условий резания, достигая при шлифовании сотых, а при обдирке — десятых долей миллиметра и более.

Наклепанная поверхность характеризуется большей твердостью, которая в 3—4 раза превышает твердость исходного материала, большей износоустойчивостью и пониженной пластичностью. На упрочнение оказывает влияние целый ряд факторов.

Так, из опытов следует, что с уменьшением переднего угла, увеличением радиуса закругления режущего лезвия, толщины среза и затупления инструмента упрочнение увеличивается. С увеличением скорости резания и применением смазочно-охлаждающих жидкостей глубина и степень упрочнения уменьшаются.

Теплота при резании металлов. Вследствие пластической деформации, а также трения стружки о переднюю грань и изделия о заднюю грань инструмента при резании выделяется теплота, которая нагревает стружку, инструмент, деталь и излучается в воздух. С повышением скорости резания количество теплоты, уносимой стружкой, возрастает и деталь нагревается меньше, так как в нее поступает относительно меньшее количество теплоты.

С другой стороны, с повышением скорости резания увеличивается нагрев инструмента, что способствует более усиленному его износу, при этом вследствие трения стружки о переднюю грань происходит износ передней грани, а вследствие трения изделия о заднюю грань — износ задней грани.

Особенности процесса резания при фрезеровании. Особенности процесса резания при фрезеровании характеризуются: 1) прерывистостью резания; 2) малой толщиной стружки; 3) переменной нагрузкой на зуб фрезы. При фрезеровании резание осуществляется только на части дуги окружности, пока зубья фрезы находятся в контакте с обрабатываемым материалом.

В зависимости от условий работы время контакта измеряется десятими, сотыми и даже тысячными долями секунды. Врезание зубьев сопровождается ударом, что способствует повышенному износу и выкрашиванию режущих кромок. Если врезание совершается с нулевой

толщины, как при работе цилиндрическими, дисковыми, концевыми и другими фрезами, то режущая кромка не может сразу внедриться в металл и на некотором участке дуги контакта будет скользить по поверхности металла, сминая и наклепывая его.

Зуб фрезы при резании снимает стружку переменной толщины, что вызывает колебание сил в процессе фрезерования.

При биении фрезы, когда отдельные зубья находятся на разных расстояниях от оси ее вращения, возникают значительные колебания сил на отдельных зубьях. Прерывистость процесса резания и колебание сил при резании создают неблагоприятные условия для работы станка и способствуют возникновению вибраций.

ГЛАВА II

ФРЕЗЕРОВАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ, КОНЦЕВЫМИ, ДИСКОВЫМИ И ФАСОННЫМИ ФРЕЗАМИ [3, 6, 7, 8, 9]

5. ФРЕЗЕРОВАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ФРЕЗАМИ

Так как принцип работы цилиндрических, концевых, дисковых и фасонных фрез одинаков, то рассмотрим более подробно работу цилиндрической фрезой.

В процессе резания фреза от привода станка получает равномерное вращательное движение (фиг. 12). Это движение носит название *главного движения*. Обрабатываемая деталь, закрепленная в приспособлении на столе станка, получает равномерное поступательное движение. Это движение носит название *движения подачи*. При указанных движениях зубья фрезы последовательно вступают в работу и снимают стружку. При фрезеровании на обрабатываемой детали различают следующие три поверхности:

обрабатываемая поверхность *1* — поверхность детали, с которой должна быть снята стружка;

обработанная поверхность 2 — поверхность детали после обработки;

поверхность резания 3 — поверхность, образуемая в данный момент на детали режущими кромками фрезы в процессе фрезерования.

Рассмотрим элементы режима резания при цилиндрическом фрезеровании.

Скорость резания. Так как главным движением является вращение фрезы, то скоростью резания называется скорость наиболее удаленной от оси фрезы точки режущей кромки. Она измеряется в *м/мин* и определяется по формуле

$$v = \frac{\pi D n}{1000} \text{ м/мин,} \quad (11)$$

где v — скорость резания в *м/мин*;

D — диаметр фрезы в *мм*;

n — число оборотов фрезы в минуту;

$\pi = 3,14$.

Подача. Подача s — перемещение стола с заготовкой относительно вращающейся фрезы. У обычных фрезерных станков это перемещение может происходить как в горизонтальной плоскости (горизонтальная подача), так и в вертикальной плоскости (вертикальная подача).

При фрезеровании различают:

подачу в минуту s_m (*мм/мин*) — перемещение стола с заготовкой за 1 минуту

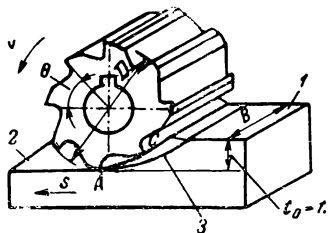
$$s_m = s_z z n; \quad (12)$$

подачу на один оборот фрезы s_o (*мм/об*) — перемещение стола с заготовкой за время одного оборота фрезы

$$s_o = \frac{s_m}{n}; \quad (13)$$

подачу на один зуб фрезы s_z (*мм/зуб*) — перемещение стола с заготовкой за время поворота фрезы на один зуб или угловой шаг между зубьями

$$s_z = \frac{s_o}{z} = \frac{s_m}{nz}. \quad (13a)$$



Фиг. 12. Схема работы цилиндрической фрезы.

В этих формулах:

z — число зубьев фрезы;

n — число оборотов фрезы в минуту.

Подача в минуту характеризует производительность, а подача на зуб определяет интенсивность нагрузки при фрезеровании.

Ширина и глубина фрезерования. Ширина фрезерования B (мм) — ширина обрабатываемой поверхности в направлении оси фрезы.

Глубина срезаемого слоя t_o (мм) — слой металла, снимаемый за один проход, в направлении перпендикулярном к обрабатываемой поверхности.

Глубина резания t (мм) — слой металла, срезаемого зубом фрезы на длине дуги резания AC (фиг. 12).

На фиг. 13 показаны ширина и глубина фрезерования при работе различными типами фрез.

Примечание. Для цилиндрических, дисковых и фасонных фрез $t = t_o$. Для торцовых фрез эти понятия различны. Для концевых фрез $t = D$ или $t = t_o$.

Угол контакта фрезы с заготовкой. Угол контакта фрезы с заготовкой ψ (фиг. 14) — центральный угол, соответствующий длине дуги резания в заготовке.

Величина этого угла определяется из треугольника OCE по следующей формуле

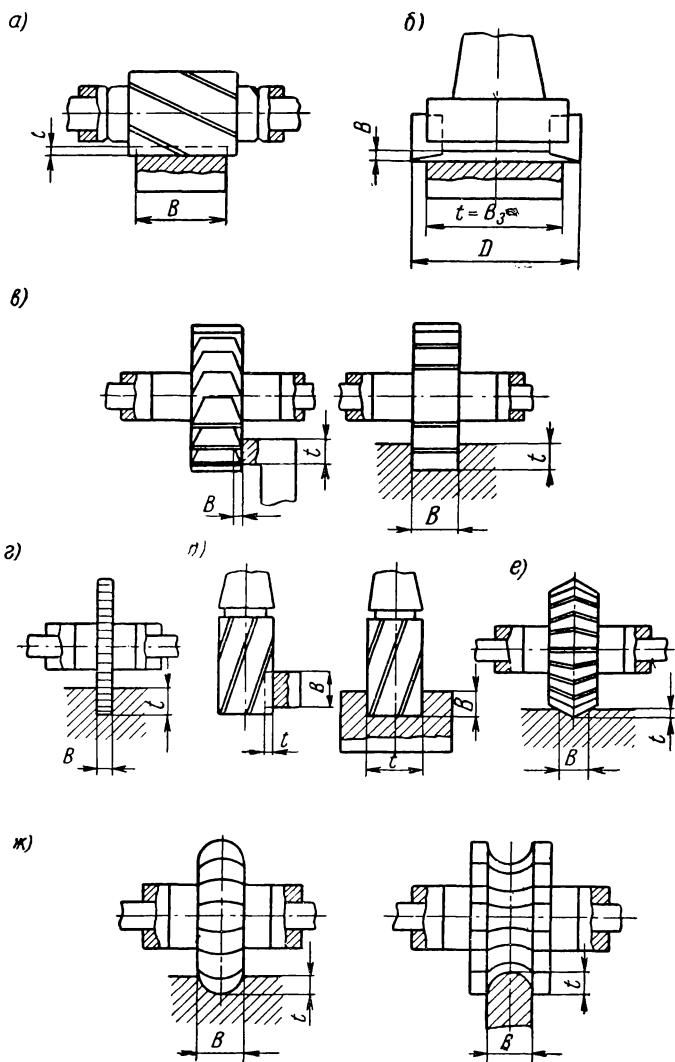
$$\cos \psi = \frac{OE}{OC} = \frac{R-t}{R} = \frac{D-2t}{D} = 1 - \frac{2t}{D}. \quad (14)$$

В дальнейшем для различных расчетов потребуется знать половину угла контакта $\frac{\psi}{2}$. Синус этого угла можно определить по формуле

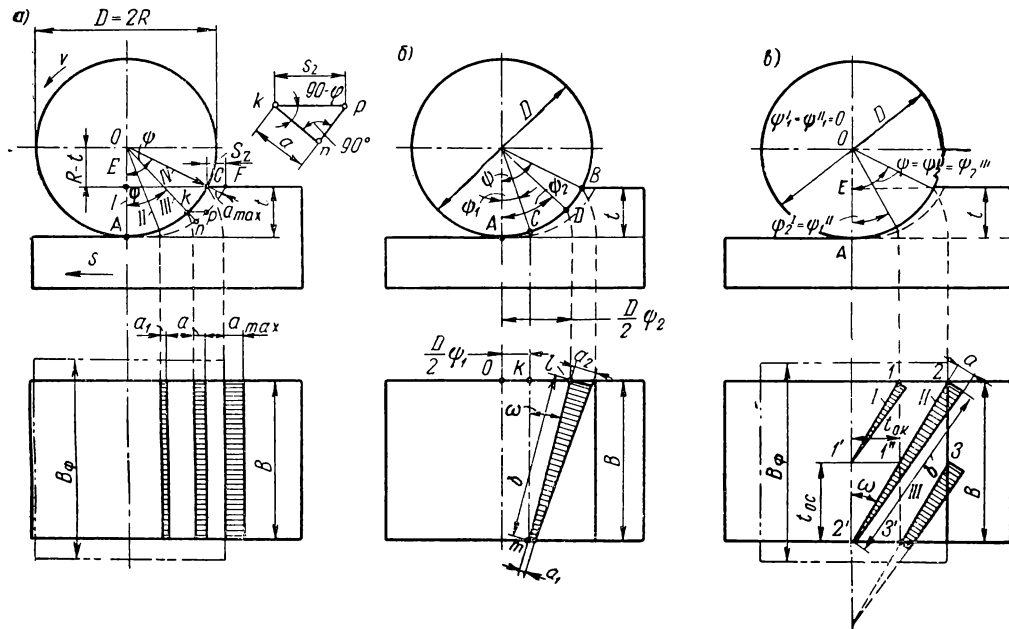
$$\sin \frac{\psi}{2} = \sqrt{\frac{1 - \cos \psi}{2}} = \sqrt{\frac{1 - 1 + \frac{2t}{D}}{2}} = \sqrt{\frac{t}{D}}. \quad (15)$$

Для угла ψ можно получить удобную для практических расчетов формулу, если выражение (15) представить в следующем виде

$$\frac{\psi}{2} \approx \sqrt{\frac{t}{D}} \text{ и } \psi \approx 2 \sqrt{\frac{t}{D}} \text{ рад.} \quad (16)$$



Фиг. 13. Ширина и глубина при фрезеровании различными фрезами: *a* — цилиндрической; *б* — торцевой; *в* — дисковой; *г* — отрезной и прорезной; *д* — концевой; *е* — угловой; *ж* — фасонной радиусной.



Фиг. 14. Элементы резания при работе цилиндрической фрезой:
 а — с прямым зубом; б и в — с винтовым зубом.

В формуле (16) угол ψ выражен в радианах. Для выражения этого угла в градусах необходимо правую часть умножить на $\frac{360}{2\pi}$, тогда

$$\psi = \frac{2 \cdot 360}{2\pi} \sqrt{\frac{t}{D}} \approx 115 \sqrt{\frac{t}{D}}. \quad (17)$$

Из формулы (14) следует, что угол контакта зависит от глубины резания и диаметра фрезы.

С увеличением глубины резания угол контакта увеличивается, а с увеличением диаметра фрезы — уменьшается.

Зная угол контакта ψ и число зубьев фрезы z , можно определить число зубьев m , одновременно находящихся в работе,

$$m = \frac{\psi}{\theta} = \frac{\psi z}{360}, \quad (18)$$

где θ — угловой шаг фрезы в град (фиг. 12), определяемый по формуле

$$\theta = \frac{360}{z} = \frac{2\pi}{z}. \quad (19)$$

Используя выражения (16), (18) и (19) число одновременно работающих зубьев можно представить также в следующем виде

$$m = \frac{z}{\pi} \sqrt{\frac{t}{D}}. \quad (18a)$$

Срез. Толщина среза a — переменное расстояние между двумя последовательными дугами контакта AC и AF , измеренное в направлении радиуса к первоначальной дуге AC (фиг. 14, a). Толщина среза для любого мгновенного положения зуба по дуге контакта может быть определена из треугольника knp , если принять линию np за прямую,

$$kn = kp \cos(90 - \varphi) = kp \sin \varphi$$

или

$$a = s_z \sin \varphi \text{ мм}, \quad (20)$$

где φ — мгновенный угол контакта или угол, соответствующий данному положению зуба фрезы.

В момент вступления зуба в работу (положение *I*) (фиг. 14, *a*), толщина среза равна нулю, а в момент выхода зуба из работы (положение *IV*), что соответствует полному углу контакта ψ , имеет наибольшее значение и определяется по формуле

$$a_{\max} = s_z \sin \psi \quad \text{мм} \quad (21)$$

или

$$\begin{aligned} a_{\max} = s_z \sin \psi &= s_z \sqrt{1 - \cos^2 \psi} = s_z \sqrt{1 - \left(1 - \frac{2t}{D}\right)^2} \approx \\ &\approx 2s_z \sqrt{\frac{t}{D}}. \end{aligned} \quad (22)$$

Толщина стружки для срединного угла контакта

$$a_{cp} = s_z \sin \frac{\psi}{2} = s_z \sqrt{\frac{t}{D}}, \quad (23)$$

т. е. равна половине a_{\max} .

Толщина среза для фрезы с винтовым зубом подсчитывается по той же формуле, что и для прямозубой фрезы, а именно:

$$a = s_z \sin \varphi.$$

Однако эта толщина будет переменной как по дуге контакта, так и по длине активной части зуба. Это объясняется тем, что зуб прямозубой фрезы находится в контакте с заготовкой сразу по всей ее ширине и его положение в каждый данный момент определяется углом φ . В этом случае толщина среза является переменной только вдоль длины дуги контакта (фиг. 14, *a*). Зуб фрезы с винтовым зубом входит в заготовку постепенно.

Положение зуба в каждый данный момент определяется двумя углами — углом входа ψ_1 и углом выхода ψ_2 (фиг. 14, *б*).

Тогда толщина среза на входе

$$a_1 = s_z \sin \psi_1; \quad (24)$$

толщина среза на выходе

$$a_2 = s_z \sin \psi_2; \quad (25)$$

максимальная толщина среза

$$a_{\max} = s_z \sin \psi.$$

Ширина резания b измеряется вдоль режущей кромки и является длиной соприкосновения зуба фрезы с заготовкой.

Для цилиндрической прямозубой фрезы ширина резания равна ширине фрезерования $b = B$.

Для фрезы с винтовым зубом ширина резания для каждого зуба переменна.

На фиг. 14, *б* схематически изображены развернутыми на плоскость фреза и обрабатываемый материал. Одновременно работают три зуба.

Сечение стружки, снимаемой первым и вторым зубьями, приближенно представлено в виде треугольников, а третьего — в виде трапеции.

Первый зуб работает с шириной резания, равной отрезку $1-1'$, второй — отрезку $2-2'$ и третий — отрезку $3-3'$. Ширина резания может быть определена из треугольника klm (фиг. 14, *б*)

$$b = \frac{kl}{\sin \omega};$$

$$\overline{kl} = \overline{ol} - \overline{ok}; \quad \overline{ol} = \overline{AD} = \frac{D}{2} \psi_2; \quad \overline{ok} = \overline{AC} = \frac{D}{2} \psi_1,$$

тогда

$$b = \frac{D}{2 \sin \omega} (\psi_2 - \psi_1) \text{ мм}, \quad (26)$$

где ψ_2 — угол выхода для данного положения зуба;

ψ_1 — угол входа для данного положения зуба;

ω — угол наклона зуба фрезы;

D — диаметр фрезы.

Таким образом, ширина резания определяется мгновенными значениями углов входа и выхода каждого зуба фрезы.

Если зуб фрезы перекрывает всю ширину фрезерования, то

$$b = \frac{B}{\cos \omega} \text{ мм}, \quad (26a)$$

где B — ширина фрезерования в мм.

Площадь поперечного сечения среза, снимаемая одним зубом в данный момент, определяет собой величину

нагрузки на зуб фрезы и определяется как произведение толщины среза a на ширину резания b .

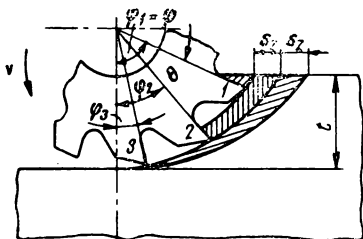
Для прямозубой фрезы

$$f = aB = Bs_z \sin \varphi \text{ мм}^2. \quad (27)$$

Если $\varphi = 0$, то $f = 0$, а при $\varphi = \psi$ $f_{\max} = Bs_z \sin \psi$.

Таким образом, площадь сечения среза является величиной переменной, изменяющейся от 0 до f_{\max} .

Суммарная площадь поперечного сечения среза определяется числом одновременно работающих зубьев и мгновенным углом контакта каждого зуба.



Фиг. 15. Суммарная площадь поперечного сечения среза.

В соответствии с фиг. 15 в работе одновременно находится три зуба (1—3).

Площадь сечения среза, снимаемая каждым зубом, будет

$$f_1 = Bs_z \sin \varphi_1,$$

$$f_2 = Bs_z \sin \varphi_2,$$

$$f_3 = Bs_z \sin \varphi_3,$$

где $\varphi_1 = \psi$; $\varphi_2 = \psi - \theta$; $\varphi_3 = \psi - 2\theta$.

Тогда суммарная площадь поперечного сечения среза, снимаемая прямозубой фрезой, будет

$$F = f_1 + f_2 + f_3 = Bs_z [\sin \varphi_1 + \sin \varphi_2 + \sin \varphi_3]$$

или

$$F = Bs_z \sum_1^m \sin \varphi \text{ мм}^2, \quad (28)$$

где B — ширина фрезерования в мм;

s_z — подача в мм/зуб;

$$\sum_1^m \sin \varphi = [\sin \varphi_1 + \sin \varphi_2 + \sin \varphi_3];$$

m — число одновременно работающих зубьев.

Площадь поперечного сечения среза, снимаемая одним зубом фрезы, с винтовыми зубьями, может быть определена следующим образом.

На фиг. 14, в из трех одновременно работающих зубьев наибольшее сечение среза снимает второй зуб,

который перекрывает всю ширину фрезерования и имеет угол входа $\psi_1^{I'} = 0$ и угол выхода $\psi_2^{II} = \psi$.

Площадь сечения среза в рассматриваемом случае будет равна площади треугольника

$$f = \frac{ab}{2} \text{ мм}^2, \quad (29)$$

где $a = s_z \sin \psi_2^{II}$;

$$b = \frac{D}{2 \sin \omega} (\psi_2^{II} - \psi_1^{II}).$$

Так как $\psi_1^{II} = 0$, то

$$f = \frac{s_z \sin \psi_2^{II}}{2} \cdot \frac{D \psi_2^{II}}{2 \sin \omega} = \frac{D s_z}{2 \sin \omega} \cdot \frac{\sin \psi_2^{II} \cdot \psi_2^{II}}{2}; \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \sin \psi_2^{II} &= \sqrt{1 - \cos^2 \psi_2^{II}} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{2t}{D}\right)^2} = \\ &= 2 \sqrt{\frac{t}{D} - \frac{t^2}{D^2}}, \end{aligned} \quad (31)$$

где значение для $\cos \psi_2^{II}$ взято из выражения (14).

Для приближенных расчетов отношением $\frac{t^2}{D^2}$ можно пренебречь.

Тогда

$$\sin \psi_2^{II} \approx 2 \sqrt{\frac{t}{D}}. \quad (32)$$

Принимая для ψ_2^{II} значение из выражения (16), можем написать

$$\sin \psi_2^{II} \psi_2^{II} = \frac{4t}{D}.$$

Глубину резания t можно выразить через радиус фрезы и углы входа и выхода зуба $t = OA - OE$ (фиг. 14, в),

или

$$t = \frac{D}{2} \cos \psi_1^{II} - \frac{D}{2} \cos \psi_2^{II} = \frac{D}{2} (\cos \psi_1^{II} - \cos \psi_2^{II}).$$

Тогда

$$\begin{aligned}\sin \psi_2^{\text{II}} \cdot \psi_2^{\text{II}} &= \frac{4D}{D \cdot 2} (\cos \psi_1^{\text{II}} - \cos \psi_2^{\text{II}}) = \\ &= 2 (\cos \psi_1^{\text{II}} - \cos \psi_2^{\text{II}}).\end{aligned}\quad (32a)$$

Подставляя выражение (32a) в выражение¹ (30), окончательно будем иметь

$$f = \frac{Ds_z}{2\sin \omega} (\cos \psi_1^{\text{II}} - \cos \psi_2^{\text{II}}).\quad (33)$$

Суммарная площадь поперечного сечения среза, снимаемая зубьями, одновременно находящимися в работе, в общем виде будет

$$F = \frac{Ds_z}{2\sin \omega} \sum_1^m (\cos \psi_1 - \cos \psi_2) \text{ мм}^2,\quad (34)$$

где m — число одновременно работающих зубьев.

6. РАВНОМЕРНОСТЬ ФРЕЗЕРОВАНИЯ

Выше было установлено, что площадь поперечного сечения среза, снимаемого одним зубом прямозубой фрезы, есть величина переменная, изменяющаяся от 0 при врезании зуба до f_{\max} в момент выхода зуба из контакта с заготовкой. Вследствие изменения поперечного сечения среза будет изменяться также и сила, действующая на зуб фрезы. При работе прямозубой фрезой с одним зубом с увеличением угла контакта фрезы с заготовкой сила, действующая на зуб фрезы, постепенно возрастает, достигает максимума и резко падает после выхода зуба из контакта с заготовкой; затем процесс повторяется сначала. Если фреза совершает, например, 200 об/мин, а угол контакта равен 1/10 окружности, то время работы зуба равно

$$\frac{1}{200} \cdot \frac{1}{10} = \frac{1}{2000} \text{ мин} = 0,03 \text{ сек.}$$

Таким образом, в данном случае колебание силы резания будет происходить через каждые 0,03 сек. Резкое

изменение силы резания, повторяющееся через малые промежутки времени, создает беспокойную, или неравномерную, работу станка и является характерной особенностью работы прямозубой фрезы с одним зубом.

Если в работе будет находиться одновременно два зуба, то сила резания будет равна сумме сил, действующих на каждый зуб, а колебание силы резания будет меньше, чем при работе фрезой с одним зубом, т. е. работа будет происходить более спокойно. Это объясняется тем, что при выходе одного в контакте с заготовкой будет находиться второй зуб и уменьшение силы резания будет не столь резким.

В общем случае чем больше зубьев будет находиться одновременно в работе, тем меньше будет колебание силы резания, тем более спокойной, или равномерной, будет работа станка. Так как при работе прямозубой цилиндрической фрезой число одновременно работающих зубьев не может увеличиваться беспредельно, то колебание силы резания всегда будет иметь место и работа фрезы будет неравномерной.

Практически считается, что фрезерование будет происходить более или менее равномерно, если в работе будет находиться не менее двух зубьев.

Равномерное фрезерование, при котором работа протекает более спокойно, может быть получено при определенных условиях, когда резание осуществляется фрезой с винтовыми зубьями.

В этом случае каждый зуб фрезы врезается в заготовку не сразу по всей длине, а постепенно, после чего постепенно выходит из нее.

Площадь поперечного сечения среза изменяется менее резко, следствием чего является менее резкое изменение сил, а следовательно, и более спокойные условия работы.

При работе фрезой с винтовыми зубьями вследствие переменности толщины среза вдоль длины зуба путем выбора соответствующих условий, можно получить постоянное суммарное сечение среза на всех работающих зубьях, несмотря на то, что сечение среза на каждом из этих зубьев будет переменным. При этом условия окружная сила и момент также будут постоянны и фреза будет работать равномерно.

Для осуществления этого условия необходимо, чтобы ширина фрезерования была кратна осевому шагу фрезы, т. е. должно иметь место равенство

$$\frac{B}{t_{oc}} = k, \quad (35)$$

где B — ширина фрезерования в мм;

t_{oc} — осевой шаг зубьев фрезы. Это расстояние между двумя соседними зубьями (в мм), измеренное вдоль оси (фиг. 14, в);

k — целое число 1, 2, 3 и т. д.

Рассмотрим случай, когда $k = 2$ (фиг. 14, в).

В этом случае, как следует из фиг. 14, в работе одновременно участвуют 3 зуба.

Вследствие поставленного условия кратности ширины фрезерования осевому шагу угол выхода ψ_2^I первого зуба лежит на одной вертикали с углом входа ψ_1^{III} третьего зуба, т. е. имеет место равенство $\psi_2 = \psi_1^{III}$

Если приложить площадь сечения среза, снимаемого первым зубом, к площади, снимаемой третьим зубом (на фиг. 14, в показано пунктиром), то получим два одинаковых, наибольших при данных условиях сечения среза.

Указанное условие сохраняется неизменным для любого мгновенного положения зубьев фрезы.

Таким образом, если ширина фрезерования кратна осевому шагу, то в любой момент фрезерования сечение среза будет постоянным, вследствие чего окружная сила и момент также будут постоянны и фреза будет работать равномерно.

Постоянство сечения среза в любой момент фрезерования можно получить также из выражения (34) для суммарной площади поперечного сечения среза

$$F = \frac{Ds_z}{2\sin \omega} = \sum_1^m (\cos \psi_1 - \cos \psi_2).$$

В соответствии с фиг. 14, в углы входа ψ_1 и выхода ψ_2 зубьев имеют значения:

для первого зуба

$$\psi_1^I = 0, \quad \psi_2^I;$$

для второго зуба

$$\psi_1^{\text{II}} = 0, \psi_2^{\text{II}};$$

для третьего зуба

$$\psi_1^{\text{III}}, \psi_2^{\text{III}}$$

Необходимо также иметь в виду, что

$$\psi_2^{\text{I}} = \psi_1^{\text{III}} \text{ и } \psi_2^{\text{II}} = \psi_2^{\text{III}} = \psi.$$

Тогда разность $\cos \psi_1 - \cos \psi_2$ для каждого зуба будет:
для первого зуба

$$\cos 0 - \cos \psi_2^{\text{I}} = 1 - \cos \psi_2^{\text{I}};$$

для второго зуба

$$\cos 0 - \cos \psi_2^{\text{II}} = 1 - \cos \psi_2^{\text{II}};$$

для третьего зуба

$$\cos \psi_1^{\text{III}} - \cos \psi_2^{\text{III}}$$

Подставляя эти значения косинусов в формулу (34) и преобразовывая их, получим

$$F = \frac{Ds_z}{2 \sin \omega} [2(1 - \cos \psi)],$$

т. е. фреза снимает два одинаковых сечения среза.

Условие равномерности фрезерования (35) можно представить следующим образом

$$\frac{B}{t_{oc}} = k.$$

Зависимость между осевым шагом t_{oc} и торцовым t_{ok} определяется из треугольника $I' - I'' - 2'$ (фиг. 14, в)

$$t_{oc} = t_{ok} \operatorname{ctg} \omega. \quad (36)$$

Если диаметр фрезы D , а число ее зубьев z , то

$$t_{ок} = \frac{\pi D}{z}, \quad (37)$$

а

$$t_{oc} = \frac{\pi D}{z} \operatorname{ctg} \omega. \quad (38)$$

Подставляя (38) в (35) будем иметь

$$\frac{Bz}{\pi D \operatorname{ctg} \omega} = k. \quad (39)$$

Формула (39) позволяет определить, исходя из условий равномерности фрезерования, диаметр фрезы, число зубьев и угол их наклона.

Величину k рекомендуется выбирать равной 2—3. С увеличением k увеличиваются число одновременно работающих зубьев и действующие при резании силы. Число одновременно работающих зубьев m_c при работе фрезой с винтовыми зубьями является суммой числа зубьев, помещающихся в дуге контакта, и числа зубьев, помещающихся вдоль оси фрезы, т. е.

$$m_c = m + k$$

или

$$m_c = \frac{\psi z}{360} + \frac{Bz}{\pi D \operatorname{ctg} \omega}. \quad (40)$$

Число одновременно работающих зубьев k , удаляющих одинаковое наибольшее, возможное в данных условиях сечение среза, подсчитывается по формуле (39).

7. ФРЕЗЕРОВАНИЕ ПРОТИВ ПОДАЧИ И ПО ПОДАЧЕ

Фрезерование цилиндрическими концевыми, дисковыми и фасонными фрезами может быть выполнено двумя путями:

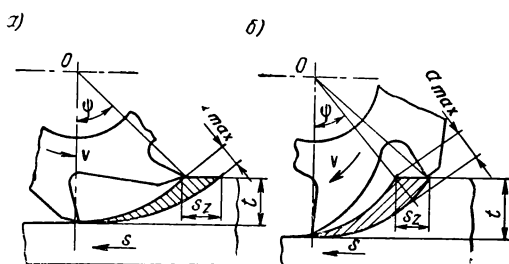
1) направление движения подачи направлено против вращения фрезы (фиг. 16, а);

2) направление движения подачи совпадает с направлением вращения фрезы (фиг. 16, б).

Первый способ фрезерования носит название фрезерования против подачи, или *встречного фрезерования*; второй — фрезерования по подаче, или *попутного фрезерования*.

При встречном фрезеровании сечение среза и нагрузка на зуб увеличиваются постепенно, от нуля при врезании зуба до максимума при выходе зуба из контакта с заготовкой. Сила, действующая на заготовку, стремится оторвать ее от стола, что при больших нагрузках может вызвать дрожание и ухудшение условий работы.

При попутном фрезеровании зуб фрезы начинает работу с наибольшей толщины среза, которая в конце



Фиг. 16. Схема фрезерования: а — встречного; б — попутного.

работы уменьшается до нуля. При таком методе фреза в начальный момент испытывает максимальную нагрузку, а заготовка в процессе работы прижимается к столу станка.

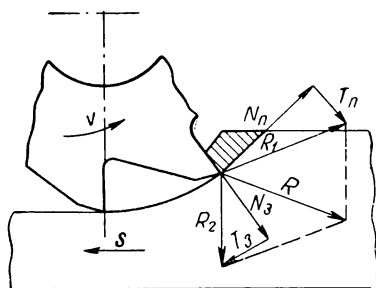
В настоящее время наиболее распространено встречное фрезерование.

Попутное фрезерование не рекомендуется применять при обработке заготовок с коркой, так как при врезании зуба в твердую корку происходит интенсивный его износ и преждевременный выход фрезы из строя. Опыты показывают, что при обработке заготовок без корки попутное фрезерование имеет преимущества перед встречным фрезерованием. Эти преимущества состоят в том, что при одинаковых условиях работы увеличивается время работы фрезы до затупления, улучшается чистота обрабатываемой поверхности и уменьшается мощность, затрачиваемая на резание.

Необходимо иметь в виду, что при работе методом попутной подачи станок должен быть в хорошем состоянии и иметь устройство для устранения зазора (люфта) в винтовой паре стола фрезерного станка.

8. СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ФРЕЗУ И МОЩНОСТЬ

В процессе работы контакт зуба фрезы с заготовкой осуществляется по передней грани через срезаемый слой металла и по задней грани через поверхность резания. Из механики известно, что если два тела вступили в соприкосновение и находятся под нагрузкой, то на поверхностях контакта этих тел появляются: *нормальные силы*, действующие в направлении, перпендикулярном к поверхности, и *силы трения*, направленные по касательной к поверхности соприкосновения. Таким образом, при работе прямозубой цилиндрической фрезы на



Фиг. 17. Силы, действующие на зуб цилиндрической прямозубой фрезы.

переднюю грань зуба действуют: нормальная сила N_n и сила трения стружки о переднюю грань T_n и на заднюю грань нормальная сила N_3 и сила трения T_3 между задней гранью и поверхностью резания (фиг. 17).

Равнодействующая R указанных сил представляет собой силу резания на зубе фрезы.

Сила резания R не остается постоянной на протяжении дуги контакта зуба фрезы с заготовкой ни по величине, ни по направлению.

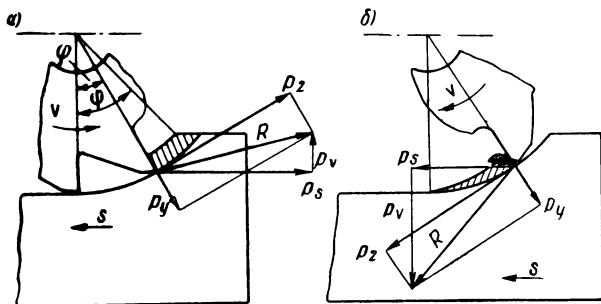
Как следует из изложенного выше, при вращении фрезы происходит непрерывное изменение сечения среза от нуля до максимума, вследствие чего будет непрерывно меняться и сила резания.

Кроме того, вследствие вращении фрезы направление силы R будет также непрерывно изменяться по отношению к постоянным направлениям, характерным для

фрезерного станка, например по отношению к плоскости стола станка.

Силу резания R можно разложить на следующие составляющие: касательную (окружную) P_z и радиальную P_v или горизонтальную P_s и вертикальную P_v (фиг. 18).

По величине окружной силы P_z рассчитывается механизм главного движения станка и величина мощности, расходуемая на резание. Радиальная сила P_v вызывает деформацию частей станка и производит изгиб фрезерной оправки.



Фиг. 18. Разложение сил, действующих на зуб цилиндрической прямозубой фрезы: а — встречное фрезерование; б — попутное фрезерование.

По величине горизонтальной силы P_s , которая носит название также силы подачи, рассчитываются механизм подачи станка и зажимные детали приспособления.

Вертикальная сила P_v отжимает фрезу от обрабатываемой заготовки. Из всех значений равнодействующей и ее составляющих, которые они принимают на протяжении дуги контакта, наибольший интерес представляют максимальные значения окружной силы $P_{z_{max}}$, силы подачи $P_{s_{max}}$ и вертикальной силы $P_{v_{max}}$, которые необходимо знать при расчете деталей станка на прочность, и среднее значение окружной силы $P_{z_{cp}}$, используемое при определении мощности, расходуемой на резание.

Зубья фрезы по своей форме и характеру работы аналогичны токарным резцам.

Поэтому для расчета окружной силы при фрезеровании можно воспользоваться выражением силы резания при точении, а именно

$$P = C'_p b a^x \text{ кг}, \quad (41)$$

где P — сила резания при точении в кг ;
 C'_p — постоянный коэффициент, зависящий от обрабатываемого материала и условий обработки;
 b — ширина среза в мм ;
 a — толщина среза в мм ;
 x — показатель степени.

Тогда по аналогии окружная сила при фрезеровании прямозубой фрезой будет

$$P_z = C_p b a^x = C_p B s_z^x \sin^x \varphi \text{ кг}, \quad (42)$$

где C_p — коэффициент, зависящий от качества обрабатываемого материала, переднего угла и других условий обработки;
 b — ширина среза, равная для прямозубой фрезы ширине фрезерования, т. е. $b = B$;
 B — ширина фрезерования в мм ;
 $a = s_z \sin \varphi$ — толщина стружки в мм ;
 s_z — подача в мм/зуб ;
 φ — мгновенный угол контакта в град ;
 x — показатель степени, зависящий от обрабатываемого материала и других условий обработки (для фрез $x = 0,6 - 0,8$).

Максимальное значение окружная сила будет иметь в момент выхода зуба из обрабатываемого материала

$$P_{z_{\max}} = C_p B s_z^x \sin^x \psi, \quad (43)$$

где ψ — угол контакта фрезы с заготовкой в град .

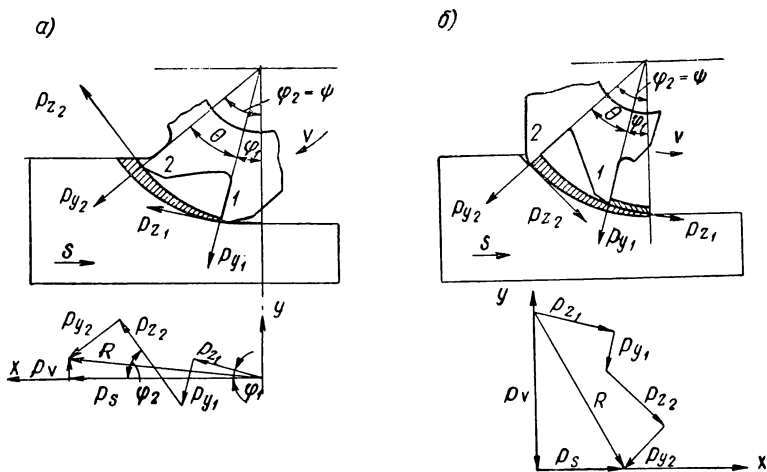
Если в работе одновременно находится несколько зубьев, например два (1—2), как на фиг. 19, то суммарная окружная сила будет

$$P_{z_{\text{сум}}} = P_{z_1} + P_{z_2} = C_p B s_z^x (\sin^x \varphi_1 + \sin^x \varphi_2)$$

или

$$P_{z_{\text{сум}}} = C_p B s_z^x \sum_1^m \sin^x \varphi. \quad (44)$$

Приведенное выражение для $P_{z_{cy,м}}$ будет соответствовать также максимальному значению окружной суммарной силы $P_{z_{max\ сум}}$, так как оно соответствует моменту выхода очередного зуба из обрабатываемого материала (зуб. 2 на фиг. 19, а).



Фиг. 19. Силы, действующие на цилиндрическую фрезу при одновременной работе нескольких зубов: а — встречное фрезерование; б — попутное фрезерование.

Окружная сила P_z создает момент сопротивления резанию и изгибает оправку

$$M = \frac{P_z D}{2}, \quad (45)$$

где M — крутящий момент в $\text{кг} \cdot \text{мм}$;

D — диаметр фрезы в мм .

Максимальное значение крутящего момента будет

$$M_{\max} = \frac{P_{z_{\max\ сум}} D}{2} = C_p B S_z^x \frac{D}{2} \sum_1^m \sin^x \varphi. \quad (46)$$

Для определения значений силы подачи P_s и вертикальной силы P_v при встречном фрезеровании спроектируем все силы (фиг. 19, а) на горизонтальную X и вертикальную Y оси [8].

Тогда сила подачи будет

$$P_s = P_{z_1} \cos \varphi_1 + P_{z_2} \cos \varphi_2 + P_{y_1} \sin \varphi_1 + P_{y_2} \sin \varphi_2.$$

Наибольшее значение сила подачи будет иметь в момент выхода очередного зуба из обрабатываемого материала, тогда

$$P_{s_{\max}} = \sum_1^m P_z \cos \varphi + \sum_1^m P_y \sin \varphi.$$

Опытами установлено, что с достаточной степенью точности

$$P_y = (0,3 \div 0,35) P_z.$$

Принимая $P_y = 0,35 P_z$, будем иметь

$$P_{s_{\max}} = C_p B s_z^x \left[\sum_1^m \sin^x \varphi \cos \varphi + 0,35 \sum_1^m \sin^{x+1} \varphi \right]. \quad (47)$$

Обозначая

$$\sum_1^m \sin^x \varphi \cos \varphi = q, \quad (48)$$

$$\sum_1^m \sin^{x+1} \varphi = p, \quad (49)$$

будем иметь

$$P_{s_{\max}} = C_p B s_z^x (q + 0,35p) \text{ кг}. \quad (50)$$

Вертикальная сила P_v определится из следующего выражения

$$P_v = P_{z_1} \sin \varphi_1 + P_{z_2} \sin \varphi_2 - P_{y_1} \cos \varphi_1 - P_{y_2} \cos \varphi_2.$$

Значение P_v , соответствующее выходу очередного зуба из обрабатываемого материала, будет

$$P_{v_{\varphi_2}} = \sum_1^m P_z \sin \varphi - \sum_1^m P_y \cos \varphi,$$

или

$$P_{v\varphi_2} = C_p B s_z^x \left[\sum_1^m \sin^{x+1} \varphi - 0,35 \sum_1^m \sin^x \varphi \cos \varphi \right]. \quad (51)$$

При принятых ранее обозначениях будем иметь

$$P_{v\varphi_2} = C_p B s_z^x (p - 0,35q) \kappa \Gamma. \quad (52)$$

Из последней формулы для $P_{v\varphi_2}$ следует, что, если

$$p > 0,35q,$$

то вертикальная сила будет стремиться оторвать изделие от стола станка, а при

$$p < 0,35q$$

она будет стремиться прижать изделие к столу станка. Если считать, что в контакте с изделием находится один зуб, то отрыв изделия от стола будет происходить при условии

$$p > 0,35q$$

или

$$\sum_1^m \sin^{x+1} \varphi > 0,35 \sum_1^m \sin^x \varphi \cos \varphi,$$

Для случая работы одного зуба будем иметь

$$\sin^{x+1} \varphi > 0,35 \sin^x \varphi \cos \varphi$$

или

$$\begin{aligned} \sin \varphi &> 0,35 \cos \varphi, \\ \operatorname{tg} \varphi &> 0,35 \text{ и } \varphi > 19^\circ 30' \end{aligned}$$

Пользуясь формулой (17), где $\varphi = 115 \sqrt{\frac{t}{D}}$ можно установить при каком отношении $\frac{t}{D}$ фреза будет стремиться отрывать изделие

$$115 \sqrt{\frac{t}{D}} \geq 19^\circ,5 \text{ и } \frac{t}{D} \geq 0,03.$$

Из приведенного соотношения следует, что при работе фрезой с одним зубом фреза будет стремиться отрываться изделие от стола при $\frac{t}{D} \geq 0,03$.

Расчеты показывают, что если в работе находится одновременно два зуба, то отрыв изделия будет происходить при $\frac{t}{D} \geq 0,045$.

Таким образом, при встречном фрезеровании и $\frac{t}{D} > 0,03-0,05$ фреза будет стремиться оторвать изделие от стола, что будет способствовать возникновению вибраций.

При попутном фрезеровании (фиг. 19, б) направление сил изменяется по сравнению с встречным фрезерованием. Сила подачи $P_{s\varphi_2}$, соответствующая углу контакта φ_2 , имеет значение

$$P_{s\varphi_2} = C_p B s_z^x \left[\sum_1^m \sin^x \varphi \cos \varphi - 0,35 \sum_1^m \sin^{x+1} \varphi \right]$$

или

$$P_{s\varphi_2} = C_p B s_z^x (q - 0,35p) \text{ кг.} \quad (53)$$

Вертикальная сила имеет в этом случае максимальное значение

$$P_{v_{\max}} = C_p B s_z^x \left[\sum_1^m \sin^{x+1} \varphi + 0,35 \sum_1^m \sin^x \varphi \cos \varphi \right]$$

или

$$P_{v_{\max}} = C_p B s_z^x (p + 0,35q) \text{ кг.} \quad (54)$$

Как следует из формулы, вертикальная составляющая силы направлена в одну сторону таким образом, что фреза всегда прижимает изделие к столу станка. При обычных условиях работы сила подачи P_s также действует в одну сторону.

Таким образом, если при встречном фрезеровании вертикальная сила меняет свое направление, то при по-

путном фрезеровании силы P_s и P_v имеют постоянное направление.

Равнодействующая сил $P_{s_{\max}}$ и $P_{v_{\varphi_2}}$ имеет значение

$$R = \sqrt{P_{s_{\max}}^2 + P_{v_{\varphi_2}}^2} \quad (55)$$

Наибольшая мощность, затрачиваемая на процесс фрезерования, равна

$$N_{\max} = \frac{P_{z_{\max_{\text{сум}}}} v}{60 \cdot 102} \text{ кВт}, \quad (56)$$

где v — скорость резания в м/мин;
или, используя формулу (44), получаем

$$N_{\max} = C_p B \frac{s_z^x v}{60 \cdot 102} \sum_1^m \sin^x \varphi. \quad (57)$$

Средняя окружная сила $P_{z_{cp}}$ для прямозубой фрезы при числе одновременно работающих зубьев m может быть определена следующим образом

$$P_{z_{cp}} = C_p b_0 a_{cp}^x \text{ кг},$$

где b_0 — ширина среза, снимаемая всеми одновременно работающими зубьями, в мм;

a_{cp} — срединное значение толщины стружки в мм;

$$b_0 = mB = \frac{z}{\pi} \sqrt{\frac{t}{D}} \cdot B; \quad a_{cp} = s_z \sqrt{\frac{t}{D}},$$

где m взято по формуле (18а), а a_{cp} — по формуле (23).
Тогда

$$\begin{aligned} P_{z_{cp}} &= \frac{C_p}{\pi} Bz \sqrt{\frac{t}{D}} \left(s_z \sqrt{\frac{t}{D}} \right)^x = \frac{C_p}{\pi} B s_z^x z \left(\frac{t}{D} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{t}{D} \right)^{\frac{x}{2}} = \\ &= \frac{C_p}{\pi} B s_z^x z \frac{t^{\frac{1+x}{2}}}{D^{\frac{1+x}{2}}}. \end{aligned} \quad (58)$$

Принимая для стали $x = 0,72$, получим

$$P_{z_{cp}} = \frac{C_p}{\pi} B z s_z^{0,72} t^{0,86} D^{-0,86} \text{ кг}. \quad (59)$$

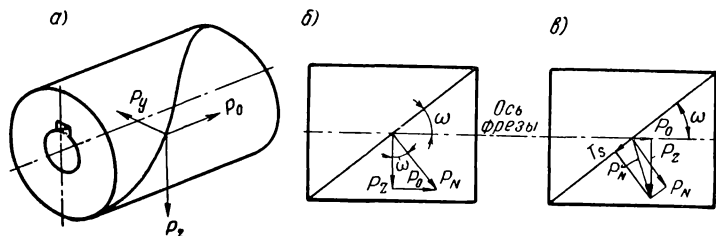
Средняя эффективная мощность может быть подсчитана по следующему выражению

$$N_e = \frac{P_{zcp} v}{102 \cdot 60} \text{ кВт}, \quad (60)$$

где $v = \frac{\pi D n}{1000}$ — скорость резания в м/мин;

D — диаметр фрезы в мм;

n — число оборотов в мин.



Фиг. 20. Силы, действующие на цилиндрическую фрезу с винтовым зубом.

Подставляя в формулу (60) P_{zcp} из формулы (58) и значение v , получим

$$N_e = \frac{C_p}{1000 \cdot 102 \cdot 60} B z s_z^x t^{\frac{1+x}{2}} D^{\frac{1-x}{2}} n \text{ кВт} \quad (61)$$

или при $x = 0,72$

$$N_e = C_N 10^{-5} B z s_z^{0,72} t^{0,86} D^{0,14} n \text{ кВт}, \quad (62)$$

где $\frac{C_p}{1000 \cdot 102 \cdot 60} = C_N 10^{-5}$.

На фрезу с винтовым зубом кроме рассматриваемых сил P_z , P_y , P_s и P_v будет действовать еще сила P_o (фиг. 20, а). Сила P_o возникает вследствие наличия винтового зуба и имеет направление, связанное с направлением винтовой линии зуба фрезы.

В самом деле, сила, действующая перпендикулярно винтовой линии зуба P_N (фиг. 20, б), может быть разложена на две составляющие — тангенциальную P_z , действующую в сечении, перпендикулярном к оси фрезы, по

касательной к окружности и осевую P_o , действующую параллельно оси. Из фиг. 20, б следует, что

$$P_z = P_N \cos \omega, \quad (63)$$

$$P_o = P_N \sin \omega = P_z \operatorname{tg} \omega. \quad (64)$$

Средняя окружная сила, действующая на фрезу с винтовым зубом, для случая равномерного фрезерования может быть определена так же, как и для фрезы с прямым зубом.

Сила сопротивления резанию

$$P_N = C_p b'_o a_{cp}^x \text{ кг.}$$

Для фрезы с винтовыми зубцами

$$b'_o = kb,$$

где k — число одновременно работающих зубьев;
 b — ширина резания в мм.

Принимая b по формуле (26а), а k по формуле (39), получим

$$b'_o = \frac{Bz}{\pi D} \operatorname{tg} \omega \frac{B}{\cos \omega} = \frac{B \operatorname{tg} \omega}{\pi D} \cdot \frac{Bz}{\cos \omega}.$$

Величина $B \operatorname{tg} \omega$ является длиной дуги угла контакта ψ , тогда

$$\frac{B}{\pi D} \operatorname{tg} \omega = \frac{\psi}{360} = \frac{2 \sqrt{\frac{t}{D}}}{2\pi} = \frac{\sqrt{\frac{t}{D}}}{\pi},$$

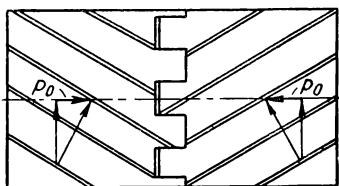
где ψ взято по формуле (16).

Принимая a_{cp} по формуле (23) и используя формулу (63), получим для P_{zcp} следующее значение

$$\begin{aligned} P_{zcp} &= C_p \frac{\sqrt{\frac{t}{D}}}{\pi} \cdot \frac{Bz}{\cos \omega} \left(s_z \sqrt{\frac{t}{D}} \right)^x \cos \omega = \\ &= \frac{C_p}{\pi} Bz s_z^x \frac{t^{\frac{1+x}{2}}}{D^{\frac{1+x}{2}}} \text{ кг} \end{aligned} \quad (65)$$

В результате получили такое же выражение, как и для величины средней окружной силы при работе фрезой с прямыми зубьями. Полученное выражение свидетельствует также о том, что средняя окружная сила и средняя мощность для фрез с прямыми и винтовыми зубьями имеют одно и то же значение. Это значит, что угол спирали не оказывает влияния на среднюю мощность фрезерования.

Что касается осевой составляющей, то, как показывают исследования проф. А. М. Розенберга, фактическая величина ее оказывается



Фиг. 21. Набор фрез с различным направлением винтовой канавки.

меньше расчетной, определяемой по формуле (64). Это объясняется действием силы трения T_s (фиг. 20, в), уменьшающей осевую силу P_o .

По этой причине проф. Розенберг А. М. рекомендует определять осевую силу по формуле

$$P_o = 0,28 P_2 \operatorname{tg} \omega. \quad (66)$$

При установке на станке фрез с винтовым зубом следует принимать такое направление вращения фрезы, чтобы осевая сила действовала на шпиндель и воспринималась бы упорным подшипником.

Для уничтожения действия осевой силы P_o работают двумя спаренными фрезами (фиг. 21) с разными направлениями винтовых зубьев.

В тех случаях, когда в наборе работает нечетное число фрез, суммарная осевая сила должна быть направлена на шпиндель.

Для практических расчетов силы и мощности пользуются обычно экспериментальными формулами, полученными опытным путем и приведенными в табл. 10 для фрез из быстрорежущей стали Р18 [10] и в табл. 11 для фрез с пластинками твердых сплавов [4]. Окружные сила и мощность даны с учетом нормального затупления фрез в табл. 12.

Поправочный коэффициент k_{M_N} на мощность для фрез из быстрорежущей стали Р18 учитывает обработку

Таблица 10

Формулы для определения средней окружной силы P_z и средней эффективной мощности N_e при работе фрезами из быстрорежущей стали P18

Обрабатываемый материал		Тип фрезы	Формулы и значения коэффициентов				
			P_z в кг	C_p	N_e в квт	C_N	k_{M_N}
Сталь	$\sigma_B = 75 \text{ кг/мм}^2$	Цилиндрическая, концевая, дисковая, прорезная, отрезная	$P_z = C_p D^{-0,86} t^{0,86} s_z^{0,72} Bz$	68,2	$N_e = C_N 10^{-5} D^{0,14} t^{0,86} s_z^{0,72} Bz k_{M_N}$	3,5	$\left(\frac{\sigma'_B}{75}\right)^{0,3}$
Чугун ковкий	HB 150			30		1,54	$\left(\frac{HB'}{190}\right)^{0,55}$
Бронза БрАЖ9-4	HB 100-140			22,5		1,16	—
Чугун серый	HB 150			30		1,54	$\left(\frac{HB'}{190}\right)^{0,55}$

Примечание. σ'_B — предел прочности при растяжении обрабатываемого материала; HB' — твердость по Бринелю обрабатываемого материала (для конкретного случая).

Формулы для определения средней эффективной мощности N_e при работе фрезами с пластинками твердых сплавов

Обрабатываемый материал	Тип фрезы	N_e в кВт		
Сталь $\sigma_s = 75 \text{ кг/мм}^2$	Цилиндрическая	$N_e = 5,2 \cdot 10^{-5} D^{0,13} t^{0,88} s_z^{0,75} B z n k_N$		
	Концевая	$N_e = 0,64 \cdot 10^{-5} D^{0,27} t^{0,85} s_z^{0,75} B z n^{1,13} k_N$		
	Дисковая при фрезеровании: пазов плоскостей и уступов	$N_e = 13,4 \cdot 10^{-5} D^{-0,1} t^{0,9} s_z^{0,8} B^{1,1} z n^{0,9} k_N$ $N_e = 14,4 \cdot 10^{-5} D^{-0,1} t^{0,8} s_z^{0,7} B^{0,85} z n k_N$		
Чугун серый $HB 190$	Цилиндрическая	$N_e = 2,97 \cdot 10^{-5} \times D^{0,1} t^{0,9} s_z^{0,8} B z n k_N$		
Поправочные коэффициенты на мощность для измененных условий работы в зависимости от				
1. Обрабатываемого материала	Обрабатываемый материал	Сталь	Чугун серый	Чугун ковкий
	Коэффициент k_{MN}	$k_{MN} = \left(\frac{\sigma'_s}{75} \right)^{0,3}$	$k_{MN} = \frac{HB'}{190}$	$k_{MN} = \frac{HB'}{150}$
2. Переднего угла для стали	Передний угол γ в град	-10	0	+10
	Коэффициент k_{YN}	1,0	0,89	0,79
<p>Примечание. σ'_s — предел прочности при растяжении обрабатываемого материала; HB' — твердость обрабатываемого материала по Бринелю (для конкретного случая).</p>				

Таблица 12

Величины допустимого износа режущей части инструмента

Тип фрезы		Обрабатываемый материал	Марка материала режущей части инструмента	Характер обработки	Величина допустимого износа по задней грани h_3 в мм	
Торцовая		Сталь	T5K10	Черновая и чистовая	1—1,2	
			T15K6			
			ВК8 ¹⁾	Черновая и чистовая	0,8—1,0	
		Чугун	ВК8, ВК6	P18	Черновая	1,5—2,0 ²⁾
					Чистовая	0,3—0,5
Дисковая		Сталь	T15K6	Черновая и чистовая	1,0—1,2	
			P18	Черновая	0,4—0,6	
				Чистовая	0,15—0,25	
		Чугун	P18	Черновая	0,4—0,6	
				Чистовая	0,15—0,25	
Цилиндрическая	Сталь	T15K6	Черновая и чистовая	0,5—0,6		
			P18	Черновая	0,4—0,6	
				Чистовая	0,15—0,25	
	Чугун	ВК8, ВК6	Черновая и чистовая	0,7—0,8		
			P18	Черновая	0,5—0,8	
				Чистовая	0,2—0,3	
		Концевая	с коронками	Сталь	T15K6	Черновая и чистовая
с напаянными пластинками			0,3—0,5			
по ГОСТ 8237—57	P18		Черновая и чистовая			0,3—0,5
Прорезная и отрезная		Сталь и чугун	P18	—	0,15—0,2 ³⁾	
Фасонная	незатылованная	Сталь	P18	Черновая	0,6—0,7	
				Чистовая	0,2—0,3	
				Черновая	0,3—0,4	
				Чистовая	0,2	
	затылованная					

¹⁾ При обработке жаропрочных сталей.

²⁾ При обработке жаропрочных сталей величина допустимого износа по задней грани $h_3 = 0,6—0,7$ мм.

³⁾ Износ по задним граням уголков.

материалов с другими механическими характеристиками по сравнению с указанными в табл. 10.

Поправочный коэффициент k_N на мощность для фрез с пластинками твердых сплавов учитывает как обработку материалов с другими механическими характеристиками k_{mN} , так и обработку стали с различными передними углами $k_{\gamma N}$.

$$k_N = k_{mN} k_{\gamma N}.$$

Если известна мощность, затрачиваемая на резание, то можно определить мощность электродвигателя станка

$$N_m = \frac{N_e}{\eta} \text{ кВт}, \quad (67)$$

где η — к. п. д. станка.

С учетом мощности, затрачиваемой на движение подачи и не превышающей обычно 15% мощности, затрачиваемой на резание, мощность электродвигателя будет

$$N_m = \frac{1,15 N_e}{\eta} \text{ кВт}. \quad (68)$$

Силы P_s и P_v могут быть определены по следующим зависимостям:

$$\left. \begin{aligned} P_s &= (1 \div 1,2) P_z \\ P_v &= (0,2 \div 0,3) P_z \end{aligned} \right\} \text{ при встречном цилиндрическом фрезеровании;} \\ \left. \begin{aligned} P_s &= (0,8 \div 0,9) P_z \\ P_v &= (0,75 \div 0,8) P_z \end{aligned} \right\} \text{ при попутном цилиндрическом фрезеровании.}$$

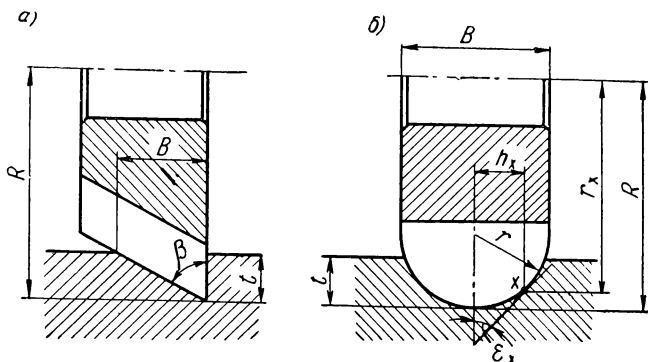
Следует отметить, что величины, входящие в формулу силы резания (59), оказывают различное влияние на величину силы. Наибольшее влияние на силу резания оказывают ширина фрезерования B и глубина резания t . Влияние подачи s несколько меньше. С увеличением указанных величин сила резания повышается за счет увеличения суммарной площади поперечного сечения среза.

Аналогичным образом влияет и увеличение числа зубьев фрезы z .

С увеличением диаметра фрезы сила резания уменьшается. Это объясняется тем, что с увеличением D при прочих равных условиях уменьшаются угол контакта, толщина среза и число одновременно работающих зубьев, что приводит к уменьшению суммарной площади поперечного сечения среза и силы резания.

9. ФАСОННОЕ ФРЕЗЕРОВАНИЕ

Фасонное фрезерование производят фасонными фрезами, которые характеризуются тем, что имеют угловой (фиг. 22, а) или криволинейный (фиг. 22, б) профиль.



Фиг. 22. Фасонные фрезы: а — одноуголовая; б — радиусная выпуклая.

При работе такими фрезами толщина срезаемого слоя, измеряемая в плоскости, перпендикулярной к лезвию, определяется по формулам:

для фрез с угловым профилем

$$a_x = s_z \sin \psi_x \sin \beta \text{ мм}; \quad (69)$$

для фрез с криволинейным профилем

$$a_x = s_z \sin \psi_x \sin \epsilon_x \text{ мм}, \quad (70)$$

где ψ_x — мгновенный угол контакта в град;

β — угол профиля фрезы в град;

ϵ_x — угол профиля в рассматриваемой точке режущей кромки (в град) является переменным для каждой точки режущей кромки (фиг. 22, б).

Среднюю окружную силу и среднюю мощность при работе фасонными фрезами можно приближенно определить по аналогии с цилиндрическими прямозубыми фрезами.

Определим среднюю окружную силу и среднюю мощность при работе одноугловой фрезой без торцовых зубьев (фиг. 22, а).

Для этой цели, как и раньше, воспользуемся формулой силы резания при точении

$$P = C_p' b_l a^x \text{ кг.}$$

Для рассматриваемого случая

$$b_l = ml = \frac{z}{\pi} \sqrt{\frac{t}{D}} \cdot \frac{B}{\sin \beta},$$

где $l = \frac{B}{\sin \beta}$;

m — взято по формуле (18а).

Вместо a для фрезерования следует взять среднюю толщину стружки (23)

$$a_{cp} = s_z \sin \frac{\psi_x}{2} \sin \beta = s_z \sqrt{\frac{t}{D}} \sin \beta,$$

где $\sin \frac{\psi_x}{2} = \sqrt{\frac{t}{D}}$

Тогда средняя окружная сила при фрезеровании будет иметь значение

$$P_{zcp} = \frac{C_p}{\pi} z \left(\frac{t}{D}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{B}{\sin \beta} s_z^x \left(\frac{t}{D}\right)^{\frac{x}{2}} \sin^x \beta$$

или

$$P_{zcp} = \frac{C_p}{\pi} z \left(\frac{t}{D}\right)^{\frac{x+1}{2}} B s_z^x \sin^{x-1} \beta \text{ кг.} \quad (71)$$

Среднюю мощность можно определить по формуле

$$N_e = \frac{P_{zcp} v}{60 \cdot 10^2} = \frac{P_{zcp} \pi D n}{60 \cdot 1000 \cdot 10^2} \text{ квт}$$

или

$$N_e = \frac{C_p z B}{60 \cdot 1000 \cdot 10^2} \sin^{x-1} \beta s_z^x t^{\frac{x+1}{2}} D^{\frac{1-x}{2}} n \text{ квт.} \quad (72)$$

Принимая $x = 0,72$ и имея в виду, что $60 \cdot 1000 \cdot 102 = 61,2 \cdot 10^5$, и обозначив $\frac{C_p}{61,2} = C_N$, получим

$$N_e = C_N 10^{-5} D^{0,14} t^{0,86} s_z^{0,72} Bzn \sin^{-0,23} \beta \text{ квт.} \quad (73)$$

Для радиусной фасонной фрезы (фиг. 22, б) средняя окружная сила и средняя мощность могут быть определены следующим образом.

Сила резания при точении

$$P = C_p' b_x a^x \text{ кг}$$

Для рассматриваемого случая

$$b_x = ml = \frac{z}{\pi} \sqrt{\frac{t}{D}} \cdot 2r \alpha,$$

где $l = 2r\alpha$; $\sin \alpha = \frac{B}{2r}$;

m — взято по формуле (18 а);

$$a_{cp} = s_z \sin \frac{\psi_x}{2} \sin \epsilon_x = s_z \sqrt{\frac{t}{D}} \sin \epsilon_x.$$

Обозначим $\sin \epsilon_x = C_x$.

Тогда средняя окружная сила при фрезеровании будет

$$\begin{aligned} P_{zcp} &= \frac{2C_p'}{\pi} z \left(\frac{t}{D}\right)^{\frac{1}{2}} r \alpha s_z^x \left(\frac{t}{D}\right)^{\frac{x}{2}} C_x^x = \\ &= \frac{C_p'}{\pi} z \left(\frac{t}{D}\right)^{\frac{x+1}{2}} s_z^x \frac{B}{0,86} C_x^x, \end{aligned} \quad (74)$$

где

$$0,86 \alpha \approx \sin \alpha;$$

$$\alpha \approx \frac{\sin \alpha}{0,86};$$

$$B = 2r \sin \alpha;$$

$$2r\alpha \approx \frac{2r \sin \alpha}{0,86} \approx \frac{B}{0,86}.$$

Средняя мощность определяется по формуле

$$N_e = \frac{P_{zcp} v}{60 \cdot 102} = \frac{P_{zcp}}{60 \cdot 102} \frac{\pi D n}{1000} \text{ кВт}$$

или

$$N_e = \frac{C'_p}{0,86 \cdot 60 \cdot 102 \cdot 1000} \cdot z t^{\frac{x+1}{2}} D^{\frac{1-x}{2}} s_z^x B C_x^x n. \quad (75)$$

Принимая $x = 0,72$, обозначив $\frac{C'_p}{0,86 \cdot 60 \cdot 102} = C_N$ и имея в виду, что $60 \cdot 1000 \cdot 102 = 61,2 \cdot 10^5$, получим

$$N_e = C_N 10^{-5} D^{0,14} t^{0,86} s_z^{0,72} B z n C_x^{0,72}. \quad (76)$$

В нормативах [4] определение средней мощности, расходуемой на резание угловыми, а также фасонными полукруглыми, выпуклыми и вогнутыми фрезами, рекомендуется производить по следующей формуле

$$N_e = C_N 10^{-5} D^{0,14} t^{0,86} s_z^{0,72} B z n k_{M_N} \text{ кВт}, \quad (77)$$

где

для угловых фрез $C_N = 2,0$;

для радиусных фрез $C_N = 2,42$.

Коэффициент k_{M_N} подсчитывается по формулам, приведенным в табл. 10.

10. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СИЛ РЕЗАНИЯ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ

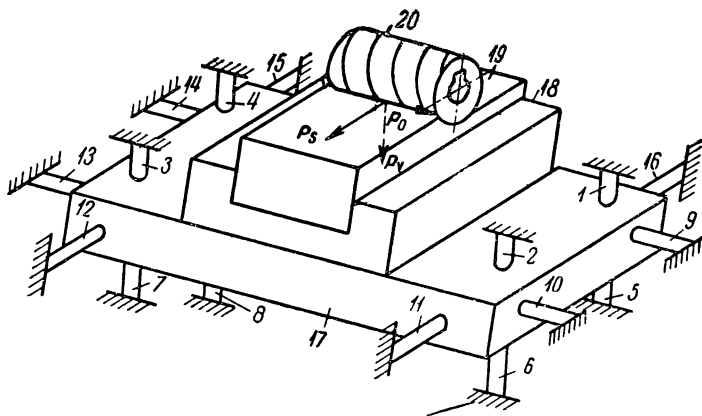
Измерение сил резания производят с помощью приборов, называемых *динамометрами*.

Динамометр для измерения одной составляющей силы резания называется однокомпонентным, двух составляющих — двухкомпонентным и трех составляющих — трехкомпонентным.

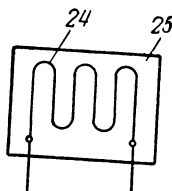
В зависимости от устройства для регистрации силы резания различают динамометры электрические, механические и гидравлические.

Наибольшее распространение имеют электрические динамометры индуктивные и омического сопротивления (с проволочными датчиками — тензоэлементами).

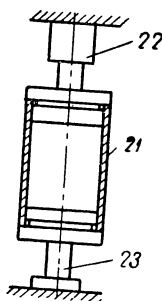
a)



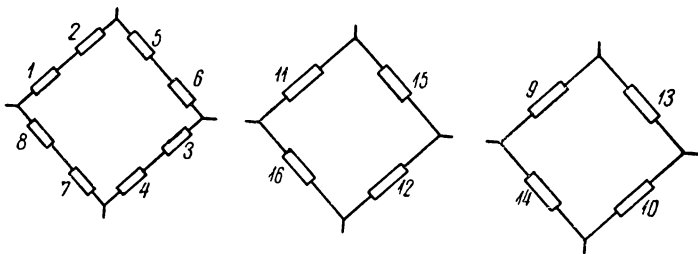
б)



в)



г)



Фиг. 23. Прибор для измерения сил резания при фрезеровании: а — схема действия прибора; б — проволочный датчик; в — конструкция опор прибора; г — мостовые схемы соединения проволочных датчиков при измерении различных составляющих сил резания (номера датчиков соответствуют номерам опор прибора).

На фиг. 23 приведена схема действия универсального динамометра УДМ-1 [11, 12] с проволочными датчиками для измерения сил резания при точении, сверлении и фрезеровании.

Универсальность прибора состоит в том, что он позволяет одновременно измерять три взаимно перпендикулярные силы и крутящий момент, действующий в горизонтальной плоскости.

Прибор имеет державку 17 (фиг. 23, а), установленную и закрепленную в корпусе (на схеме не показан) с помощью 16 опор таким образом, что каждый угол державки поддерживают 4 опоры. Каждая опора (фиг. 23, в) состоит из тонкостенной втулки 21 и двух ножек 22 и 23, образующих упругие шарниры. При такой конструкции опоры воспринимают нагрузку только вдоль своей оси.

В собранном приборе каждая опора имеет предварительный натяг, равный примерно половине допустимой для опор нагрузки. Этим достигается устранение зазоров и контактных деформаций в местах стыков отдельных деталей прибора. На каждую из опор наклеены проволочные датчики сопротивления (фиг. 23, б), с помощью которых определяют деформацию опор.

Проволочный датчик представляет собой вытянутые петли из проволоки 24 диаметром 0,025—0,03 мм, наклеенной на бумажную полоску 25.

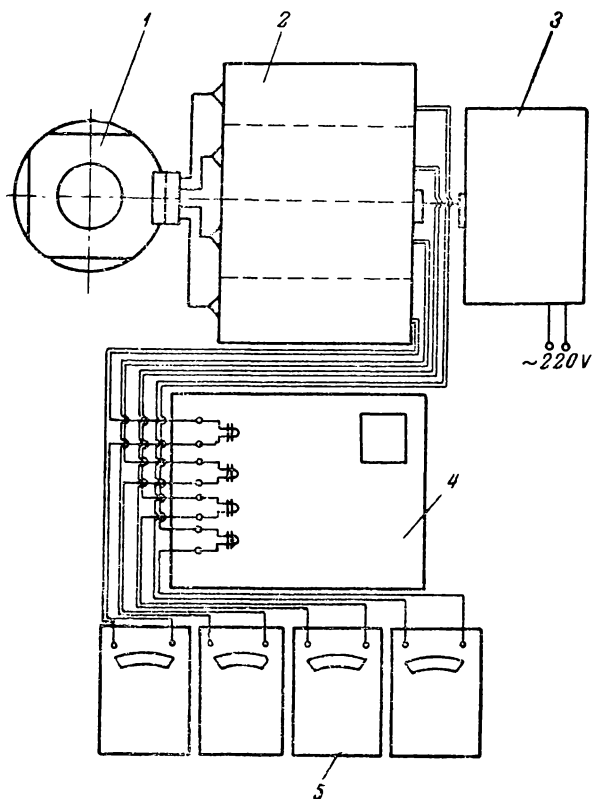
Проволочные датчики соединяют в измерительные мостовые схемы (фиг. 23, г), которые позволяют производить алгебраическое сложение или вычитание сигналов датчиков.

Для измерения сил соединяют датчики тех опор, оси которых взаимно параллельны, и сигналы датчиков алгебраически суммируют.

При таком включении датчиков показания прибора не зависят от точки приложения действующей силы. Провода от диагоналей измерительных мостов с помощью экранированного кабеля подключают к усилителю ТУ-4М (фиг. 24).

Принцип действия прибора состоит в следующем: на державке 17 укреплен столик 18, несущий обрабатываемую заготовку 19, (фиг. 23, а). При обработке, например, цилиндрической фрезой 20 с винтовым зубом заготовки 19, как известно, возникают горизонтальная сила P_s , вертикальная P_v и осевая P_o .

Горизонтальная сила P_s действует на опоры 11, 12, 15, 16, осевая P_o — на опоры 9, 10, 13, 14 и вертикальная P_v — на опоры 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8.



Фиг. 24. Схема соединения устройств, входящих в комплект прибора:

1 — прибор для измерения сил резания; 2 — усилитель ТУ-4М; 3 — блок питания; 4 — осциллограф МПО2; 5 — миллиамперметры М104.

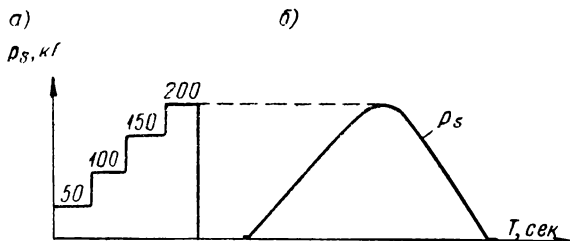
Под действием сил происходит упругая деформация опор; при этом вместе с опорами деформируются и проволоочные датчики.

При деформации датчиков сопротивление их меняется, в результате чего на мостовых схемах соединения датчиков возникают сигналы.

Сигналы с мостовых схем с помощью усилителя усиливаются и передаются на регистрирующие приборы — миллиамперметры М104 и осциллограф МПО2.

С помощью осциллографа (фиг. 24) действующие силы регистрируются в виде графиков на движущейся ленте (фиг. 25).

Расшифровку полученных на осциллографе графиков производят при помощи тарировочных графиков, характеризующих связь между высотой графика на ленте



Фиг. 25. Схематическое изображение осциллограммы горизонтальной силы: а — тарировочный график; б — диаграмма силы P_s .

осциллографа в миллиметрах и значением измеренной силы в килограммах.

Тарировочные графики обычно строят до и после окончания испытаний.

Для построения тарировочных графиков нагружают динамометр известными силами, например 50, 100 кг и т. д., и регистрируют эти силы на ленте осциллографа. Нагружение динамометра производят с помощью приспособления в направлении действия измеряемой силы.

На фиг. 25, а схематически показана тарировочная кривая и на фиг. 25, б — запись силы на ленте осциллографа.

11. ИЗНОС И СТОЙКОСТЬ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ФРЕЗ

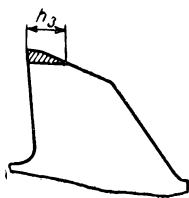
В процессе работы происходит износ режущих элементов фрез.

Интенсивность износа зависит от физико-механических свойств трущихся материалов инструмента и заго-

товки, скорости резания, толщины среза и других факторов. Наблюдения показывают, что цилиндрические, концевые, шлицевые, прорезные и фасонные фрезы изнашиваются по задним граням с образованием ленточки износа h_z , где задний угол становится равным нулю (фиг. 26).

Это объясняется тем, что толщина среза при работе этими фрезами незначительна.

Для нормальных условий работы весьма важным является вопрос о выборе предельно допустимой величины



Фиг. 26. Износ зуба фрезы по задней поверхности.

износа, при котором дальнейшая работа инструментом должна быть прекращена.

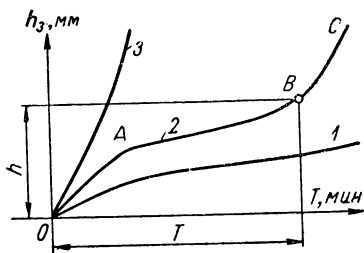
Такая величина износа носит название *критерия приотупления*, или *критерия износа*.

Наибольшее влияние на интенсивность нарастания ленточки износа на задней грани при прочих равных условиях оказывает скорость резания.

Если производить фрезерование при трех скоростях резания и замерять величину ленточки износа h_z на задней грани через определенные промежутки времени T , то можно построить графики зависимости величины ленточки износа от времени работы фрезы, приведенные на фиг. 27.

При малой скорости резания (кривая 1) нарастание износа по задней грани происходит медленно.

При чрезмерно высокой скорости резания (кривая 3) нарастание износа по задней грани происходит весьма



Фиг. 27. Кривые, характеризующие скорость нарастания ленточки износа по задней грани зуба фрезы:

1 — скорость резания небольшая;
2 — скорость резания высокая;
3 — скорость резания чрезмерно высокая.

интенсивно; при этом на кривой износа отсутствует участок начального износа.

Для применяемых на практике скоростей резания износ характеризуется кривой 2, имеющей три участка. Участок OA соответствует периоду начального износа, здесь происходит приработка режущей кромки. Участок AB соответствует периоду нормального износа, когда износ постепенно возрастает с увеличением времени работы инструмента. Участок BC соответствует периоду повышенного, или катастрофического износа.

Для фрез с пластинками твердых сплавов участок BC , соответствующий периоду повышенного износа, почти не наблюдается.

Если работу фрезой прекращать в тот момент, когда износ достигнет величины, соответствующей точке A , то работа окажется экономически невыгодной, так как часто придется перетачивать фрезу. Точно так же невыгодно доводить фрезу и до слишком большого износа, соответствующего точке C , так как в этом случае увеличиваются силы резания, повышается температура резания и при переточке придется удалить большой слой металла.

При черновом фрезеровании фрезами из быстрорежущих сталей, когда кривая износа имеет вид, подобный кривой 2 (фиг. 27), за критерий притупления принимают величину износа, соответствующую точке B начала резкого нарастания износа. Такой критерий притупления носит также название *критерия оптимального износа*.

При черновом фрезеровании фрезами с пластинками твердых сплавов за критерий притупления принимается такая величина износа по задней грани, при которой не нарушается нормальная работа (отсутствуют дрожания и др.) Такая величина износа носит название *технологического критерия притупления*. Технологический критерий притупления применяют также при чистовом и размерном фрезеровании. При чистовом фрезеровании за критерий притупления принимают такую величину износа, начиная с которой шероховатость обработанной поверхности перестает удовлетворять установленным техническим требованиям.

При размерном фрезеровании устанавливается такая величина износа, начиная с которой нарушается заданная точность.

На основании многочисленных наблюдений и специально поставленных опытов установлены следующие критерии износа по задней поверхности, приведенные в табл. 12. Таким образом, при достижении установленной величины критерия затупления дальнейшая работа фрезой должна быть прекращена. Для определения этого момента могут быть использованы дополнительные внешние признаки наступившего затупления.

Таковыми признаками могут быть: ухудшение шероховатости обрабатываемой поверхности, размельчение стружки вследствие образования зазубрин на режущей кромке, усиленное искрение фрезы в момент выхода ее из работы, возрастание интенсивности толчков в момент врезания фрезы, повышенный нагрев обрабатываемой детали, возрастание расходуемой мощности, и др.

Кроме нормального износа, фрезы с пластинками твердого сплава часто выходят из строя вследствие выкрашивания их режущих кромок.

Причинами, способствующими появлению выкрашивания, являются:

- 1) образование трещин в пластине твердого сплава при напайке или заточке;
- 2) перегрузка отдельных зубьев фрезы вследствие недопустимо большого износа, который может появиться из-за чрезмерного биения.

Выкрашивание может происходить также вследствие неправильно выбранной марки твердого сплава, геометрии фрезы и режима резания.

Совершенно недопустима работа твердосплавными фрезами в условиях, когда при резании возникают вибрации. Вибрации возникают чаще всего, когда жесткость технологической системы станок — приспособление — деталь — инструмент оказывается недостаточной.

Для устранения выкрашивания твердосплавных фрез необходимо повышение качества твердого сплава, а также улучшение организации изготовления, заточки и эксплуатации фрез.

Установленной величине износа фрез соответствует определенный период времени ее работы. Время непрерывной работы фрезы между двумя ее переточками называется *стойкостью*. Период стойкости обозначают T и измеряют в минутах. Весьма важным вопросом является выбор периода стойкости для фрез разных типов.

Следует заметить, что между скоростью резания и стойкостью фрезы существует экспериментально установленная зависимость, имеющая вид

$$v = \frac{A}{T^m} \text{ или } vT^m = A = \text{const}, \quad (78)$$

где v — скорость резания в м/мин ;

T — стойкость в мин ;

A — постоянный коэффициент, зависящий от условий обработки (материала фрезы и заготовки, сечения среза, охлаждения и др.);

m — показатель относительной стойкости, характеризующий влияние стойкости на скорость резания.

Из приведенной зависимости следует, что чем меньше стойкость, тем выше скорость резания, и наоборот. Если производить работу с высокой скоростью, то производительность обработки будет более высокой, а стойкость инструмента будет низкой. При низкой стойкости нужно будет производить более частую смену инструмента и его заточку. Может оказаться, что затраты, связанные с более частой сменой и заточкой инструмента, будут больше чем выигрыш от увеличения производительности вследствие высокой скорости резания. Работа в таком случае окажется экономически невыгодной.

При работе с низкой скоростью резания производительность обработки будет низкой, а стойкость инструмента — высокой. В этом случае экономия от менее частой смены и заточки инструмента может оказаться меньше, чем потери на производительности от более низкой скорости резания. Работа также окажется экономически невыгодной. Таким образом, существует такой период стойкости и соответствующая ему скорость резания, при которых стоимость обработки окажется наименьшей.

Такой период стойкости называется *экономической стойкостью*.

Экономическая стойкость зависит от конструкции и размера фрез, стоимости заточки и доводки, времени смены инструмента, стоимости эксплуатации станка, степени влияния скорости резания на стойкость инструмента, и других факторов.

Средние данные об экономической стойкости разных типов фрез приведены в табл. 13.

Средние периоды стойкости фрез T в мин

Тип фрезы		Диаметр фрезы D в мм	Фреза с пластинками из твердого сплава		Фреза из стали Р18		
			Сталь	Чугун	Сталь и чугун кокий	Чугун серый	Медны сплавы
Фреза торцовая		40	—	—	120	—	120
		60	—	—	180	—	180
		75	—	120	180	—	180
		90	180	120	180	—	180
		110	180	180	180	—	180
		150	180	180	180	—	180
		200	240	180	240	—	240
		250	240	240	240	—	240
		300	300	300	—	—	—
		400	420	420	—	—	—
Фреза цилиндрическая	с мелким зубом	60	—	—	120	120	120
		75	—	—	180	180	180
	со вставными ножами	90—120	180	180	—	—	—
		75—150	—	—	180	180	180
Фреза концевая		12 ¹	120	—	—	—	—
		25	90	—	60	60	60
		40	120	—	90	90	90
		60	180	—	120	120	120
Фреза дисковая		90	—	—	120	120	120
		110	120	—	120	150	120
		130	—	—	150	150	150
		150	180	—	150	180	150
		200	240	—	150	180	150
		225	—	—	180	240	180

Тип фрезы	Диаметр фрезы D в мм	Фреза с пластинками из твердого сплава		Фреза из стали Р18		
		Сталь	Чугун	Сталь и чугун ковкий	Чугун серый	Медные сплавы
Фрезы прорезная и отрезная	75	—	—	60	90	60
	110	—	—	75	120	75
	150	—	—	120	180	120
	200	—	—	150	210	150
Фрезы фасонные: полукруглые, выпуклые, вогнутые и угловые	45	—	—	120	—	—
	75	—	—	120	—	—
	90	—	—	180	—	—

¹ Фрезы с коронками.

Приведенные в табл. 13 данные относятся к работе одной фрезы или одноинструментной обработке. В случае работы набором фрез или работы на многошпиндельном фрезерном станке, т. е. при многоинструментной обработке, период стойкости принимается большим по сравнению с одноинструментной обработкой вследствие больших затрат, связанных со сменой и заточкой большого количества фрез.

Научно-исследовательский институт технологии автомобильной промышленности рекомендует в этом случае пользоваться следующей формулой [13]

$$T = k_c (T_1 + T_2 + \dots + T_i) \text{ мин.},$$

где $T_1, T_2,$

T_i — периоды стойкости фрез, участвующих в работе;

k_c — коэффициент, учитывающий количество работающих фрез. Значения коэффициента k_c приведены в табл. 14.

Таблица 14

Значения коэффициента k_c

Количество фрез	1	2	4	6 и более
Коэффициент	1	0,85	0,7	0,5

12. СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИЕ ЖИДКОСТИ

С целью отвода образующейся при резании теплоты, повышения стойкости инструмента и уменьшения шероховатости обработанной поверхности при фрезеровании конструкционных углеродистых и легированных сталей, а также жаропрочных сталей и сплавов рекомендуется применять смазочно-охлаждающие жидкости.

Фрезерование чугуна обычно производят без применения смазочно-охлаждающей жидкости.

Наиболее распространенной смазочно-охлаждающей жидкостью является 5-процентный водный раствор эмульсола¹. Как показали исследования [14], лучшие результаты получаются при применении жидкости, состоящей из 10% водного раствора эмульсола с добавлением 2% сульфозфрезолола² и соды.

Применение такой жидкости повышает стойкость инструментов в 1,5—2 раза по сравнению с их стойкостью при охлаждении 5-процентным водным раствором эмульсола.³

В настоящее время известны четыре способа подвода смазочно-охлаждающей жидкости в зону резания:

- 1) охлаждение падающей струей, подаваемой к месту контакта фрезы с заготовкой;
- 2) высоконапорное охлаждение, когда струя жидкости подводится к режущей кромке инструмента со стороны задней поверхности под давлением 15—20 *ати* через насадку с отверстием диаметром 0,5—0,7 *мм*;
- 3) низконапорное охлаждение, при котором жидкость подводится к режущей кромке со стороны задней поверхности под давлением 0,5—2 *ати* через насадку с отверстием диаметром 2—5 *мм*;
- 4) охлаждение жидкостью, распыленной в струе воздуха, подводимой к режущей кромке инструмента со стороны задней поверхности под давлением 2—5 *ати* через насадку с отверстием диаметром 1,5—1,8 *мм*.

Эмульсол состоит из 70—80% минерального масла, 18—20% мыла, 2,5—5% спирта и 4—5% воды.

² Сульфозфрезол представляет собой осерненное минеральное масло.

³ Смазочно-охлаждающие жидкости, применяемые при обработке бронзы, латуни, меди, алюминия, дюралюмина, приведены в «Справочнике фрезеровщика». А. Н. Оглобин. Машгиз. 1962.

Не затрагивая достоинств и недостатков перечисленных методов охлаждения, отметим, что, как показали исследования [15], в настоящее время не установлены границы наиболее целесообразного использования каждого из четырех указанных методов охлаждения.

Наиболее широкое распространение в промышленности имеет первый из указанных методов — охлаждение обычным поливом.

Охлаждающая жидкость направляется на фрезу широкой плоской струей, так чтобы вся зона резания подвергалась охлаждению.

Количество подводимой жидкости при черновой обработке составляет 10—15 л/мин и при чистовой — 2—6 л/мин.

13. СКОРОСТЬ РЕЗАНИЯ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ, ДИСКОВЫМИ И КОНЦЕВЫМИ ФРЕЗАМИ

На основании экспериментальных данных скорость резания при фрезеровании, допускаемая режущими свойствами фрез всех типов, имеет следующий вид

$$v = \frac{C_v D^{q_v}}{T^m t^{x_v} s_z^{y_v} B^{u_v} z^{p_v}} k_v \text{ м/мин}, \quad (79)$$

где C_v — коэффициент, характеризующий условия обработки;
 D — диаметр фрезы в мм;
 T — стойкость фрезы в мин;
 t — глубина резания в мм;
 s_z — подача на один зуб в мм/зуб;
 B — ширина фрезерования в мм;
 z — число зубьев фрезы;
 $q_v, m, x_v, y_v, u_v, p_v$ — показатели степеней;
 k — общий поправочный коэффициент на измененные условия обработки.

Из формулы (79) следует, что с увеличением диаметра фрезы скорость резания увеличивается, а с увеличением стойкости, глубины, подачи на зуб, ширины фрезерования и числа зубьев она уменьшается.

Указанное влияние отдельных параметров на скорость резания можно объяснить следующим образом.

Влияние диаметра фрезы на скорость резания. С увеличением диаметра фрезы толщина среза, нагрузка на режущую кромку и количество выделяющейся при резании теплоты уменьшаются.

Увеличение массы фрезы способствует лучшему теплоотводу от режущих лезвий и, следовательно, увеличению скорости резания.

Влияние стойкости на скорость резания. Как уже отмечалось выше, с увеличением стойкости скорость резания снижается. Интенсивность влияния стойкости на скорость резания характеризуется показателем степени m :

для фрез из быстрорежущей стали	0,15 — 0,33
для фрез с пластинками твердых сплавов	0,2 — 0,6

Так как твердосплавные фрезы обладают большей теплостойкостью, т. е. способны выдерживать большую температуру при резании, не теряя своих свойств, и большей износостойкостью, то изменение скорости резания меньше сказывается на изменении стойкости твердосплавной фрезы по сравнению с быстрорежущими фрезами. По этой причине величина m имеет большее значение для твердосплавных фрез.

Влияние подачи и глубины резания на скорость резания. С увеличением глубины резания и подачи на зуб увеличиваются: длина дуги резания, толщина среза, сила резания и количество выделяющейся при резании теплоты. Все это способствует снижению скорости резания.

Влияние ширины фрезерования на скорость резания. С увеличением ширины фрезерования увеличиваются: суммарное сечение среза, сила резания и количество выделяющейся при резании теплоты. Выделяющееся при резании тепло с увеличением ширины фрезерования возрастает в прямой пропорции, в то время как отвод тепла от режущих лезвий вследствие постоянства массы фрезы ухудшается. По этой причине с увеличением ширины фрезерования скорость резания снижается.

Влияние числа зубьев на скорость резания. С увеличением числа зубьев фрезы увеличиваются: число зубьев, одновременно находящихся в работе, сечение среза и количество выделяемой теплоты, вследствие чего скорость резания снижается.

Формулы для определения скорости резания при работе фрезами
с пластинками твердых сплавов

Тип фрезы	Твердый сплав	Обрабатываемый материал	Формула скорости резания	Знач коэффициентов и показателей в формуле					
				B мм	t мм	s_z мм	C_v	x_v	u_v
Цилиндрическая	Т15К6	Сталь конструкционная, углеродистая и легированная (хромистая, хромоникелевая) с $\sigma_B = 75 \text{ кг/мм}^2$	$v = \frac{C_v D^{0,17}}{T^{0,33} t^{x_v} s_z^{0,28} B^{u_v} z^{0,1}} k_v$	≤ 35	≤ 2 > 2	$\geq 0,15$	390 443	0,19 0,38	-0,05
				> 35	≤ 2 > 2		616 700	0,19 0,38	0,08
				Дисковая при фрезеровании пазов	Т15К6	$v = \frac{C_v D^{0,2}}{T^{0,35} t^{0,3} s_z^{y_v} B^{0,1}} k_v$	$s_z, \text{ мм}$		C_v
				$\leq 0,06$ $\geq 0,06$	1825 690	0,12 0,4			
Дисковая при фрезеровании плоскостей и уступов	Т15К6		$v = \frac{C_v D^{0,2}}{T^{0,35} t^{0,4} s_z^{y_v}} k_v$	$s_z, \text{ мм}$		C_v	y_v		
				$\leq 0,12$ $\geq 0,12$	1340 740	0,12 0,4			

Тип фрезы	Твердый сплав	Обрабатываемый материал	Формула скорости резания	Значения коэффициентов и показателей степени в формуле				
Концевая	Т15К6	Сталь конструкционная, углеродистая с $\sigma_s = 75 \text{ кг/мм}^2$	$v = \frac{C_v D^{0,44}}{T^{0,37} t^{0,24} s_z^{0,26} B^{0,1} z^{0,13}} k_v$	Фрезы с коронками		$C_v = 145$		
				Фрезы с напаянными пластинками		$C_v = 234$		
		Сталь конструкционная хромоникелевая с $\sigma_s = 75 \text{ кг/мм}^2$		Фрезы с коронками		$C_v = 300$		
				Фрезы с напаянными пластинками		$C_v = 313$		
Цилиндрическая	ВК6	Чугун серый HB 190	$v = \frac{C_v D^{0,37}}{T^{0,42} t^{x_v} s_z^{y_v} B^{0,23} z^{0,14}} k_v$	t	s_z	C_v	x_v	y_v
				$< 2,5$	$\leq 0,2$ $> 0,2$	923 588	0,13	0,19 0,47
				$\geq 2,5$	$\leq 0,2$ $> 0,2$	1180 750		0,4

Поправочные коэффициенты на скорость резания для измененных условий работы

I. Значения коэффициента k_{Mv}						
Тип фрезы	Обрабатываемый материал					
	Сталь				Чугун серый	Чугун ковкий
	$\sigma_B \leq 90$	$\sigma_B > 90$	Углеродистая	Хромоникелевая		
Торцовая	$\frac{75}{\sigma'_B}$				$\left(\frac{190}{HB'}\right)^{1,25}$	$\left(\frac{150}{HB'}\right)^{1,25}$
Дисковая	$\left(\frac{75}{\sigma'_B}\right)^{0,65}$					
Цилиндрическая	$\frac{75}{\sigma'_B}$	$1,1 \left(\frac{75}{\sigma'_B}\right)^{1,5}$	—	—	$\left(\frac{190}{HB'}\right)^{0,75}$	—
Концевая	—	—	$\left(\frac{75}{\sigma'_B}\right)^{0,8}$	$\left(\frac{75}{\sigma'_B}\right)^{1,4}$	—	—

II. Значения коэффициента $k_{пв}$						
Состояние поверхности заготовки	Коэффициент					
Без корки или прокат	1,0					
С коркой штамповка поковка отливка	0,9 0,9 0,8					
III. Значения коэффициента $k_{цв}$						
Тип фрезы	Марка твердого сплава					
	T15K6	T14K8	T5K10	BK4	BK6	BK8
Торцовая, дисковая, цилиндрическая	1	0,94	0,65	1,1	1	0,83
Концевая	1	0,94	0,75	—	—	—
Примечание. Коэффициент для сплавов T15K6, T14K8 и T5K10 применяют при обработке стали, а для сплавов BK4, BK6, BK8 — при обработке чугуна.						

В табл. 15 приводятся формулы для определения скорости резания при работе цилиндрическими, дисковыми и концевыми фрезами с пластинками твердых сплавов¹ в зависимости от обрабатываемого материала.

Для измененных условий работы необходимо вводить поправочные коэффициенты на скорость резания.

Общий поправочный коэффициент на скорость резания имеет значение

$$k_v = k_{m_v} k_{n_v} k_{u_v}, \quad (80)$$

где k_{m_v} — коэффициент, учитывающий свойства обрабатываемого материала;

k_{n_v} — коэффициент, учитывающий состояние поверхности заготовки (прокат, штамповка, отливка).

k_{u_v} — коэффициент, учитывающий режущие свойства различных марок твердых сплавов.

Значение коэффициентов k_{m_v} , k_{n_v} и k_{u_v} приведены в табл. 16.

ГЛАВА III

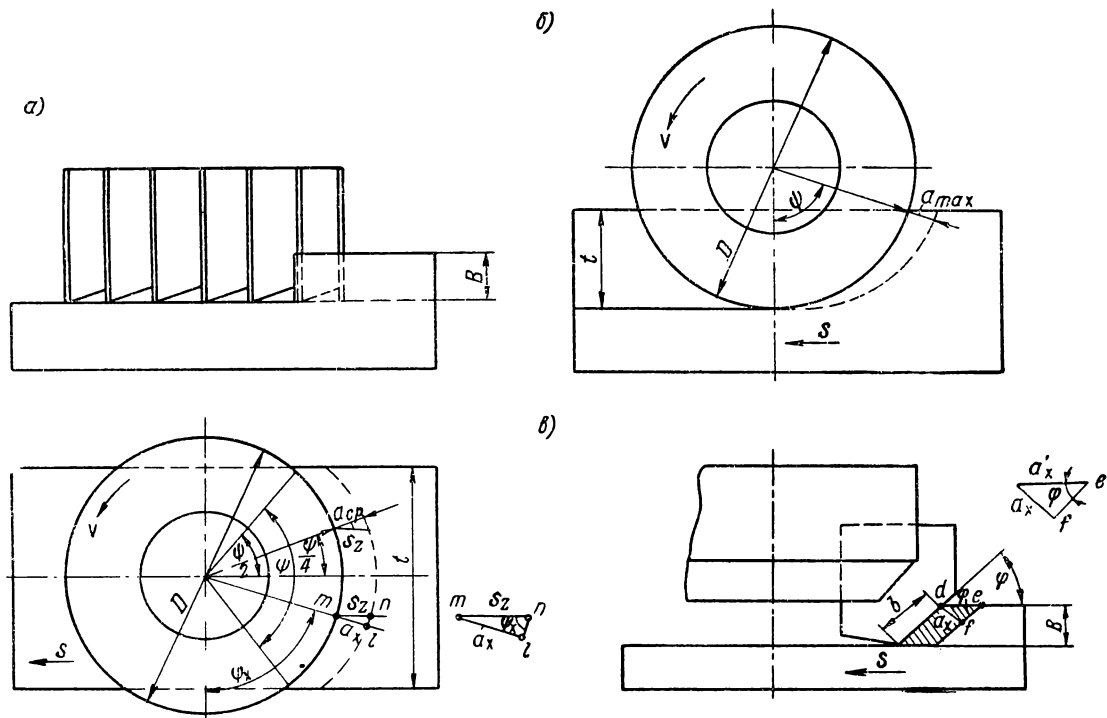
ТОРЦОВОЕ ФРЕЗЕРОВАНИЕ

14. ЭЛЕМЕНТЫ РЕЗАНИЯ

В отличие от цилиндрического фрезерования, где ось фрезы параллельна обрабатываемой поверхности, при торцовом фрезеровании ось фрезы перпендикулярна обрабатываемой поверхности. Различают полное, неполное, симметричное и несимметричное торцовое фрезерование (фиг. 28).

При полном торцовом фрезеровании ширина фрезеруемой поверхности равна диаметру фрезы. При неполном симметричном фрезеровании ширина фрезеруемой поверхности меньше диаметра фрезы, а ось фрезы совпадает с линией симметрии заготовки (фиг. 28, а). При несимметричном фрезеровании ось фрезы смещена по отношению к средней линии заготовки (фиг. 28, б).

¹ Формулы для определения скорости резания при работе фрезами из быстрорежущей стали приведены в литературе [4].



Фиг 28. Торцовое фрезерование: а — симметричное; б — несимметричное; в — фрезой с угловой кромкой

Ширина фрезерования B в соответствии с определением, данными для работы цилиндрической фрезой, при работе торцовыми фрезами совпадает с глубиной срезаемого слоя, т. е. $B = t_0$ мм.

Глубина резания t при симметричном торцовом фрезеровании равна ширине заготовки $t = B_3$ мм (фиг. 13).

При несимметричном резании (фиг. 28, б) глубина резания определяется по аналогии с цилиндрической фрезой, а при обработке паза концевой фрезой равна диаметру фрезы $t = D$ мм.

Ширина резания b для торцовой фрезы с угловым лезвием (фиг. 28, в) подсчитывается по формуле

$$b = \frac{B}{\sin \varphi \cos \lambda} \text{ мм.} \quad (81)$$

Если $\varphi = 90^\circ$ и $\lambda = 0$, то $b = B$.

Угол контакта фрезы ψ при полном торцовом фрезеровании $\psi = 180^\circ$.

При неполном симметричном фрезеровании (фиг. 28, а)

$$\sin \frac{\psi}{2} = \frac{t/2}{D/2} = \frac{t}{D}.$$

Для несимметричного так же, как и для цилиндрического фрезерования

$$\cos \psi = 1 - \frac{2t}{D}.$$

Толщина срезаемого слоя a изменяется как в зависимости от угла контакта зуба фрезы с изделием, так и в зависимости от угла в плане φ

При симметричном фрезеровании для произвольного положения зуба с углом контакта ψ_x толщина среза из треугольника mnl (фиг. 28, а) будет

$$a'_x = s_z \sin \psi_x \text{ мм.}$$

Учитывая наличие угла φ при работе фрезой с угловой кромкой (фиг. 28, в), толщина среза из треугольника def будет

$$a_x = a'_x \sin \varphi = s_z \sin \varphi \sin \psi_x \text{ мм.} \quad (82)$$

При $\psi_x = 90^\circ$ толщина среза имеет наибольшее значение

$$a_{\max} = s_z \sin \varphi \text{ мм.}$$

Подача в минуту для торцовой фрезы подсчитывается по формуле (12), а скорость резания — по формуле (11).

15. СИЛЫ И МОЩНОСТЬ ПРИ ТОРЦОВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ

При торцовом фрезеровании действуют те же силы, что и при цилиндрическом фрезеровании.

Среднее значение окружной силы P_z и мощности N_e , затрачиваемых на резание, можно определить так же, как и при цилиндрическом фрезеровании, на основании формулы для силы резания при точении.

Рассмотрим случай симметричного фрезерования (фиг. 28, а) торцовой фрезой с прямыми зубьями и без углового лезвия ($\varphi = 90^\circ$).

Сила резания при точении

$$P_z = C_p b a^x \text{ кг}$$

Ширина срезаемого слоя при торцовом фрезеровании

$$b_T = Bm,$$

где B — ширина фрезерования в мм;

m — число одновременно работающих зубцов.

По формуле (18)

$$m = \frac{\psi z}{360}.$$

Отношение $\frac{\psi}{360}$ при $\frac{t}{D} \leq 0,9$ можно заменить следующим выражением

$$\frac{\psi}{360} = 0,4 \left(\frac{t}{D} \right)^{1,1}$$

Погрешность при этом имеет сравнительно небольшое значение, что подтверждается данными табл. 17.

Погрешность замены $\frac{\psi}{360}$ отношением 0,4 $\left(\frac{t}{D}\right)^{1,1}$

$\frac{t}{D}$	$\frac{\psi}{360}$	$0,4 \left(\frac{t}{D}\right)^{1,1}$
0,2	0,0665	0,068
0,4	0,133	0,144
0,6	0,206	0,224
0,8	0,3	0,302

Тогда

$$b_T = 0,4 B \left(\frac{t}{D}\right)^{1,1} z.$$

Средняя толщина срезаемого слоя соответствует углу $\frac{\psi}{4}$.

$$a_{cp} = s_z \cos \frac{\psi}{4}.$$

Без особой погрешности можно принять

$$a_{cp} = 0,9 s_z;$$

тогда

$$P_{zcp} = C'_p B z s_z^x \left(\frac{t}{D}\right)^{1,1} \text{ кг}, \quad (83)$$

где

$$C'_p = C_p \cdot 0,9 \cdot 0,4 = 0,36 C_p.$$

Зная среднюю окружную силу можно определить эффективную мощность по формуле

$$\begin{aligned} N_e &= \frac{P_{zcp} v}{60 \cdot 102} = \frac{P_{zcp} \pi D n}{60 \cdot 102 \cdot 1000} = \\ &= C_N 10^{-5} B z s_z^x t^{1,1} D^{-0,1} \text{ н квт}, \end{aligned} \quad (84)$$

где

$$\frac{C'_p \pi}{600 \cdot 102 \cdot 1000} = C_N 10^{-5}.$$

Приведенные формулы (83) и (84) по своей структуре хорошо согласуются с нормативными данными.

В нормативах [4] для определения средних значений P_z и N_e приводятся следующие формулы.

1. Торцовые фрезы из быстрорежущей стали P18.

Обработка стали $\sigma_{\theta} = 75 \text{ кг/мм}^2$, ковкого чугуна $HB 150$ и бронзы $HB 100-140$

$$P_z = C_p B^{0,95} z s_z^{0,8} t^{1,1} D^{-1,1} \text{ кг}; \quad (85)$$

$$N_e = C_N 10^{-5} B^{0,95} z s_z^{0,8} t^{1,1} D^{-0,1} n k_{mN} \text{ квт.} \quad (86)$$

Обработка серого чугуна $HB 150$

$$P_z = C_p B^{0,9} z s_z^{0,72} t^{1,14} D^{-1,14} \text{ кг}; \quad (87)$$

$$N_e = C_N 10^{-5} B^{0,9} z s_z^{0,72} t^{1,14} D^{-0,14} n k_{mN} \text{ квт.} \quad (88)$$

Значения коэффициентов C_p и C_N приведены в табл. 18.

Таблица 18

Значение C_p и C_N

Коэффициент	Обрабатываемый материал			
	Сталь $\sigma_{\theta} = 75 \text{ кг/мм}^2$	Чугун ковкий $HB 150$	Чугун серый $HB 190$	Бронза Бр. АЖ 9-4 $HB 100-140$
C_p	82,4	50	37,5	50
C_N	4,22	2,57	1,93	2,57

При обработке материалов с другими механическими свойствами необходимо вводить поправочный коэффициент k_m определяемый по формулам, приведенным в табл. 10.

2. Торцовые фрезы с пластинками твердого сплава.

Структура формул для торцовых фрез с пластинками твердых сплавов такая же, как и для торцовых быстрорежущих фрез.

Мощность, затрачиваемая на резание при обработке стали $\sigma_s = 75 \text{ кг/мм}^2$ и ковкого чугуна $HB 150$, подсчитывается по следующей формуле

$$N_e = C_N 10^{-5} D^{-0,3} B s_z^{0,75} t^{1,1} z n^{0,8} k_N \text{ квт}, \quad (89)$$

где для стали $\sigma_s = 75 \text{ кг/мм}^2$ $C_N = 42,4$;
для чугуна ковкого $HB 150$ $C_N = 25,2$.

При обработке серого чугуна $HB 190$

$$N_e = 2,8 \cdot 10^{-5} B^{0,9} s_z^{0,74} t z n k_N \text{ квт}. \quad (90)$$

Помимо постоянных коэффициентов C_N формула (89) отличается от формулы мощности для торцовых быстро-режущих фрез (86) несколькими отличными значениями показателей степени при D и n . Это объясняется тем, что в формуле (89) учтено влияние скорости резания на окружную силу резания, выраженное зависимостью (91) [16] для $\gamma = -10^\circ$,

$$\begin{aligned} P_{z_{\max}} &= \frac{C}{v^{0,19}} = \frac{C}{\left(\frac{\pi D n}{1000}\right)^{0,19}} = \frac{1000^{0,19} \cdot C}{\pi^{0,19} D^{0,19} n^{0,19}} = \\ &= \frac{C'}{D^{0,19} n^{0,19}}, \end{aligned} \quad (91)$$

где $C' = \frac{1000^{0,19} C}{\pi^{0,19}}$.

Если подставить зависимость (91) в формулу (86), то получим формулу (89).

Коэффициент k_N имеет значение

$$k_N = k_{m_N} k_{\gamma_N} k_{\varphi_N},$$

где k_{m_N} — коэффициент, учитывающий обрабатываемый материал, подсчитывается по формулам, приведенным в табл. 11;

k_{γ_N} — коэффициент, учитывающий влияние переднего угла, приведен в табл. 11;

k_{φ_N} — коэффициент, учитывающий влияние главного угла в плане.

Коэффициент $k_{\varphi N}$ имеет значения, приведенные в табл. 19.

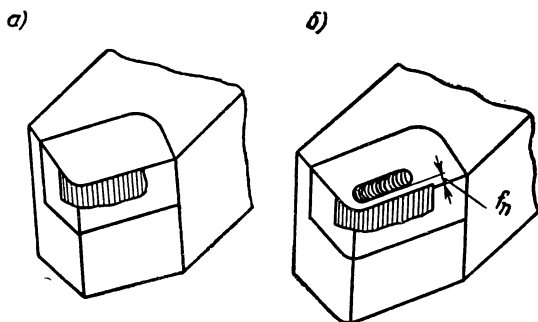
Таблица 19

Значения коэффициента $k_{\varphi N}$

Главный угол в плане φ	15	30	60	75	90
Коэффициент	1,23	1,15	1,0	1,06	1,14

16. ИЗНОС И СТОЙКОСТЬ ТОРЦОВЫХ ФРЕЗ

Торцовые фрезы при обработке стали с тонкими стружками ($a < 0,08 \text{ мм}$) чугуна и бронзы изнашиваются по задней грани (фиг. 29, а), а при обработке стали



Фиг. 29. Схема износа зуба торцовой фрезы:
а — износ по задним граням; б — износ по задней и передней граням.

с толщиной среза $a > 0,08 \text{ мм}$ — по задней и передней граням (фиг. 29, б).

В последнем случае на задней грани образуется ленточка износа с задним углом равным нулю, а на передней грани — углубление или лунка износа на расстоянии f_n от режущей кромки.

По мере роста износа по задней и передней поверхностям перемычка f_n уменьшается и исчезает, в результате чего наступает значительное разрушение режущей кромки. Следует отметить, что для торцовых фрез, так же как и для цилиндрических, основным и лимитирующим износом является износ по задней поверхности.

Допустимая величина износа, при достижении которой дальнейшая работа фрезой должна быть прекращена, приведена в табл. 12.

Большее значение величины износа по задней грани для торцовых фрез по сравнению с цилиндрическими концевыми и фасонными фрезами объясняется следующим.

При работе цилиндрическими концевыми и фасонными фрезами формирование обработанной поверхности производит главная режущая кромка, которая для обеспечения необходимой шероховатости поверхности должна иметь и меньшую величину износа.

При работе торцовой фрезой главная режущая кромка не участвует в формировании обработанной поверхности, а формирование производится вспомогательной и частично переходной режущей кромками.

Поэтому у торцовых фрез допустимая величина износа по задней грани может иметь большее значение. За критерий износа при работе торцовой фрезой принимают: при черновой обработке оптимальную величину износа по табл. 12; при чистовой обработке критерием является величина технологического износа.

Доводить износ торцовых твердосплавных фрез до величин, больших 1,2 мм, и быстрорежущих до величин, больших 2 мм, нецелесообразно, так как при этом возрастает расходуемая мощность, снижается суммарная стойкость фрезы и повышается расход абразивных кругов при заточке.

17. СКОРОСТЬ РЕЗАНИЯ ПРИ ТОРЦОВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ

Скорость резания при работе торцовыми фрезами с пластинками твердых сплавов подсчитывается по формулам¹, приведенным в табл. 20.

¹ Формулы для определения скорости резания фрезами из быстрорежущей стали приведены в литературе [4].

Формулы для определения скорости резания при работе торцовыми фрезами с пластинками твердых сплавов

Тип фрезы	Твердый сплав	Обрабатываемый материал	Формула скорости резания
Торцовая	T15K6	Стали конструкционные, углеродистые и легированные (хромистые, хромоникелевые)	$\sigma_s = 75 \text{ кг/м.м}^2$ $v = \frac{332 D^{0,2}}{T^{0,2} B^{0,1} s_z^{0,4} t^{0,2}} k_v$
	BK6	Чугун серый	HB 190 $v = \frac{445 D^{0,2}}{T^{0,32} B^{0,15} s_z^{0,35} t^{0,2}} k_v$
	BK8	Чугун ковкий	HB 150 $v = \frac{C_v D^{0,22}}{T^{0,33} B^{0,17} s_z^{0,4} t^{0,22}} k_v^1$

¹ Значения коэффициентов при: $s_z \leq 0,18$; $C_v = 825$; $y_v = 0,1$;
 $s_z > 0,18$; $C_v = 577$; $y_v = 0,32$.

Измененные условия обработки учитываются коэффициентом k_v , который для торцовых фрез имеет значение

$$k_v = k_{m_v} k_{n_v} k_{u_v} k_{\varphi_v}, \quad (92)$$

где k_{m_v} — коэффициент, учитывающий свойства обрабатываемого материала;

k_{n_v} — коэффициент, учитывающий состояние поверхности заготовки;

k_{u_v} — коэффициент, учитывающий режущие свойства различных марок твердых сплавов;

k_{φ_v} — коэффициент, учитывающий влияние угла в плане.

Коэффициент k_{m_v} и значения коэффициентов k_{n_v} и k_{u_v} приведены в табл. 16.

Значение коэффициента k_{Φ_v} приведено в табл. 21.

Таблица 21

Значение коэффициента k_{Φ_v}

Угол в плане Φ	15	30	45	60	90
Коэффициент	1,6	1,28	1,1	1,0	0,86

Обычно определение скорости резания и мощности, потребной на резание для конкретных условий обработки, производят не по формулам, что связано с длительными расчетами, а по таблицам, разработанным на основе этих формул.

Таблицы ускоряют и упрощают выбор требуемого режима резания.

Примером таких таблиц служат табл. 22 и 23 [4] для выбора режима резания и определения мощности при обработке стали торцовыми фрезами с пластинками твердого сплава.

18. ВЫБОР РЕЖИМА РЕЗАНИЯ

При выборе режима резания для конкретных условий обработки устанавливают наиболее выгодное сочетание скорости резания и подачи, при которых наиболее полно используются режущие свойства инструмента и кинематические возможности станка и достигается наибольшая производительность при наименьшей стоимости операции.

Выбор режима резания осуществляется в следующей последовательности.

Диаметр фрезы. Диаметр фрезы выбирают в зависимости от ширины фрезерования B^1 , глубины резания t и конструктивных размеров и формы детали. Для обычных условий работы диаметр цилиндрических фрез может быть выбран по табл. 24 и дисковых — по табл. 25 [13].

Диаметр торцовых фрез рекомендуется выбирать по следующей зависимости

$$D = (1,4 \div 1,7) B_3, \quad (93)$$

где B_3 — ширина заготовки в мм.

¹ См. стр. 35 и фиг. 13.

Таблица 22

Режимы резания торцовыми фрезами с пластинками твердого сплава T15K6 при обработке стали конструкционной, углеродистой и легированной (хромистая и хромоникелевая) с $\sigma_{0,2} = 75 \text{ кг/мм}^2$

r	$\frac{D}{z}$	В до	Подача на зуб фрезы s_z до																	
			0,07			0,10			0,13			0,18			0,24			0,33		
			Режимы резания																	
			v	n	s_M	v	n	s_M	v	n	s_M	v	n	s_M	v	n	s_M	v	n	s_M
180	$\frac{80}{5}$	1,5	398	1580	505	352	1400	605	316	1255	730	282	1120	875	249	990	1040	220	875	1220
		5	352	1400	450	316	1255	545	282	1120	650	249	990	770	220	875	920	196	780	1090
	$\frac{110}{4}$	1,5	398	1150	295	352	1020	355	316	915	425	282	815	510	249	720	600	220	635	710
5		352	1020	260	316	915	315	282	815	380	249	720	450	220	635	535	196	565	630	
$\frac{150}{6}$	5	352	745	285	316	670	350	282	600	415	249	530	495	220	465	585	196	415	695	
	16	316	670	260	282	600	310	249	530	370	220	465	435	196	415	526	174	370	620	
240	$\frac{200}{8}$	5	336	535	275	298	475	330	266	420	390	236	375	465	209	330	560	186	295	660
		16	298	475	245	266	420	290	236	375	350	209	330	420	186	295	495	166	265	595
$\frac{250}{8}$	5	336	425	220	298	380	260	266	340	315	236	300	375	209	265	445	186	235	525	
	16	298	380	195	266	340	235	236	300	280	209	265	330	186	235	395	166	210	476	
300	$\frac{320}{10}$	5	322	320	205	286	285	245	252	250	290	226	225	350	199	198	415	178	177	495
		16	286	285	182	252	250	215	226	225	260	199	198	310	178	177	370	158	157	440
420	$\frac{400}{12}$	5	298	235	180	266	210	220	236	188	260	209	166	310	186	148	370	166	132	445
		16	266	210	161	236	188	195	209	166	230	186	148	275	166	132	330	146	116	390

Поправочные коэффициенты на режимы резания для измененных условий работы							
Механическая характеристика стали	$\frac{\sigma_B}{HB}$	До 56	56—62	63—70	71—79	80—89	90—100
		До 160	160—177	178—200	201—226	227—255	256—285
	$k_{Mv} = k_{Mn} = k_{MSM}$	1,42	1,26	1,12	1,0	0,89	0,79
Отношение фактического периода стойкости к нормативному	$T_{\phi} : T_H$	0,5	1,0	1,5	2	3	4
	$k_{Tv} = k_{Tn} = k_{TSM}$	1,15	1,0	0,92	0,87	0,8	0,76
Обрабатываемая поверхность	Состояние	Без корки и прокат	С коркой				
			Поковка или штамповка		Отливка		
	$k_{nv} = k_{nn} = k_{nSM}$	1,0	0,9		0,8		
Отношение ширины заготовки к диаметру фрезы	$B_3 : D$	До 0,45	0,45—0,8		Свыше 0,8		
		$k_{Bv} = k_{Bn} = k_{BSM}$	1,13	1,0		0,89	
Главный угол в плане	φ	90	60	45	30	15	
	$k_{\varphi S_z}$	0,7	1,0	1,0	1,5	2,8	
	$k_{\varphi v} = k_{\varphi n}$ с учетом увеличения подачи	1,0	1,0	1,1	1,1	1,05	
	$k_{\varphi SM}$	0,7	1,0	1,1	1,65	2,9	
Примечание. v в м/мин; n в об/мин; s_M в мм/мин; s_z в мм/зуб; T в мин; B и D в мм.							

Диаметр фрезы в мм и число зубьев $D \times Z$		Мощность на резание N_e в квт																								
80×5	110×4 150×6 200×8	↑	250×8 320×10 400×12																							
	Минутная подача s_M в мм/мин																									
—	—	106	—	—	—	—	—	—	—	1,1	1,3	1,6	1,9	2,3	2,7	3,2	3,8	4,6	5,5	6,6	7,8	9,4	11	13	16	19
94	110	132	—	—	—	—	—	1,1	1,3	1,3	1,6	1,9	2,3	2,7	3,2	3,8	4,6	5,5	6,6	7,8	9,4	11	13	16	19	22,5
116	140	165	—	—	—	—	1,1	1,3	1,6	1,6	1,9	2,3	2,7	3,2	3,8	4,6	5,5	6,6	7,8	9,4	11	13	16	19	22,5	27
145	175	200	—	—	—	—	1,1	1,3	1,6	1,9	2,3	2,7	3,2	3,8	4,6	5,5	6,6	7,8	9,4	11	13	16	19	22,5	27	—
181	220	255	—	—	—	1,1	1,3	1,6	1,9	2,3	2,7	3,2	3,8	4,6	5,5	6,6	7,8	9,4	11	13	16	19	22,5	27	—	—
230	270	320	—	—	1,1	1,3	1,6	1,9	2,3	2,7	3,2	3,8	4,6	5,5	6,6	7,8	9,4	11	13	16	19	22,5	27	—	—	—
282	340	400	—	1,1	1,3	1,6	1,9	2,3	2,7	3,2	3,8	4,6	5,5	6,6	7,8	9,4	11	13	16	19	22,5	27	—	—	—	—
350	420	500	1,1	1,3	1,6	1,9	2,3	2,7	3,2	3,8	4,6	5,5	6,6	7,8	9,4	11	13	16	19	22,5	27	—	—	—	—	—
440	530	620	1,3	1,6	1,9	2,3	2,7	3,2	3,8	4,6	5,5	6,6	7,8	9,4	11	13	16	19	22,5	27	—	—	—	—	—	—
550	660	770	1,6	1,9	2,3	2,7	3,2	3,8	4,6	5,5	6,6	7,8	9,4	11	13	16	19	22,5	27	—	—	—	—	—	—	—
680	820	960	1,9	2,3	2,7	3,2	3,8	4,6	5,5	6,6	7,8	9,4	11	13	16	19	22,5	27	—	—	—	—	—	—	—	—
850	1030	1200	2,3	2,7	3,2	3,8	4,6	5,5	6,6	7,8	9,4	11	13	16	19	22,5	27	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1070	1280	1500	2,7	3,2	3,8	4,6	5,5	6,6	7,8	9,4	11	13	16	19	22,5	27	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1340	1600	—	3,2	3,8	4,6	5,5	6,6	7,8	9,4	11	13	16	19	22,5	27	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1670	—	—	3,8	4,6	5,5	6,6	7,8	9,4	11	13	16	19	22,5	27	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Поправочные коэффициенты на мощность																										
Главный угол в плане	φ в град		15	30	60	75	90	Передний угол							γ в град			-10	0	+10						
	$K_{\varphi N}$		1,23	1,15	1,0	1,06	1,14								$K_{\gamma N}$			1,0	0,89	0,79						

Таблица 24

Рекомендуемые диаметры цилиндрических фрез

Ширина фрезерования B в мм	Диаметр фрезы D в мм при глубине резания t в мм			
	До 2	До 5	До 8	До 10
70	63	80	100	100
100	80	100	100	100
150 ¹	100	125	125	160

¹ Применять сборные составные фрезы по ГОСТ 9926—61.

Таблица 25

Рекомендуемые диаметры дисковых фрез

Ширина фрезерования B в мм	Диаметр фрезы D в мм при глубине резания t в мм					
	До 5	До 10	До 20	До 30	До 60	До 100
10	50	63	80	100	160	—
20	63	80	100	125	200	315
40	80	100	125	160	200	315

Фрезе следует выбирать возможно меньшего диаметра, имея в виду, что фрезы меньшего диаметра являются более производительными, так как с уменьшением диаметра фрезы сокращается основное (технологическое) время. При этом следует учитывать конструктивные размеры детали, размеры обработки и обеспечивать возможно большую жесткость установки фрезы.

Материал режущей части фрезы. Материал режущей части фрезы оказывает существенное влияние на уровень режима резания. Следует иметь в виду, что фрезы с пластинками твердых сплавов позволяют повысить режим фрезерования в 2—3 раза по сравнению с фрезами из быстрорежущей стали. Если оборудование обладает достаточной мощностью, то фрезы с пластинками твердых сплавов целесообразно применять на всех видах фрезерных работ.

Выбор марки инструментального материала для фрезы в зависимости от условий обработки рекомендуется производить по табл. 3.

Геометрические параметры режущей части фрез. Выбор геометрических параметров режущей части фрез рекомендуется производить по табл. 4—9.

Глубина резания (см. фиг. 13). Для уменьшения основного (технологического) времени обработку рекомендуется производить в один проход. Если к точности и шероховатости поверхности предъявляются повышенные требования, то обработку рекомендуется производить в два прохода — один черновой и один чистовой. При снятии больших припусков или фрезеровании на станках с недостаточной мощностью, возможна обработка в два черновых прохода.

Подача. Для уменьшения основного (технологического) времени рекомендуется работать с возможно большей технологически допустимой минутной подачей фрезы. При черновом фрезеровании величина подачи зависит от обрабатываемого материала, материала режущей части фрезы, прочности твердого сплава, мощности станка, жесткости системы станок—приспособление—инструмент—деталь, размеров обработки и углов заточки фрез. При этом подача выбирается на один зуб фрезы s_z .

При чистовой обработке подача выбирается в зависимости от заданного класса чистоты обработанной поверхности. Выбор величины подачи для торцовых фрез зависит от способа установки фрезы относительно детали. Установлено, что для торцовой фрезы с пластинками твердого сплава наиболее благоприятные условия врезания зуба в обрабатываемую деталь достигаются при расположении фрезы относительно детали, как показано на фиг. 30, б.

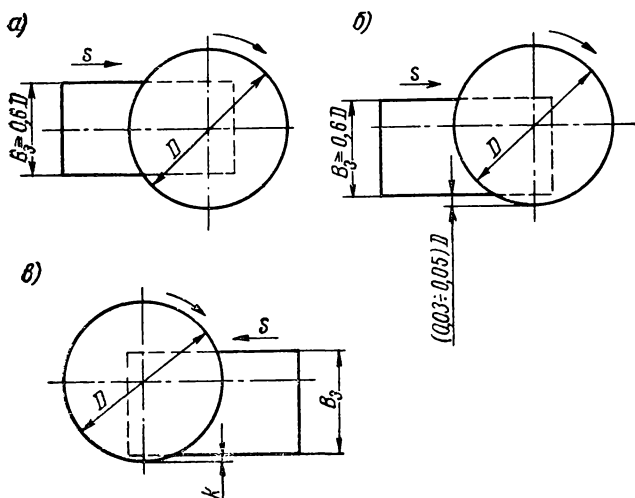
При этом при врезании смещение фрезы относительно заготовки составляет

$$c = (0,03 \div 0,05) D.$$

Такое расположение фрезы дает возможность увеличить подачу на зуб против подачи при симметричном фрезеровании стали и чугуна (фиг. 30, а) в 2 раза и более.

В табл. 26 приведены рекомендуемые подачи при черновом фрезеровании торцовыми фрезами с пластинками твердого сплава для указанных двух случаев.

При фрезеровании торцовыми фрезами жаропрочных сталей фрезу необходимо устанавливать так, чтобы расстояние k при выходе зуба из контакта с заготовкой



Фиг. 30. Установка заготовки относительно оси торцовой фрезы: а и б — при обработке стали и чугуна; в — при обработке жаропрочной стали.

было равно нулю (фиг. 30, в). На величину подачи при торцовом фрезеровании оказывает также влияние главный угол в плане φ .

Подачи, приведенные в табл. 26, рассчитаны на фрезы с углом в плане $\varphi = 60^\circ$. Уменьшение угла в плане φ до $30-15^\circ$ позволяет увеличивать подачу на зуб в 1,5—2,8 раза, а увеличение угла φ до 90° снижает подачу на зуб на 30%.

Величины подач при чистовой обработке твердосплавными фрезами, приведенные в табл. 26, даны на один оборот фрезы. Подачи, рекомендуемые для работы различными типами фрез в зависимости от мощности станка, вида обработки, обрабатываемого материала, приведены в нормативах режимов резания [4]. Следует

Рекомендуемые подачи при обработке плоскостей торцовыми фрезами с пластинками твердого сплава

I. Поддачи при черновой обработке на зуб фрезы s_z мм/зуб									
Мощность (фре- станка (фре- зерного шин- деля) в кВт	Схема уста- новки фрезы по фиг. 30	Сталь σ_B в кг/мм ²				Чугун HB			
		≤ 60		> 60		≤ 180		> 180	
		Марка твердого сплава							
		T5K10	T15K6	T5K10	T15K6	BK8	BK6	BK8	BK6
Свыше 10	a	0,20—0,24	0,14—0,18	0,16—0,20	0,12—0,15	0,32—0,38	0,22—0,28	0,25—0,32	0,18—0,24
	b	0,40—0,48	0,28—0,36	0,32—0,40	0,24—0,30	0,65—0,80	0,45—0,56	0,50—0,64	0,38—0,48
5—10	a	0,15—0,18	0,12—0,15	0,12—0,14	0,09—0,11	0,24—0,29	0,19—0,24	0,20—0,24	0,14—0,18
	b	0,30—0,36	0,22—0,30	0,24—0,28	0,18—0,22	0,48—0,56	0,38—0,48	0,38—0,45	0,28—0,36
II. Поддачи при чистовой обработке на один оборот фрезы s_0 в мм/об									
Обрабатываемый материал		Вспомогательный угол в плане φ_1 в град	Класс чистоты по ГОСТ 2789—59						
			$\nabla 5$	$\nabla 6$	$\nabla 7$	$\nabla 8$			
Сталь в кг/мм ²	$\sigma_B \leq 70$ кг/мм ²	5	0,80—0,50	0,55—0,40	0,25—0,20	0,15			
		2	1,6—1,0	1,1—0,80	0,50—0,40	0,3			
	$\sigma_B > 70$ кг/мм ²	5	1,0—0,7	0,60—0,45	0,30—0,20	0,20—0,15			
		2	2,0—1,4	1,2—0,9	0,60—0,40	0,40—0,30			

Примечания.

1. Приведенные значения черновых подач рассчитаны для работы стандартными фрезами. При работе нестандартными фрезами с увеличенным числом зубьев значения подач следует уменьшать на 15—25%.
2. В первоначальный период работы фрезы до износа $h_z = 0,2—0,3$ мм чистота обработанной поверхности при чистовом фрезеровании снижается примерно на один класс.
3. Поддачи при черновой обработке жаропрочных сталей рекомендуется брать в пределах 0,1—0,35 мм/зуб.

иметь в виду, что работа с подачами, рекомендуемыми нормативами, требует минимального биения зубьев фрезы.

Скорость резания, число оборотов и минутная подача. Выбрав диаметр фрезы, материал режущей части, геометрические параметры зубьев и подачу на зуб, а также установив глубину резания по нормативам режимов резания [4], устанавливаются скорость резания, число оборотов фрезы и минутную подачу. Нормативы составлены таким образом, что на каждый тип фрезы имеются отдельные карты как для выбора скорости резания, числа оборотов, минутной подачи (см. табл. 22), так и для установления мощности, потребной на резание (см. табл. 23). Такие карты имеются для фрез торцовых, цилиндрических, концевых, дисковых, прорезных и отрезных, полукруглых, угловых и шпоночных.

Скорости резания и минутные подачи на каждый тип фрезы даны для обработки сталей конструкционных, углеродистых и легированных с пределом прочности на растяжение $\sigma_s = 75 \text{ кг/мм}^2$, жаропрочной стали 1X18H9T, чугуна серого с твердостью по Бринелю *HB* 190, чугуна ковкого *HB* 150 и медных сплавов.

Кроме того, режимы резания, приведенные в картах нормативов, рассчитаны на работу одним инструментом с периодом стойкости, выбираемым по табл. 13, при нормальном затуплении фрезы (табл. 12).

Для измененных условий обработки, например при работе с другим периодом стойкости, обработке материалов с другими механическими свойствами и др., в этих же картах даются соответствующие поправочные коэффициенты на скорость резания, число оборотов, минутную подачу и мощность.

Так, например, поправочный коэффициент на скорость резания при работе торцовой фрезой с пластинками твердого сплава определенной марки имеет следующее значение:

$$k_v = k_{mv} k_{T_v} k_{n_v} k_{B_v} k_{\varphi_v}, \quad (94)$$

где k_{mv} — коэффициент, характеризующий влияние механической характеристики стали σ_s или твердости чугуна *HB*;

- k_{T_v} — коэффициент, характеризующий влияние отношения фактического периода стойкости к нормативному;
- k_{n_v} — коэффициент, характеризующий влияние состояния обрабатываемой поверхности;
- k_{B_v} — коэффициент, характеризующий влияние отношения ширины фрезерования к диаметру;
- k_{φ_v} — коэффициент, характеризующий влияние главного угла в плане.

В картах режимов резания для фрез из быстрорежущей стали приведен также поправочный коэффициент на чистовую обработку, учитывающий меньшую величину допустимого износа фрезы.

Следует также иметь в виду, что режимы резания инструментами из быстрорежущей стали рассчитаны на сталь Р18. В то же время они действительны и для фрез из стали Р9 при условии ее качественной термической обработки.

В связи с поправочным коэффициентом на скорость резания соответственно изменяются также число оборотов фрезы и минутная подача.

Установленные по карте значения для числа оборотов фрезы и минутной подачи могут отличаться от чисел оборотов шпинделя и минутных подач, имеющих на станке. Для работы рекомендуется выбирать ближайшие значения чисел оборотов и подач, из имеющихся на станке.

После корректирования по паспортным данным станка числа оборотов и минутной подачи устанавливают фактическую скорость резания и фактическую подачу на зуб фрезы по формулам

$$v = \frac{\pi Dn}{1000} \text{ м/мин};$$

$$s_z = \frac{s_m}{nz} \text{ мм/зуб},$$

- где v — фактическая скорость резания в *м/мин*;
- D — диаметр фрезы в *мм*;
- n — фактическое число оборотов фрезы в *мин*;
- s_z — фактическая подача на зуб фрезы в *мм/зуб*;
- s_m — фактическая минутная подача в *мм/мин*;
- z — число зубьев фрезы.

Проверка выбранного режима по мощности. После установления скорости резания v , подачи на зуб s_z , минутной подачи s_m , глубины резания t и ширины фрезерования B по картам нормативов определяют мощность, потребную на резание.

Эта мощность может быть определена также по соответствующим формулам.

Для осуществления обработки необходимо, чтобы мощность, потребная на резание, была меньше мощности на шпинделе станка, т. е.

$$N_e \leq N_s \eta,$$

где N_e — мощность, потребная на резание, в *квт*;

$N_s \eta$ — мощность на шпинделе станка в *квт*;

N_s — мощность электродвигателя станка в *квт*;

η — к. п. д. станка.

Если выбранный режим не отвечает этому условию, необходимо величину минутной подачи снизить до величины, допускаемой мощностью электродвигателя станка, и соответственно снизить число оборотов шпинделя.

Пример выбора режима резания. Рассмотрим порядок выбора режима резания при фрезеровании бруска (фиг. 31) из заготовки $60 \times 60 \times 300$ (сталь 45 $\sigma_b = 65 \text{ кг/мм}^2$) на вертикальнофрезерном станке 6Н13. Обработку будем производить под шлифование торцевой фрезой с пластинками твердого сплава.

Паспортные данные станка модели 6Н13. Рабочая поверхность стола $400 \times 1600 \text{ мм}$. Число оборотов шпинделя в минуту: 30, 37,5, 47,5, 60, 75, 95, 118, 150, 190, 235, 300, 375, 475, 600, 750, 950, 1180, 1500.

Продольная и поперечная подачи стола в *мм/мин*: 23,5, 30, 37,5, 47,5, 60, 75, 95, 118, 150, 190, 235, 300, 375, 475, 600, 750, 950, 1180.

Мощность электродвигателя 10 *квт*; к. п. д. станка 0,75. Определим режим резания.

1. Выбор марки инструментального материала. По



Фиг. 31. Брусок.

табл. 3 для фрезерования конструкционной стали при непрерывном резании выбираем твердый сплав Т15К6.

2. Выбор геометрических параметров режущей части фрезы. По табл. 6 для фрезерования стали с $\sigma_b < 80 \text{ кг/мм}^2$ торцовой фрезой с пластинками твердого сплава устанавливаем: $\varphi = 60^\circ$; $\varphi_0 = 30^\circ$; $\varphi_1 = 5^\circ$; $\alpha_n = 15^\circ$; $\alpha_1 = 15^\circ$; $\gamma = -5^\circ$; $\lambda = 15^\circ$

3. Ширина и глубина фрезерования. В соответствии с чертежом детали глубина резания $t = B_z = 60 \text{ мм}$ и ширина фрезерования $B = 2,5 \text{ мм}$.

4. Диаметр фрезы. Диаметр торцовой фрезы определяется по формуле $D = 1,6 \cdot B_z = 1,6 \cdot 60 = 96 \text{ мм}$.

По табл. 21 выбираем $D = 110 \text{ мм}$ и $z = 4$.¹

5. Подача на зуб фрезы. По табл. 26 для чернового фрезерования стали с $\sigma_b > 60 \text{ кг/мм}^2$ при установке торцовой фрезы с пластинками твердого сплава Т15К6 по схеме (фиг. 30, б) выбираем подачу на зуб $s_z = 0,18 \text{ мм/зуб}$.

6. Стойкость фрезы. По табл. 13 стойкость твердосплавной торцовой фрезы $D = 110 \text{ мм}$ составляет $T = 180 \text{ мин}$.

7. Скорость резания, число оборотов и минутная подача. По табл. 22 для фрезерования стали с $\sigma_b = 75 \text{ кг/мм}^2$ при $B = 2,5 \text{ мм}$ и $s_z = 0,18 \text{ мм/зуб}$ торцовой фрезой с пластинками твердого сплава Т15К6, диаметром $D = 110 \text{ мм}$, с числом зубьев $z = 4$, при стойкости $T = 180 \text{ мин}$ устанавливаем: $v = 249 \text{ м/мин}$; $n = 720 \text{ об/мин}$; $s_m = 450 \text{ мм/мин}$.

В виду того что обрабатываемая заготовка имеет $\sigma_b = 65 \text{ кг/мм}^2$, по той же таблице определяем поправочный коэффициент в зависимости от механических свойств заготовки. Для стали $\sigma_b = 65 \text{ кг/мм}^2$ поправочный коэффициент $k_{mv} = k_{mn} = k_{msm} = 1,12$.

Тогда с учетом поправочного коэффициента $v = 249 \times 1,12 = 280 \text{ м/мин}$; $n = 720 \times 1,12 = 805 \text{ об/мин}$; $s_m = 450 \times 1,12 = 505 \text{ мм/мин}$.

¹ Диаметры и числа зубьев отдельных типов фрез, принятые в нормативах [4], отличаются, как, например, для торцовых фрез с пластинками твердых сплавов от диаметров и чисел зубьев, принятых в нормалах машиностроения и действующих ГОСТ. Это объясняется тем, что нормативы [4] были разработаны до выхода в свет нормалей машиностроения и действующих в настоящее время ГОСТ на фрезы.

Корректируем выбранный режим по паспортным данным станка, принимая ближайшие значения n и s_m .

Устанавливаем $n = 750$ об/мин и $s_m = 475$ мм/мин.

После корректировки определяем фактическую скорость резания и подачу на один зуб фрезы

$$v = \frac{\pi D n}{1000} = \frac{\pi \cdot 110 \cdot 750}{1000} = 260 \text{ м/мин};$$

$$s_z = \frac{s_m}{n \cdot z} = \frac{475}{750 \cdot 4} = 0,158 \text{ мм/зуб}.$$

8. Проверка выбранного режима резания по мощности. По табл. 23 определяем мощность, потребную на резание.

При обработке стали с $\sigma_s = 65$ кг/мм² при $t = B_s = 60$ мм, $B = 2,5$ мм, $s_m = 475$ мм/мин твердосплавной фрезой $D = 110$ мм и $z = 4$, мощность, потребная на резание, составляет 4,6 квт. Найденное значение мощности должно быть меньше мощности на шпинделе станка, т. е.

$$N_e \leq N_s \eta,$$

$$N_s \eta = 10 \cdot 0,75 = 7,5 \text{ квт}.$$

Таким образом, выбранный режим резания по мощности станка осуществим.

ГЛАВА IV

ФРЕЗЕРОВАНИЕ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МЕТАЛЛОВ

19. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МЕТАЛЛОВ

Из большого многообразия типов труднообрабатываемых материалов ниже рассматриваются вопросы, связанные с фрезерованием коррозионностойких, жаропрочных, немагнитных и износостойких сталей, а также жаропрочных и титановых сплавов.

Условия работы инструмента при фрезеровании труднообрабатываемых сталей и сплавов значительно отличаются от условий, возникающих при точении этих металлов. При точении непрерывность образования и схода стружки по передней грани инструмента способствует стабилизации температурных условий и сил резания; влияние схватывания стружки с металлом резца здесь также меньше, чем при фрезеровании, так как непрерывно образующаяся стружка сдвигает ранее образовавшуюся стружку при неизменной температуре контакта.

При фрезеровании вопрос размещения стружки в стружечных канавках инструмента имеет первостепенное значение, так как рациональное размещение стружки обеспечивает повышение производительности процесса обработки, а нередко определяет даже самую возможность его осуществления. При точении этот вопрос не возникает.

Для прерывистого процесса резания при фрезеровании характерны резко переменные силовые и тепловые нагрузки режущей части фрезы. Кроме того, здесь большое влияние оказывают адгезионные явления — сваривание (схватывание) между стружкой и инструментом.

Высокая температура в зоне резания и большие удельные давления, характерные для процесса резания труднообрабатываемых металлов, в совокупности с их низкой теплопроводностью способствуют концентрации тепла на контактных поверхностях и прочному схватыванию (свариванию) стружки с передней гранью зуба фрезы. По выходе из контакта с обрабатываемой заготовкой стружка во многих случаях остается прочно связанной с передней гранью зуба фрезы. Естественное охлаждение зуба в период перемещения в воздухе способствует увеличению прочности этой связи. При следующем врезании приварившаяся к зубу стружка ударяется об обрабатываемый материал и вызывает выкрашивание частиц лезвия или скалывание тонкого слоя пластинки твердого сплава инструмента.

Если прочность схватывания невелика, то стружка отделяется по окончании контакта зуба фрезы с обрабатываемой заготовкой, не вызывая повреждения режущей части инструмента.

Прочность схватывания стружки и поверхности зуба фрезы зависит от свойств материала обрабатываемой заготовки и инструмента, силы резания и температуры в зоне контакта. Последние два параметра во многом зависят от размеров среза при входе и выходе зуба.

Различные обрабатываемые материалы по-разному схватываются (свариваются) с инструментальными материалами — быстрорежущей сталью и твердыми сплавами.

Температура резания определяет возможность и интенсивность осуществления процесса схватывания контактных поверхностей. При низкой температуре резания сваривание стружки с материалом зуба фрезы, по-видимому, не происходит; повышение температуры резания способствует усилению прочности сваривания.

Измерения показывают, что за время одного оборота фрезы температура контакта резко изменяется. Средняя температура контакта устанавливается чрезвычайно быстро, через 0,002—0,003 сек, после вступления зуба фрезы в работу. По выходе зуба из соприкосновения с обрабатываемым материалом температура его режущей части также быстро снижается до $\frac{1}{3}$ величины, возникающей при резании. При дальнейшем движении зуба в воздухе (до следующего врезания) температура вследствие теплопередачи и вентиляционного эффекта снижается до 100—150°. Резкое снижение температуры происходит из-за низкой теплоемкости твердого сплава.

Сравнение работоспособности различных твердых сплавов приводит к выводу, что вольфрамовый твердый сплав ВК8 будет испытывать меньшие температурные напряжения, чем сплав Т15К6, так как коэффициент теплопроводности сплава Т15К6 в 3 раза меньше чем у сплава ВК8.

Одной из особенностей фрезерования труднообрабатываемых материалов, обладающих в большинстве случаев высокой пластичностью и прочностью, является образование прочного заусенца на выходе зуба фрезы из обрабатываемой заготовки. Если зуб фрезы выходит из контакта при малой толщине среза, то образуется тонкий заусенец, мало влияющий на стойкость инструмента; при увеличении толщины среза — это прочный слой металла, который не срезается, а выдавливается

в направлении выхода зуба, подвергаясь при этом растяжению. При отрыве стружки на узкую контактную площадку передней грани зуба фрезы действуют силы сопротивления разрыву металла образовавшегося заусенца. Эти силы обуславливают появление и развитие мельчайших трещин в слоях инструментального материала, прилегающих к режущей кромке зуба фрезы перпендикулярно к ней.

Увеличение трещин приводит к образованию проточин, а затем и к выкрашиванию режущей кромки инструмента. Длина проточин определяет величину износа по задней грани зуба фрезы.

Таким образом, при фрезеровании труднообрабатываемых сталей и сплавов инструмент изнашивается ускоренно под воздействием повышенных напряжений, обуславливаемых односторонним приложением нагрузки при врезании и выходе фрезы; вследствие появления трещин на режущей части зуба фрезы при отрыве прочного заусенца (вязкий металл, увеличенная толщина среза на выходе зуба), а также из-за схватывания стружки с передней гранью зуба фрезы и последующего выкрашивания (скалывания) с нее частиц твердого сплава.

Указанные особенности процесса фрезерования труднообрабатываемых материалов определяют выбор инструментального материала, конструкции фрез и режимов резания.

20. ФРЕЗЕРОВАНИЕ ТОРЦОВЫМИ ФРЕЗАМИ

Обработка коррозионностойких сталей быстрорежущими фрезами. Фрезерование коррозионностойких сталей производилось торцовыми фрезами из быстрорежущей стали марки P18.

Наблюдения показывают, что износ быстрорежущих торцовых фрез при обработке коррозионностойких сталей происходит в основном по задней грани зубьев. В качестве критерия затупления фрезы следует принять ширину износа $h_z = 0,5—0,6$ мм. При большей ширине h_z интенсивность истирания нарастает и вскоре наступает катастрофический износ зубьев фрезы.

В результате опытов, выполненных фрезами с различными передними (в пределах $5—25^\circ$) и задними (в пределах $5—20^\circ$) углами, установлено, что наиболь-

шая стойкость быстрорежущих фрез достигается при переднем угле $\gamma = 18^\circ$ и заднем угле $\alpha = 15^\circ$

Режимы фрезерования коррозионностойких сталей 1Х13 и 2Х13 быстрорежущими торцовыми фрезами приведены в табл. 27.

Таблица 27

Режимы фрезерования коррозионностойких сталей 1Х13, 2Х13, $\sigma_B = 60-66 \text{ кг/мм}^2$ быстрорежущими торцовыми фрезами Р18 (работа с охлаждением эмульсией). Стойкость фрез 180 мин

D в мм		t в мм	B в мм			
			3—5		7—10	
			v в м/мин	s _z в мм/зуб	v в м/мин	s _z в мм/зуб
75	10	30	69—65	0,20—0,17	63—60	0,13—0,10
90	10	60	67—63	0,17—0,13	59—56	0,13—0,10
150	16	80	65—60	0,17—0,13	58—55	0,13—0,10

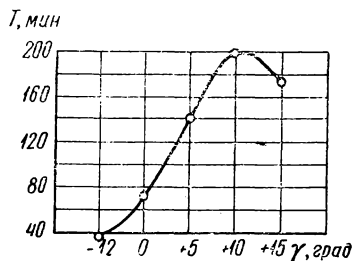
Обработка коррозионностойких сталей без корки твердосплавными фрезами. Правильный выбор марки твердого сплава оказывает большое влияние на процесс фрезерования коррозионностойких сталей.

Сравнительные испытания твердых сплавов ВК8, Т5К10, Т15К6 проведены при фрезеровании брусков без корки размерами $40 \times 40 \times 300 \text{ мм}$ из стали 1Х13. Фрезы диаметром 150 мм ($z = 5$) имели следующую геометрию режущей части: задний угол $\alpha = 20^\circ$, передний угол $\gamma = 10^\circ$, углы в плане $\varphi = 65^\circ$, $\varphi_1 = 20^\circ$, угол наклона режущей кромки $\lambda = 0^\circ$. В качестве критерия затупления фрезы была принята ширина истирания по задней грани зуба $h_z = 0,7 \text{ мм}$. Опыты производились при глубине резания $B = 2 \text{ мм}$, подаче $s_z = 0,09 \text{ мм/зуб}$, ширине фрезерования $t = 40 \text{ мм}$ и при переменной скорости резания $v = 100-275 \text{ м/мин}$.

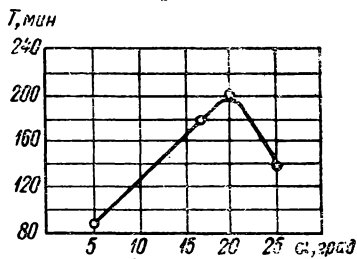
По результатам испытаний следует рекомендовать для фрезерования стали 1Х13 без корки при скорости резания $v = 100 \text{ м/мин}$ твердые сплавы ВК8 и Т5К10, а при более высоких скоростях резания ($v = 150-300 \text{ м/мин}$) — сплав Т5К10.

Фрезерование коррозионностойких сталей по корке с неравномерным припуском должно производиться с шириной фрезерования $B=4-8$ мм инструментами, оснащенными твердыми сплавами ВК8 и Т5К10 [17].

Геометрия торцовых твердосплавных фрез (ВК8 и Т5К10) установлена при фрезеровании стали марки 1Х13 с шириной фрезерования $B=2$ мм, со скоростью резания $v=100$ м/мин и подачей $s_z=0,1$ мм/зуб.



Фиг. 32. Зависимость стойкости T твердосплавных фрез от величины переднего угла γ ($h_s = 0,6$ мм).



Фиг. 33. Зависимость стойкости T твердосплавных фрез от величины заднего угла α ($h_s = 0,6$ мм).

Выявлено, что с увеличением переднего угла от -10° до $+10^\circ$ стойкость фрезы возрастает, а при больших углах — снижается. Следовательно, оптимальным передним углом является $\gamma = 10^\circ$ (фиг. 32).

Опыты с фрезами, имевшими различные задние углы, показали, что наименьший износ, а следовательно, и большая стойкость соответствуют для твердого сплава ВК8 заднему углу 15° , а для сплава Т5К10 — $15-20^\circ$ (фиг. 33).

Уменьшение главного угла в плане φ от 80 до 45° способствует уменьшению интенсивности износа фрезы вследствие снижения удельной нагрузки на единицу длины режущей кромки. В пределах $\varphi = 45-60^\circ$ стойкость фрезы остается примерно одинаковой.

Уменьшение угла φ до величины меньшей 45° приводит к выкрашиванию режущей кромки зубьев фрезы. Таким образом, оптимальными углами φ являются углы, равные $45-60^\circ$.

Наличие фаски шириной $0,2$ мм на передней грани способствует увеличению стойкости вследствие упроч-

няющего действия фаски против выкрашиваний твердосплавной пластинки.

На основе рассмотренных опытов установлена следующая зависимость для скорости резания при фрезеровании без охлаждения стали 1X13 с $\sigma_b = 68-78$ кг/мм² твердосплавными фрезами Т5К10

$$v = \frac{182 D^{0,2}}{T^{0,3} s_z^{0,5} B^{0,1} t^{0,2}} \text{ м/мин.}$$

Формула действительна для подач $s_z = 0,45-0,12$ мм/зуб и скоростей резания $v = 168-353$ м/мин. Критерий затупления фрезы — ширина истирания по задней грани $h_z = 0,7$ мм.

При стойкости фрез Т5К10, равной 180 мин (работа без охлаждения), рекомендуются следующие режимы резания:

Подача s_z в мм/зуб	Скорость резания v в мм/мин
0,12	140—150
0,09	175—185
0,045	240—250

Обработка коррозионностойкой стали с коркой твердосплавными фрезами. В производственных условиях при предварительной обработке заготовок из коррозионностойких сталей необходимо обеспечить производительное срезание наружных слоев с коркой. Приводятся данные опытов, посвященных этому вопросу. Исследование [17] выполнено в цеховых условиях при фрезеровании 2400 шт. заготовок ($\sigma_b = 68$ кг/мм², $\sigma_T = 45$ кг/мм², $\delta = 20\%$, $\psi = 60\%$, HB180—230) сечением 50×50 и 60×60 мм из стали 1X13.

В работе было обращено внимание на жесткость фрезы и достаточные размеры твердосплавных пластинок. Фреза диаметром 160 мм с корпусом высотой 100 мм имела 8 зубьев с сечением 20×20 мм. Ножи устанавливались в корпусе фрезы с помощью приспособления с индикатором; точность установки зубьев 0,03—0,05 мм (биение режущих кромок фрезы относительно ее центрального отверстия). Жесткое закрепление зубьев достигалось клиновыми кулачками. Пластины твердого сплава имели увеличенную толщину — 7 мм.

Были испытаны твердые сплавы — ВК8 и Т5К10. Установлена пригодность обоих сплавов для обработки по корке, причем сплав ВК8 показал преимущество при обработке грубой корки со значительными неровностями при скорости резания около 100 м/мин. Сплав Т5К10 целесообразно применять для резания более ровных слоев с коркой при повышенных скоростях резания.

Наиболее высокая стойкость фрез достигнута при следующей геометрии режущей части: задний угол $\alpha = 15^\circ$, передний угол $\gamma = 10^\circ$, главный угол в плане $\varphi = 45^\circ$, угол наклона режущей кромки $\lambda = 0^\circ$, вспомогательный угол в плане $\varphi_1 = 8^\circ$; переходная кромка, расположенная под углом φ_0 , имеет ширину 0,5—1 мм; на передней грани зуба у режущей кромки имеется фаска шириной 0,2 мм под углом $\gamma_f = 0^\circ$

Допускаемое затупление фрезы определялось истиранием задней грани зуба на ширину $h_z = 0,8—1,2$ мм. Такое затупление фрезы характеризуется некоторыми наглядными признаками: тонкий конец стружек нагревается до красного каления, после остывания стружка приобретает синюю окраску; на поверхности резания появляются выступы и риски.

Дальнейшая работа фрезы приводит к выкрашиванию ее режущих кромок; суммарная стойкость фрезы при этом снижается.

Стойкостные опыты производились при ширине фрезерования до $B = 8$ мм и скорости резания $v = 100—156$ м/мин, подаче на зуб s_z от 0,05 до 0,14 мм. В результате выведена следующая зависимость для фрезы, оснащенной твердым сплавом ВК8; работа без охлаждения

$$v = \frac{23}{T^{0,4} B^{0,25} s_z^{1,8} \left(\frac{t}{D}\right)^{0,2}} \text{ м/мин.}$$

Выполненное исследование и практика эксплуатации фрез на заводе позволяют рекомендовать следующие режимы резания для торцового фрезерования коррозионностойких сталей по корке фрезами, оснащенными твердыми сплавами ВК8: ширина фрезерования $B = 8$ мм, подача на зуб $s_z = 0,1$ мм/зуб, скорость резания $v = 100—110$ м/мин. Стойкость фрезы при этих режимах

находится в пределах $T = 180—300$ мин в зависимости от твердости заготовок.

На Горьковском заводе фрезерных станков черновое фрезерование коррозионнотстойкой стали применено вместо строгания при обработке тяжелых длинных деталей ($300 \times 300 \times 6500$ мм) весом в несколько тонн каждая [18]. Работа выполнялась на бесконсольнофрезерном станке типа 6А54 с мощностью главного двигателя в 37 квт. В качестве режущего инструмента были использованы фрезы диаметром 450 мм с десятью зубьями, оснащенными твердым сплавом Т5К10. Вставные зубья затачивали отдельно от корпуса фрезы, а затем устанавливали в нем с помощью индикаторного приспособления. Биение режущих кромок фрезы проверялось на станке. Оно составляло не более 0,06 мм по торцу фрезы и до 0,05 мм по ее периферии.

Геометрические параметры фрезы характеризовались отрицательным передним углом $\gamma = -5^\circ$ и большим углом наклона главной режущей кромки $\lambda = 15^\circ$. В остальной геометрии зубьев фрезы была обычной — задний угол $\alpha = 14^\circ$; углы в плане $\varphi = 60^\circ$ и $\varphi_1 = 10^\circ$.

Предварительные опыты были проведены при следующих режимах резания: глубина резания $t = 260$ и 270 мм, подача $s_z = 0,08—0,12$ мм/зуб ($s_{м} = 50—96$ мм/мин), скорость резания $v = 89$ и 113 м/мин; ширина фрезерования $B = 10—18$ мм.

Затупление фрезы характеризовалось истиранием по задней грани зубьев на ширину до 1,5 мм. Стойкость фрезы составляла 180 мин.

Дальнейшая обработка осуществлялась при подаче $s_z = 0,12$ мм/зуб ($s_{м} = 118$ мм/мин) и скорости резания $v = 141$ м/мин. При этих режимах резания стойкость составляла 180 мин; ширина затупления по задней грани ее зубьев $h_z = 1,5—2$ мм.

Попытки применить для рассматриваемой обработки твердый сплав Т15К6 не дали положительных результатов вследствие выкрашивания зубьев фрезы.

Чистовое фрезерование коррозионнотстойкой стали в тех же условиях производилось фрезой диаметром 400 мм с двенадцатью зубьями, оснащенными твердым сплавом Т15К6. Геометрия режущей части зубьев фрезы была примерно такой же, как и при черновом фрезеровании.

Лучшие результаты при чистовом фрезеровании были достигнуты при скорости резания около 200 м/мин и подаче на зуб 0,07 мм. Ширина фрезерования изменялась от 0,3 до 3 мм. Чистота обработанной поверхности при этом соответствовала классу $\nabla 6$.

Торцовое фрезерование жаропрочных сталей. Торцовое фрезерование жаропрочных сталей 1X18H9T, ЭИ257, ЭИ417 и других близких к ним по обрабатываемости, а также сталей с более низкой обрабатываемостью, содержащих повышенное количество углерода ($C = 0,25—0,60\%$) производится твердосплавными и быстрорежущими фрезами.

Для торцового фрезерования жаропрочных сталей и сплавов следует рекомендовать твердосплавные фрезы во всех случаях, когда по условиям обработки обеспечивается нормальный характер их износа — отсутствие выкрашиваний и сколов твердосплавной части зубьев. Чем ниже обрабатываемость жаропрочного металла или грубее обрабатываемые поверхности, тем менее эффективно применение твердых сплавов. В дальнейшем приведены рекомендации по обработке жаропрочных сталей как быстрорежущими, так и твердосплавными фрезами.

Быстрорежущие торцовые фрезы для обработки жаропрочных сталей изготавливаются преимущественно из быстрорежущих сталей Р18 или Р9К5. Заточка фрез производится «на остро»; не допускаются завалы режущих кромок или зазубрины. Фрезы должны иметь минимальное биение — после установки на станок биение не должно превышать 0,05 мм.

Большое влияние на стойкость фрез и производительность обработки оказывает состав смазывающе-охлаждающей жидкости. Рекомендуется водный раствор 10-процентного эмульсола и 2% сульфозрезола. Количество жидкости, подаваемой к зоне резания, до 20 л/мин. При работе без охлаждения скорость резания снижается на 30—40%.

Нормальное затупление торцовых быстрорежущих фрез характеризуется истиранием по задней грани зуба $h_z = 0,6—0,8$ мм. Стойкость этих фрез обычно принимается равной $T = 180$ мин. При необходимости увеличения стойкости до $T = 300$ мин скорость резания снижают до 85—90%. При повышении скорости резания на 20% стойкость фрезы снижается от 180 до 60 мин.

Режимы резания для обработки некоторых жаропрочных сталей торцовыми быстрорежущими фрезами приведены в табл. 28.

Таблица 28

Режимы фрезерования жаропрочных сталей и сплава ЭИ787 быстрорежущими торцовыми фрезами с охлаждением эмульсией [отношение глубины фрезерования (ширины заготовки) к диаметру

$$\text{фрез } \frac{t}{D} = 0,5-0,7]$$

Обрабатываемый материал	Материал режущей части фрезы	B в мм	s_z в мм/зуб	v в м/мин	Стойкость T в мин
ЭИ417 $\sigma_b = 58 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$	P18	2	0,20	28—22	180
		5	0,15		
		10	0,08		
ЭИ481	P18 или P9K5	2	0,20	25—20	90—120
		5	0,10		
ЭИ787	P18 или P9K5	2—5	0,10—0,06	9—7	60

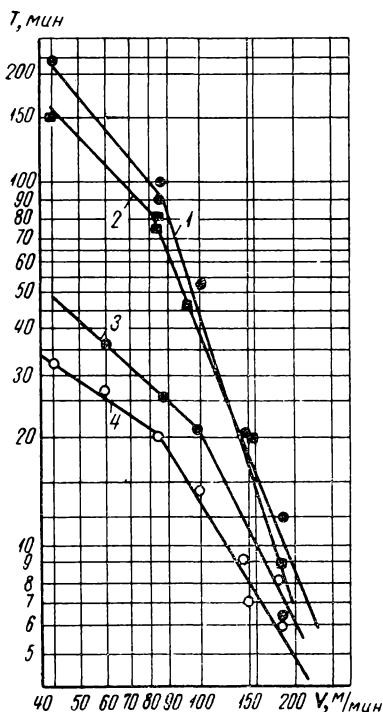
Обработка стали 1X18H9T фрезами, оснащенными твердыми сплавами ВК8, ВК6, Т14К8 и Т15К6, проведена при скоростях резания v в пределах от 40 до 200 м/мин, $B = 2$ мм, $s_z = 0,1$ мм/зуб, $t = 70$ мм, $D = 130$ мм.

Наибольшую стойкость показали фрезы ВК8 (фиг. 34). Стойкость фрез Т15К6 и Т14К8 ниже в 3—4 раза по сравнению с фрезами ВК8. Стойкость фрез ВК6 ниже, чем у фрез ВК8, на 20—30% (скорость резания менее 100 м/мин). В качестве критерия затупления твердосплавной фрезы рекомендуется принимать износ по задней грани зубьев $h_z = 0,5$ мм.

Основные геометрические параметры фрезы соответствуют параметрам, указанным для твердосплавных фрез (стр. 115), за исключением угла λ , который рекомендуется принимать равным 10° . Кроме того, нижний

предел угла φ следует уменьшить до 30° , а переходную кромку выполнить по радиусу $r = 1$ мм.

При обработке стали 1X18H9T наибольшее влияние на стойкость торцовых фрез ВК8 оказывает скорость резания. Увеличение скорости резания v от 40 до 200 м/мин приводит к уменьшению стойкости фрезы от 215 до 12 мин.



Фиг. 34. Стойкость T торцовых твердосплавных фрез при обработке стали 1X18H9T ($s_z = 0,1$ мм/зуб; $B = 2$ мм; $t = 70$ мм; $D = 130$ мм) в зависимости от скорости резания v :

1 — фреза ВК8; 2 — фреза ВК6;
3 — фреза Т14К8; 4 — фреза Т15К6.

Наиболее благоприятным для стойкости является диапазон подач s_z от 0,1 до 0,25 мм/зуб. Дальнейшее увеличение подачи вызывает выкрашивание режущих кромок зубьев фрезы.

Ширина фрезерования B оказывает на стойкость фрезы меньшее влияние, чем подача: с увеличением B от 1—2 мм до 6—7 мм стойкость фрез снижается в 2—3 раза (от 125—135 мин до 40—65 мин). Ширина обрабатываемой заготовки (глубина фрезерования) оказывает на стойкость фрез несколько меньшее влияние, чем подача. Режимы резания жаропрочной стали ЭЯ1Т и некоторых других жаропрочных сталей и сплавов торцовыми фрезами ВК8 [4] приведены в табл. 29.

Для фрезерования стали 1X18H9T торцовыми твердосплавными фрезами эффективная мощность подсчитывается по формуле

$$N_e = 5,9 \cdot 10^{-5} B^{0,92} s_z^{0,78} t^{1,0} D^{-0,15} z^{1,1} \text{ нМ квт},$$

где M — коэффициент, учитывающий степень затупления фрезы: для острых фрез $M = 1$; при износе фрез до $h_z = 0,5$ мм, $M = 1,6$.

Жаропрочная сталь марки ЭИ654, имеющая обрабатываемость примерно в 2 раза более низкую, чем сталь 1Х18Н9Т, обрабатывается торцовыми фрезами, оснащенными быстрорежущей сталью или твердыми сплавами. Твердые сплавы обеспечивают работу со скоростью резания в 3—4 раза большей, чем быстрорежущие стали. Твердый сплав ВК6М дает возможность несколько повысить скорость резания по сравнению со сплавом ВК8, а быстрорежущая сталь Р9К5 — увеличить стойкость фрезы относительно стали Р18 до 1,5 раза.

Рациональная обработка жаропрочной стали ЭИ654 ($\sigma_b = 70$ кг/мм²) быстрорежущими фрезами (Р18 и Р9К5) определяется следующими условиями: глубина резания $t = 75$ мм, подача $s_z = 0,1$ мм/зуб, ширина фрезерования $B = 2—3$ мм, скорость резания $v = 13—15$ м/мин; охлаждение эмульсией; допустимый износ зубьев фрезы по задней грани $h_z = 0,6$ мм.

Таблица 29

Режимы резания жаропрочной стали 1Х18Н9Т (ЭЯ1Т)
с $\sigma_b = 55$ кг/мм² торцовыми фрезами с пластинками ВК8
(стойкость фрез $T = 180$ мин)

$\frac{D}{Z}$	B в мм	s_z в мм/зуб до					
		0,05		0,10		0,20	
		v в м/мин	s_M в мм/мин	v в м/мин	s_M в мм/мин	v в м/мин	s_M в мм/мин
$\frac{110}{4}$	2	57	29	46,5	47	37,5	75
	4	55	28	45	45	36,5	72
	8	52	27	42,5	43	34,5	68
$\frac{150}{6}$	2	58	33	47,5	53	38,5	85
	4	57	31	46	50	37,0	81
	8	54	30	44	48	36	78
$\frac{200}{8}$	2	57	33	46,5	52	38,5	84
	4	55	31	44,5	50	36,5	80
	8	53	30	43,5	47	35	76

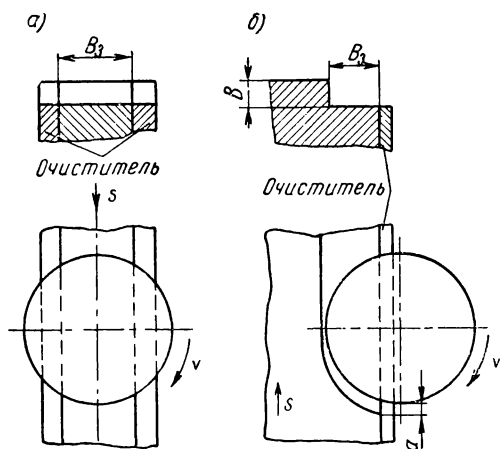
Поправочные коэффициенты для других марок жаропрочной стали			
Марка стали	В состоянии поставки	После отжига	После закалки и отпуска
	$k_{M_V} = k_{M_n} = k_{M_S_M}$		
12ХМФ	1,4	—	—
ЭИ415	—	2,3	—
15Х1М1Ф-Л	1,2	—	—
Х12ВМФ	—	2,2	—
ЭИ757	—	2,3	2,4
ЦЖ5-Л	1,6	—	—
1Х18Н9Т (ЭЯ1Т)	1,0	1,7	—
ЭИ726	—	—	—
Х23Н18 (ЭИ417)	2,1	—	2,2
1Х18Н12Т-Л	1,1	—	—
ЭИ481	0,5	—	1,2
ЭИ612	0,4	—	0,6
ЭИ607А	0,3	—	0,3
ЭИ765	—	—	0,15
ЭИ766	0,09	—	0,15

Для работы твердосплавными фрезами ВК8 или ВК6М при тех же величинах t , s_z , V и h_z скорость резания $v = 40—60$ м/мин. Работа без охлаждения.

Для обработки стали ЭИ69 твердосплавными торцовыми фрезами ВК8 по результатам стойкостных испытаний при ширине фрезерования $B = 3—7$ мм рекомендуются следующие режимы резания: глубина резания $t = 0,6D$ мм, подача на зуб $s_z = 0,1—0,2$ мм/зуб, скорость резания $v = 40—70$ м/мин. Стойкость фрезы $T = 60—180$ мин.

Торцовое фрезерование жаропрочных сплавов. Торцовое фрезерование жаропрочных сплавов производится в основном быстрорежущими фрезами; твердосплавные торцовые фрезы применяются лишь в отдельных слу-

чаях. Такой выбор материала режущей части фрез обуславливается высокими давлениями на инструмент и его активной способностью к свариванию со стружкой. Прочность приваривания стружки к зубу фрезы весьма значительна, и стружка отделяется с кусочками материала инструмента — твердого сплава, обладающего прочностью в 2—3 раза меньшей, чем закаленная быстрорежущая сталь. Выход режущей кромки из металла дол-



Фиг. 35. Схема торцевого фрезерования с очистителями: а — симметричное фрезерование; б — несимметричное фрезерование.

жен происходить при возможно меньшей, вплоть до нулевой, толщине срезаемого слоя. Выполнение этого условия достигается при работе цилиндрическими, дисковыми и фасонными фрезами по методу попутного фрезерования, а при торцевом фрезеровании — путем такого взаимного расположения обрабатываемой заготовки и фрезы, при котором толщина среза на выходе ее зуба имеет минимальное значение.

Влияние приваривания стружки на стойкость торцевых фрез подтверждается следующим опытом. На входе и выходе зуба фрезы из контакта с труднообрабатываемым металлом устанавливались полоски из стали 45 (фиг. 35), которая не сваривается с материалом фрезы.

Этим устранялись последствия приваривания стружки, так как при входе режущей кромки в сталь 45 она очищала кромку от приварившейся стружки. При ширине заготовки $B_z = 50$ мм полоски стали 45 (очистители) имели толщину 20 мм; общая ширина составляла 90 мм.

Стойкость фрез при работе с очистителями была в 10—15 раз выше, несмотря на то, что кроме труднообрабатываемого металла фрезой срезался почти такой же по толщине слой стали 45.

Фрезерование жаропрочного сплава ЭИ617 производилось с глубиной резания $t = 33—40$ мм, подачей $s_z = 0,08$ мм/зуб, скоростью резания $v = 14$ м/мин при ширине фрезерования $B = 2$ мм. При этом установлено, что стойкость фрезы, оснащенной твердым сплавом ВК8, составляет 160—170 мин.

При торцовом фрезеровании жаропрочного сплава ЭИ661, характеризующегося еще более низкой обрабатываемостью, чем сплав ЭИ617, также лучшим оказался стандартный твердый сплав ВК8.

При фрезеровании труднообрабатываемого жаропрочного сплава ЭИ867 скорость резания для твердосплавных фрез лишь в некоторых случаях превосходит скорость резания для быстрорежущих фрез (Р18, Р9К5) в 1,5—2 раза; подачи для быстрорежущих фрез выше. В то же время износ быстрорежущих фрез протекает более благоприятно — твердосплавные пластинки, как правило, выкрашиваются и даже скалываются. Режимы резания для жаропрочных сплавов (табл. 30) характеризуются невысокой скоростью резания $v = 16$ м/мин, подачей $s_z \leq 0,2$ мм/зуб и шириной фрезерования $B \leq 4—5$ мм.

Торцовое фрезерование титановых сплавов. Для фрезерования титановых сплавов отечественными и зарубежными исследователями [21 и 24] рекомендуется применение инструмента, оснащенного твердыми сплавами ВК8 и ВК4, не содержащими карбидов титана.

Особые затруднения возникают при срезании наружных слоев титанового сплава с коркой, содержащих твердые включения, которые интенсивно истирают контактные площадки инструмента. Поэтому предварительно необходимо удалить окалину путем обдужки песком или дробью и травлением.

Режимы фрезерования закаленных жаропрочных сплавов

быстрорежущими торцовыми фрезами при $\frac{t}{D} = 0,5-0,7$ (охлаждение смесью 10-процентного эмульсола в воде с добавкой 2% сульфозфрезола в количестве 10—15 л/мин; геометрия фрез: $\alpha = 15^\circ$; $\gamma = 5^\circ$; $\lambda = 0^\circ$; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_0 = 15^\circ$; $\varphi_1 = 10^\circ$ допустимый износ $h_3 = 0,4 - 0,7$ мм)

Обрабатываемый сплав	Материал режущей части фрезы	B в мм	s_z в мм/зуб	v в м/мин	Стойкость T в мин
ЭИ437А ЭИ437Б	P18 или P9K5	3—5	0,1—0,2	12—16	60
ЭИ827	P18	2—4	0,1—0,2	8—10	60
ЭИ867	P18	2—4	0,1—0,2	7—9	60
ЭИ617	P18	1—4	0,1—0,2	3,5—5	180
ЖС6	P18	1—4	0,1—0,15	1,5—2	120

Высокая склонность к схватыванию обрабатываемого материала с материалом режущего инструмента вызывает мелкие выкрашивания передней поверхности зуба фрезы, так как при последующем врезании зуба фрезы в металл стружка, приварившаяся во время предыдущего оборота, сбивается вместе с частицами передней поверхности.

Как указывалось ранее, это явление частично преодолевается применением попутного фрезерования, осуществимого при отсутствии люфтов в механизме подачи стола станка. В противном случае возможно повреждение обрабатываемой заготовки и инструмента.

Для обработки титанового сплава торцовые твердосплавные фрезы должны иметь следующие геометрические параметры ножей: задний угол $\alpha = 18^\circ$, угол наклона главной режущей кромки $\lambda = 15^\circ$, передний угол

$\gamma = 0^\circ$, главный угол в плане $\varphi = 60^\circ$, угол в плане переходной режущей кромки $\varphi_0 = 30^\circ$, вспомогательный угол в плане $\varphi_1 = 12^\circ$, длина переходной режущей кромки $f_0 = 0,6-1,0$ мм.

Режимы резания для торцового фрезерования титановых сплавов (черновая и чистовая обработка) приведены в табл. 31. Достижимая чистота обработанной поверхности соответствует классам $\nabla 5 - \nabla 6$.

Таблица 31

Режимы торцового фрезерования титановых сплавов фрезами ВК8 с охлаждением (отношение глубины фрезерования к диаметру фрезы $\frac{t}{D} = 0,5 - 0,6$; стойкость фрез $T = 40 - 60$ мин)

Марка обрабатываемого материала	Ширина фрезерования B в мм	Режимы резания		
		s_z в мм/зуб	v в м/мин	
			Фрезерование по корке	Фрезерование после снятия корки
BT1	1—4	0,05—0,1	50—70	90—100
BT5		0,05—0,08	40—50	45—60
BT3-1		0,05—0,08	20—30	35—50

Расчет средней окружной силы для торцового фрезерования титановых сплавов производится по формуле

$$P_z = 48B^{0,9} s_z^{0,62} \left(\frac{t}{D} \right)^{1,14} z \text{ кг.}$$

Зависимость P_z установлена для фрез с износом по задней грани зубьев $h_3 = 0,15$ мм; при $h_3 = 0,05$ мм поправочный коэффициент для P_z равен 0,7; при $h_3 = 0,6$ мм коэффициент равен 1,6.

Противопожарные мероприятия и техника безопасности при фрезеровании титановых сплавов. При фрезеровании сплавов титана необходимо соблюдать ряд правил, обеспечивающих предохранение от пожара и создающих безопасные условия работы.

Тонкая стружка титановых сплавов воспламеняется в воздухе при температуре $700-800^\circ\text{C}$, а пыль титана взрывоопасна и воспламеняется при температуре $330-600^\circ\text{C}$. Титан разлагает водяной пар; выделяющийся

при этом водород образует с кислородом воздуха взрывоопасную смесь. Пыль титана вредна для здоровья человека.

В целях пожарной безопасности не следует производить обработку титановых сплавов инструментом с большим затуплением — при h_z более 1 мм; скорость резания не должна превышать 100 м/мин; подача не должна быть меньше 0,06 мм/зуб.

Стружка, опилки и другие отходы обработки титановых сплавов необходимо собирать в ящики и убирать не реже одного раза в смену.

Мелкая стружка и пылевидные отходы, особенно загрязненные маслом, должны быть сожжены или закопаны в землю.

В рабочих помещениях должны быть ящики с песком для тушения горящей титановой стружки.

Торцовое фрезерование износостойкой высокомарганцовистой стали Г12. Аустенитная высокомарганцовистая сталь Г12 (ЭИ256) — сталь Гадфильда — известна как наиболее износоупорный материал, отличающийся также чрезвычайно низкой обрабатываемостью: она почти не поддается обработке быстрорежущими инструментами.

Для повышения износостойкости наличников корпусов букс их изготавливают из проката стали Г12. Поверхность наличника длиной 220 мм и шириной 150 мм обрабатывают на вертикальнофрезерном станке с двигателем мощностью $N = 14$ кВт и числом оборотов шпинделя от $n = 9,6$ до 120 об/мин; с подачей стола s_m от 7,5 до 240 мм/мин; жесткость станка удовлетворительная.

Для фрезерования используют торцовые сборные фрезы диаметром 170 мм со вставными зубьями ($z = 8$). Геометрия заточки фрез характеризуется задним углом $\alpha = 15^\circ$, передним углом $\gamma = 0^\circ$ и углом в плане $\varphi = 60^\circ$. Переходная режущая кромка прямолинейная длиной 2 мм; вспомогательный угол в плане $\varphi_1 = 8^\circ$. Ножи жестко крепятся в корпусе фрезы клиновым зажимом. Зубья фрезы оснащены твердым сплавом ВК8. Окончательная заточка фрезы производится в собранном виде.

Торцовое фрезерование стали Г12 производится с шириной фрезерования $B = 3$ мм, подачей $s_z = 0,04$ мм/зуб ($s_m = 23$ мм/мин) и скоростью резания $v = 34$ м/мин. Глубина резания $t = 150$ мм.

Стойкость фрез между переточками $T = 3-4$ ч. Износ при этом характеризуется истиранием по задней грани $h_z = 0,6-0,8$ мм.

21. ФРЕЗЕРОВАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ФРЕЗАМИ

Обработка коррозионностойких сталей быстрорежущими фрезами. Для обработки коррозионностойких сталей применяют цилиндрические фрезы с крупным и мелким зубьями по ГОСТ 3752—59, а при черновой обработке, с использованием фрез диаметром более 100 мм — фрезы со вставными зубьями. Материалом режущей части фрез являются быстрорежущие стали P18, P9K5 и P9.

Износ цилиндрических быстрорежущих фрез характеризуется истиранием их зубьев по задней грани. Допустимая ширина истирания, обеспечивающая длительный срок службы фрез, $h_z = 0,5$ мм. При работе быстрорежущими фрезами следует применять содово-мыльную эмульсию в количестве 20—25 л/мин. Для фрезерования сталей марок 1X13, 2X13 цилиндрическими фрезами P18 с охлаждением рекомендуются режимы резания, приведенные в табл. 32. При работе без охлаждения скорость резания, выбранную по табл. 32, необходимо снижать на 40%.

Таблица 32

Режимы фрезерования коррозионностойких сталей 1X13 и 2X13 $\sigma_b = 60-66$ кг/мм² цилиндрическими фрезами P18 с охлаждением (стойкость фрез $T = 180$ мин)

D в мм	z	B в мм	s_z в мм/зуб	t в мм (не более)					
				v в м/мин	s_m в мм/мин	v в м/мин	s_m в мм/мин	v в м/мин	s_m в мм/мин
63	8	50	До 0,07	60	330	58	236	56	180
80	10	60	0,2—0,1	63	285	60	204	58	150
100	12	75	0,2—0,1	66	366	63	206	59	200
150	12	100	0,2—0,1	73	325	67	240	62	160

Для фрезерования коррозионностойких сталей 3X13 и 4X13 цилиндрическими фрезами скорости резания,

принятые для сталей 1X13 и 2X13, должны быть уменьшены примерно на 10%.

Обработка жаропрочных сталей быстрорежущими фрезами. Обработка жаропрочной стали 1X18H9T производится цилиндрическими фрезами по ГОСТ 3752—59 из стали P9 [3]. Фрезы имеют следующую геометрию: задний угол $\alpha = 14^\circ$; передний угол $\gamma = 15^\circ$; угол наклона стружечных канавок $\omega = 40^\circ$. За критерий затупления фрез принимают истирание их зубьев по задней грани $h_z = 0,5$ мм. Охлаждение производят 5-процентной эмульсией. Режимы резания приведены в табл. 33.

Для подсчета окружной силы резания при фрезеровании стали 1X18H9T цилиндрическими фрезами применяют формулу

$$P_{окр} = 56t^{0,5} s_z^{0,5} BzD^{-0,86} \text{ кг}$$

Таблица 33

Режимы фрезерования плоскостей на деталях из жаропрочной стали 1X18H9T с $\sigma_B = 55 \text{ кг/мм}^2$ цилиндрическими фрезами из стали P9; (стойкость фрез $T = 180$ мин; работа с охлаждением)

D в мм	z	B в мм	s _z в мм/зуб	t в мм до					
				3		5		8	
				v в м/мин	s _м в мм/мин	v в л/мин	s _м в мм/мин	v в л/мин	s _м в мм/мин
63	8	50	0,2	30	245	26	210	—	—
			0,1	35	142	31	126	—	—
80	10	60	0,3	27	321	24	298	22	264
			0,2	30	240	27	214	24	192
			0,1	35	140	31	123	28	111
100	12	75	0,3	27	310	22	252	21	241
			0,2	29	221	24	185	24	185
			0,1	34	130	29	119	28	107
150	12	100	0,4	—	—	23	235	20	202
			0,3	—	—	24	184	22	169
			0,2	—	—	27	137	24	122

Для фрезерования жаропрочных сталей ЭИ481 и ЭИ654 цилиндрическими фрезами из стали Р18 рекомендуются режимы резания, приведенные в табл. 34.

Таблица 34

Режимы фрезерования плоскостей на деталях из жаропрочных сталей ЭИ654 и ЭИ481 цилиндрическими фрезами из стали Р18 (работа с охлаждением; стойкость фрезы $T = 90$ мин; критерий затупления фрезы — износ по задней грани зубьев $h_z = 0,5$ мм)

D в мм	B в мм	t в мм	Сталь ЭИ654		Сталь ЭИ481		
			s_M в мм/мин	v в м/мин	s_M в мм/мин	v в м/мин	
60	8	50	1—3	50—80	13—32	50—75	18—27
				80—100	9—18	120—170	15—22
80	10	65	1—3	48—74	13—32	50—75	20—30
				70—120	8—18	120—170	16—24
100	12	80	1—3	50—85	13—32	45—75	21—31
				80—120	7—18	130—180	17—25

Обработка жаропрочной стали твердосплавными фрезами. Наблюдения за цилиндрическими фрезами, оснащенными твердым сплавом ВК8, показывают, что при обработке жаропрочных материалов износ зубьев фрезы происходит в основном по задней грани в виде ленточки истирания примерно одинаковой ширины. В первые 10—15 мин работы фрезы износ достигает ширины $h_z = 0,15—0,2$ мм, затем он постепенно увеличивается до $h_z = 0,5—0,55$ мм. Дальнейшая работа фрезой вызывает ускоренное истирание пластинки твердого сплава и нередко выкрашивание режущей кромки [20].

Общая зависимость скорости резания при обработке стали 1Х18Н9Т фрезами ВК8 выражается следующей формулой

$$v = \frac{C_v}{T^{0,55} f^{0,29} s_z^y B^{0,24} z^{0,14}} \text{ м/мин,}$$

где C_v и y_v в зависимости от подачи имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} \text{при } s_z < 0,2 \text{ мм/зуб } C_v &= 3000, y_v = 0,154; \\ \text{при } s_z \geq 0,2 \text{ мм/зуб. } C_v &= 1220, y_v = 0,72. \end{aligned}$$

Общая зависимость эффективной мощности от влияющих на нее факторов выражается следующей формулой

$$N_e = 3,13 \cdot 10^{-5} s_z^{0,75} t^{0,82} BD^{0,125} z k_N \text{ квт},$$

где k_N — коэффициент, зависящий от марки обрабатываемого жаропрочного материала (табл. 35).

Таблица 35

Поправочные коэффициенты k_N для определения мощности в зависимости от марки обрабатываемого материала

Марка обрабатываемого материала	1Х18Н9Т	ЭИ654	ЭИ437Б	ЭИ598	ВТ1Д	ВТ2
Коэффициент	1,0	1,33	1,81	2,41	0,87	0,98

Обработка жаропрочных сплавов. Фрезерование жаропрочных сплавов производится цилиндрическими фрезами из стали Р18 и фрезами с пластинками твердого сплава ВК8. В связи с большой вязкостью, жаропрочные сплавы сильно деформируются в процессе резания; продольная усадка стружки достигает большой величины. Даже небольшое затупление инструмента приводит к значительным затруднениям процесса резания и к увеличению сил, действующих на лезвие инструмента и часто приводит к выкрашиванию твердосплавных зубьев фрез. Поэтому для цилиндрических фрез допустимый износ зубьев по задней грани ограничивают величиной $h_z = 0,3—0,4$ мм, а передний угол цилиндрических твердосплавных фрез с пластинками ВК8 увеличивают до $\gamma = 15—20^\circ$. Весьма желательно фрезерование производить по подаче.

Цилиндрическое фрезерование жаропрочных сплавов характеризуется невысокими скоростями резания и подачами. При обработке быстрорежущими фрезами Р18 жаропрочных сплавов, близких по обрабатываемости к сплавам ЭИ435 и ЭИ437, применяют следующие режимы резания: глубина резания t до 6 мм, подача на зуб s_z в пределах 0,04—0,08 мм, скорость резания $v = 7—12$ м/мин. Для наиболее труднообрабатываемых жаропрочных сплавов ЭИ617, ЭИ661, ЖС6 и им подобных приведенные режимы резания следует снижать

в 2—3 раза: скорость резания $v = 3—5$ м/мин; подача 0,03—0,8 мм/зуб; глубина резания $t = 2—6$ мм; работа с охлаждением.

Для обработки жаропрочных сплавов ЭИ437Б и ЭИ598 цилиндрическими твердосплавными фрезами с винтовыми пластинками рекомендуют применять следующие режимы резания: глубина резания $t = 1—4$ мм; скорость резания $v = 30—18$ м/мин. Подачи для этих сплавов $s_z = 0,07—0,2$ мм/зуб. Ширина фрезерования $B = 20—65$ мм. Чистота обработанной поверхности соответствует $\nabla 5—\nabla 6$.

Обработка титановых сплавов. Для обработки титановых сплавов применяются быстрорежущие и твердосплавные цилиндрические фрезы. По отечественным данным обе группы инструментальных материалов пригодны для этой цели. По зарубежным данным, твердые сплавы непригодны для прерывистого резания титановых сплавов; для этой цели они рекомендуют быстрорежущие стали или литые сплавы.

Наилучшие результаты фрезерования достигаются путем применения инструментов из сталей, содержащих ванадий и кобальт, а также хром и кобальт (содержание кобальта 8—7%).

Фрезы для обработки титановых сплавов должны иметь крупные зубья и вместительные канавки для выхода стружки. Весьма пригодными для этой цели являются цилиндрические фрезы с крупным зубом по ГОСТ 3752—59, изготовленные из кобальтовых быстрорежущих сталей Р18Ф2К5 и Р10К5Ф5, или из стали Р18, а также твердосплавные фрезы с винтовыми пластинками ВК8.

Для быстрорежущих фрез рекомендуются: задний угол $\alpha = 18^\circ$, передний угол $\gamma = 5^\circ$. Увеличение переднего угла до $\gamma = 15^\circ$ или уменьшение заднего угла до $\alpha = 10^\circ$ вызывает снижение скорости резания на 15—20%. Увеличение угла наклона стружечных канавок фрезы ω от 20 до 45° обеспечивает возможность повышения скорости резания на 30—50%. Для твердосплавных фрез ($D = 130$ мм, $z = 8$) оптимальное значение переднего и заднего углов $\gamma = \alpha = 15^\circ$. Угол $\omega = 20^\circ$.

Рекомендуемые режимы резания для обработки титановых сплавов быстрорежущими цилиндрическими фрезами приведены в табл. 36 и 37

Таблица 36

Режимы фрезерования плоскостей на деталях из титанового сплава ВТ6 цилиндрическими фрезами из стали Р18 (работа с охлаждением; стойкость фрезы $T = 120$ мин)

D в мм	B в мм	t в мм	s_z в мм/зуб					
			0,05	0,1	0,2	0,4	0,6	
			v в м/мин					
60	8	45	2	36	29	22	17	14
			4	29	24	18	14	12
			8	24	19	15	11	9
75	8	60	2	37	30,5	23	18	15
			4	30	25	19	14	12
			8	25	20	16	12	10
90	10	70	4	31	26	20	15	13
			8	26	21	16	12	10

Таблица 37

Режимы фрезерования плоскостей на деталях из титанового сплава ВТ3-1 цилиндрическими фрезами из стали Р18 (работа с охлаждением; стойкость фрезы $T = 120$ мин)

D в мм	B в мм	t в мм	s_z в мм/зуб					
			0,05	0,1	0,2	0,4	0,6	
			v в м/					
60	8	45	2	40	33	25	19	16
			4	32	27	21	15	13
			8	26	22	16,5	12,5	10,5
75	8	60	2	40	34	26	20	17
			4	34	28	22	16	14
			8	28	23	17	13	12
90	10	70	4	35	29	22	17	14
			8	28,5	23,5	18	13	11

В качестве смазывающе-охлаждающих жидкостей при обработке титановых сплавов быстрорежущими фрезами за рубежом рекомендуют применять смесь серы и хлора с органическими или минеральными маслами (10% хлора, 3% серы, 2,7% жирного масла). По данным зарубежной практики, применение этой жидкости позволяет повысить стойкость режущих инструментов в 3 раза. Отмечается, что добавка серы наиболее положительно влияет на процесс резания с большим сечением среза и при высоких скоростях резания, а добавка хлора — при малых глубинах и скоростях резания. Смазочно-охлаждающие жидкости желательно подавать под давлением.

При фрезеровании титановых сплавов большое значение имеет жесткость системы станок — приспособление — инструмент — деталь.

Обработку титановых сплавов быстрорежущими и твердосплавными цилиндрическими фрезами рекомендуется вести по подаче. В этом случае ослабляется схватывание титановой стружки с материалом режущего инструмента, вследствие чего фрезы реже выкрашиваются.

22. ФРЕЗЕРОВАНИЕ КОНЦЕВЫМИ ФРЕЗАМИ

Обработка коррозионностойких сталей. При обработке коррозионностойкой стали целесообразно применять концевые фрезы усовершенствованных конструкций по ГОСТ 8237 — 57 с углом $\varphi = 35—45^\circ$, изготовленные из быстрорежущих сталей. Эти фрезы показывают высокую производительность как при больших, так и малых глубинах резания, а также при фрезеровании пазов в деталях из коррозионностойких сталей. Режимы резания этими фрезами сталей 1X13 и 2X13 приведены в табл. 38.

Для работы по корке (особенно литейной) и при обработке закаленных коррозионностойких сталей твердостью $HRC\ 40$ следует применять фрезы с винтовыми пластинками твердого сплава ВК8 с положительным передним углом $\gamma = 5—10^\circ$

Фрезерование закаленной нержавеющей стали 18ХН13А твердостью $HRC\ 38—42$ концевыми фрезами с пластинками сплава ВК8 производится со скоростью резания $v = 120\ м/мин$ и подачей $s_m = 160\ мм/мин$. Оптимальный задний угол концевых фрез с винтовыми

Режимы фрезерования плоскостей и уступов в деталях из коррозионной стали 1X13 и 2X13 без корки фрезами P18 по ГОСТ 8237—57 с охлаждением (стойкость фрезы $T = 60$ мин)

D в мм	B в мм	s_z в мм/зуб	t в мм			
			2	5	10	
			v в м/мин			
25	5	30	0,05	74	66	—
			0,10	69	61	—
50	6	60	0,10	66	58	52
			0,15	64	56	50
			0,20	62	54	48

пластинками твердого сплава $\alpha = 16—20^\circ$ При больших задних углах происходит выкрашивание фрезы, а при малых задних углах понижается стойкость. Критерий затупления этих фрез — истирание их зубьев по задней грани $h_z = 0,3—0,4$ мм.

Обработка жаропрочных сталей. Преимущества фрез по ГОСТ 8237—57 выявляются при обработке пазов в деталях из жаропрочной стали 1X18Н9Т. Эти фрезы работают с подачами $s_z = 0,16—0,3$ мм/зуб (s_m до 235 мм/мин), в то время как обычные фрезы позволяют работать с подачами в несколько раз меньшими.

В качестве критерия затупления концевых фрез по ГОСТ 8237—57 из быстрорежущей стали P9 при обработке стали 1X18Н9Т следует принимать ширину истирания по задней грани зубьев $h_z = 0,3—0,4$ мм.

Опытные данные позволяют представить формулу для скорости резания при обработке стали 1X18Н9Т концевыми фрезами P9 в следующем виде

$$v = \frac{22,5 D^{0,35}}{T^{0,27} t^{0,2} s_z^{0,48} B^{0,03} z^{0,1}} \text{ м/мин.}$$

По этой формуле рассчитаны режимы резания, приведенные в табл. 39.

Режимы фрезерования плоскостей и уступов в деталях из жаропрочной стали 1X18H9T (незакаленной *HV* 180) концевыми фрезами Р9 с нормальным зубом (ГОСТ 8237—57) (стойкость фрезы $T = 60$ мин; работа с охлаждением)

<i>D</i> в мм	<i>z</i>	<i>B</i> в мм	<i>s_z</i> в мм/зуб	<i>t</i> в мм до					
				5		8		10	
				<i>v</i> в м/мин	<i>s_M</i> в мм/мин	<i>v</i> в м/мин	<i>s_M</i> в мм/мин	<i>v</i> в м/мин	<i>s_M</i> в мм/мин
25	5	30	0,05	53	167	48	152	—	—
			0,10	39	249	35	222	—	—
40	6	50	0,10	45	214	41	196	39	185
			0,15	37	265	33	237	32	231
			0,20	32	305	29	278	28	270
50	6	60	0,10	48	183	43	167	41	156
			0,15	40	231	36	208	34	194
			0,20	35	268	31	237	30	231

Концевые фрезы ГОСТ 8237—57 обеспечивают также высокопроизводительную обработку других жаропрочных сталей.

Сравнительные испытания при обработке жаропрочной стали ЭИ654 показывают, что стойкость концевых фрез Р9К5 в 3 раза выше стойкости фрез Р18.

Большое влияние на стойкость концевых фрез оказывает направление подачи. При фрезеровании по подаче жаропрочных материалов стойкость быстрорежущих концевых фрез повышается в 1,5—2 раза по сравнению со стойкостью этих фрез при работе против подачи. Режимы резания для обработки некоторых жаропрочных сталей концевыми фрезами приведены в табл. 40.

Для обработки жаропрочных сплавов ЭИ437 с $\sigma_s = 100—110$ кг/мм² концевыми фрезами Р18 (карбидная неоднородность не выше балла 3, твердость *HRC* 63) с крупным зубом по ГОСТ 8237—57 ($D = 32—50$ мм,

Режимы фрезерования плоскостей и уступов в деталях из жаропрочных сталей концевыми фрезами Р18 с крупным зубом (ГОСТ 8237—57) (стойкость фрезы $T=120$ мин; охлаждение эмульсией)

D в мм	B в мм	s_z в мм/зуб	t в мм	Обрабатываемая сталь			
				ЭИ811	ЭИ481 ЭИ395	ЭИ654	
				v в м/мин			
20	3	50	0,08	3	35	25	25
			0,14	3	28	20	18
40	4	40	0,1	5	35	27	25
			0,14		27	23	20
50	4	40	0,08	10	23	18	16
			0,14		5	18	15

$z=4$) при глубине резания $t=3-5$ мм рекомендуются подачи $s_z=0,05-0,12$ мм/зуб и скорости резания $v=18-10$ м/мин. Для более труднообрабатываемых жаропрочных сплавов (ЭИ787, ЭИ827 и др.) скорости резания должны быть снижены до $v=6-10$ м/мин.

Обработка титановых сплавов. Для фрезерования титановых сплавов применяются твердосплавные ВК4 и ВК8 концевые фрезы-коронки или фрезы с винтовыми пластинками по ГОСТ 8720—58. Фрезы должны иметь следующую геометрию: задний угол $\alpha=20^\circ$, передний угол $\gamma=-5^\circ$, угол наклона стружечных канавок $\omega=40^\circ$. Наряду с твердосплавными концевыми фрезами для обработки титановых сплавов применяются быстрорежущие концевые фрезы с крупным зубом (ГОСТ 8237—57) из кобальтовых быстрорежущих сталей Р9К5 и Р18К5Ф5. Фрезерование рекомендуется производить по подаче.

Режимы резания некоторых титановых сплавов приведены в табл. 41.

Режимы фрезерования плоскостей и уступов в деталях из титановых сплавов ВТ4, ВТ5 и ВТ6 концевыми фрезами (ГОСТ 8720—58) с пластинками ВК8 (допустимый износ $h_3 = 0,3$ мм; работа без охлаждения; стойкость фрез $T = 60$ мин)

В в мм	s_z в мм/зуб	t в мм					
		3		5		8	
		v в м/мин	s_M в мм/мин	v в м/мин	s_M в мм/мин	v в м/мин	s_M в мм/мин
10	0,06	112	322	103	295	90	260
	0,1	100	480	93	440	83	400
20	0,06	95	274	85	245	76	218
	0,1	85	408	78	375	68	327
40	0,06	78	225	71	203	—	—
	0,1	71	340	66	315	—	—

При использовании для фрезерования титановых сплавов марок ВТ4, ВТ5 и ВТ6 концевых быстрорежущих фрез, скорость резания снижается до $v = 20—30$ м/мин; подача $s_z = 0,05—0,1$ мм/зуб; глубина резания $t = 1—4$ мм; ширина фрезерования B до 40 мм; работа с охлаждением.

Обработка маломагнитных сталей. Стали аустенитного класса, содержащие большой процент марганца (до 17%), 3% алюминия, никель и хром, находят все большее применение в машиностроении.

Стали этого класса трудно обрабатываются вследствие низкой теплопроводности, большой упругости в процессе деформирования, а также высокой истирающей способности по отношению к инструменту.

Фрезерование проката из такой стали твердостью $НВ 280—350$ производится концевыми фрезами из стали Р18 с основными параметрами, близкими к принятым для фрез по ГОСТ 8237—57; передний угол $\gamma = 12^\circ$ задний угол $\alpha = 12^\circ$ угол наклона стружечных канавок $\omega = 30^\circ$ переходная режущая кромка-фаска $f = 2$ мм

под углом $\varphi_{\phi} = 45^{\circ}$. Диаметр фрезы 60 мм, число зубьев $z = 3$ и 8. Шаг расположения зубьев неравномерный.

Обработка производится при большой глубине резания $t = 20$ мм и ширине фрезерования $B = 15$ мм. Скорость резания, в связи с низкой обрабатываемостью этой стали, находится в пределах $v = 5-11$ м/мин. Охлаждающая жидкость — стандартная эмульсия.

Предварительные испытания, проведенные при подаче на зуб фрезы $s_z = 0,12-0,18$ мм/зуб, показали, что стойкость фрез при этом невысокая — в пределах $T = 7-17$ м/мин; износ фрезы характеризуется истиранием по задней грани на ширину $h_z = 0,4$ мм. При большем износе происходило выкрашивание зубьев.

Удовлетворительная стойкость достигалась при подачах на зуб $s_z = 0,082-0,100$ мм/зуб и скорости резания $v = 9-11$ м/мин.

В целях повышения производительности целесообразно применять фрезы с увеличенным числом зубьев. Так, при диаметре фрезы $D = 40$ мм и числе зубьев $z = 8$ производительность характеризуется подачей $s_m = 60$ мм/мин.

Стойкость фрез при этих режимах резания составляет 60 мин.

Для создания нормальных условий работы инструмента и предохранения его от выкрашивания необходимо по возможности увеличивать жесткость системы станок—приспособление—инструмент—деталь, а также обеспечить высококачественную заточку фрез и возможно меньшее их биение на станке.

23. ФРЕЗЕРОВАНИЕ ДИСКОВЫМИ ПАЗОВЫМИ ТРЕХСТОРОННИМИ И ПРОРЕЗНЫМИ ФРЕЗАМИ

Фрезерование быстрорежущими дисковыми пазовыми трехсторонними фрезами. При прорезании пазов, разрезании плит и при других аналогичных работах значительное распространение получили дисковые фрезы.

Результаты опытов по установлению зависимости стойкости фрез от параметров режима резания показывают, что влияние v , t и s_z на стойкость быстрорежущих трехсторонних фрез близка к наблюдаемой при работе цилиндрическими фрезами.

В результате опытных данных для фрезерования уступов на стали 1X18H9T трехсторонними дисковыми фрезами из быстрорежущей стали P9 получена следующая формула для скорости резания

$$v = \frac{55,5D^{0,15}}{T^{0,25} s^{0,28} t^{0,18} B^{0,14} z^{0,1}} \text{ м/мин.}$$

Стойкость фрез $T = 180$ мин. Работа с охлаждением эмульсией.

По этой формуле рассчитаны режимы резания (табл. 42). Оптимальной шириной износа, обеспечивающей длительную суммарную стойкость фрез, является $h_3 = 0,5—0,7$ мм.

Таблица 42

Режимы фрезерования жаропрочной стали 1X18H9T (незакаленной HB 180) дисковыми трехсторонними пазовыми фрезами P9 с неравномерным окружным шагом зубьев (стойкость фрезы $T = 180$ мин; работа с охлаждением)

D в мм	z	B в мм	S _z в мм/зуб	t в мм					
				10		20		30	
				v в м/мин	S _M в мм/мин	v в м/мин	S _M в мм/мин	v в м/мин	S _M в мм/мин
150	14	8	0,3	17	152	15	135	14	125
			0,2	19	112	17	91	16	86
			0,1	24	71	21	63	19	56
200	16	12	0,3	—	—	15	115	14	108
			0,2	—	—	16	83	15	77
			0,1	—	—	20	51	19	48

Для фрезерования труднообрабатываемых жаропрочных сплавов (табл. 43) применяются дисковые пазовые трехсторонние фрезы из быстрорежущей стали P18, или из кобальтовых быстрорежущих сталей. Передний угол фрез $\gamma = 10^\circ$, задний угол $\alpha = 12—15^\circ$, угол наклона

стружечных канавок $\omega \geq 15-20^\circ$. Режимы резания (табл. 43) характеризуются невысокой скоростью резания ($v \leq 12$ м/мин) и подачами на зуб $s_z \leq 0,1$ мм/зуб. Работа должна производиться на жестких станках с охлаждением.

Таблица 43

Режимы фрезерования жаропрочных сплавов дисковыми пазовыми трехсторонними фрезами из кобальтовой быстрорежущей стали Р9К10 с охлаждением эмульсией (10-процентный раствор эмульсола и 2% сульфифрезола) (стойкость фрез $T = 100-180$ мин)

Обрабатываемый сплав	Режимы резания		
	t в мм	s_z в мм/зуб	v в м/мин
ЭИ437Б	До 10	0,06—0,1	7—10
ЭИ661	2	До 0,06	2,5—4,5
ЭИ766	8	0,03—0,05	5,5—7
ЭИ787	2	0,03—0,08	6—10
ЭИ598	10	0,06—0,1	5—7,5
ЭИ617	8	0,05—0,08	4—6
ЭИ652	8	0,05—0,08	10—12
ЖС6	4	До 0,05	3—9

Фрезерование твердосплавными дисковыми пазовыми фрезами. Твердосплавные дисковые трехсторонние фрезы работают при более высоких скоростях резания, чем такие же быстрорежущие фрезы. В то же время быстрорежущие фрезы более надежны, так как у твердосплавных фрез нередко наблюдается выкрашивание режущих кромок.

Для оснащения дисковых фрез, предназначенных для обработки жаропрочных сталей и сплавов, применяют пластинки твердого сплава ВК8. Величина переднего и заднего углов здесь равна 15° . Для труднообрабатываемых сталей и сплавов передний угол уменьшается до $\gamma = 10^\circ$.

Износ твердосплавных вставных зубьев характеризуется истиранием по задней грани и у переходной режущей кромки. После того, как износ на переходной кромке

достигает $h_3 = 0,5$ мм, часто происходит выкрашивание режущей кромки. Поэтому на переходной кромке наибольший допустимый износ составляет $h_3 = 0,4$ мм; на остальной части режущей кромки износ в это время достигает $h_3 = 0,2—0,25$ мм.

Обобщенная зависимость для скорости резания при обработке жаропрочной стали 1X18H9T дисковыми пазовыми трехсторонними фрезами, оснащенными твердым сплавом ВК8, имеет следующий вид

$$v = \frac{103 D^{0,3}}{T^{0,31} t^{0,43} s_z^{0,38} B^{0,1} z^{0,1}} \text{ м/мин.}$$

Формула действительна для глубины резания $t = 5—20$ мм и подачи $s_z = 0,05—0,15$ мм/зуб, $h_3 = 0,4$ мм.

24. ФАСОННОЕ ФРЕЗЕРОВАНИЕ

Обработка коррозионностойких и жаропрочных сталей фасонными фрезами имеет значительное распространение. В массовых количествах этими фрезами обрабатываются лопатки паровых и газовых турбин — фрезерование выпуклой и вогнутой поверхностей (спинки и корыта) лопатки, а также сложного замка лопатки, которым она закрепляется в роторе. Фасонными фрезами также обрабатываются пазы в роторе турбины, служащие для установки лопаток.

При обработке наружных и внутренних профилей, а также хвостовиков лопаток паровых турбин из коррозионностойких сталей, работа выполняется на универсальных или специальных горизонтальнофрезерных станках.

Вследствие большой ширины фрезерования, а нередко и неблагоприятной геометрии фрез, возникают значительные вибрации, поэтому необходимо принимать все меры для повышения жесткости системы станок — приспособление — инструмент — деталь.

Практически, для предварительной обработки наружной поверхности лопаток из стали 1X13 ($HV 190—230$) профильной фрезой Р9 ($D = 170$ мм, $z = 10$) при ширине фрезерования $B = 40$ мм применяют следующий режим: скорость резания $v = 30—33$ м/мин, подача $s_z = 0,1—0,12$ мм/зуб, глубина резания $t = 14$ мм. При этом режиме стойкость фрез $T = 300$ мин. Работа произ-

водится с охлаждением эмульсией. Чистота обработанной поверхности соответствует классу $\nabla 4$.

При чистовой обработке наружной поверхности лопатки глубину резания снижают до $t=2$ мм, а подачу на зуб — до $s_z=0,05-0,08$ мм/зуб. Чистота поверхности при этом повышается до $\nabla 6$.

При обработке быстрорежущими фрезами внутреннего профиля лопаток (заготовка — штамповка) из коррозионностойкой стали марки 2Х13 для паровой турбины ВК-50-1 на ЛМЗ им. XXII съезда КПСС [23] применяют следующий режим резания: глубина резания $t=4$ мм, подача $s_z=0,1$ мм/зуб и скорость резания $v=23-26$ м/мин. На том же заводе при обработке лопаток из более труднообрабатываемой — жаропрочной стали ЭИ123 (фрезерование наружного и внутреннего профилей) используют другой режим резания: глубина резания $t=7-8$ мм, подача $s_m=6-15$ мм/мин и скорость резания $v=10-12$ м/мин.

Для улучшения условий обработки лопаток применяют фасонные фрезы с положительным передним углом [23]. Оптимальное значение переднего и заднего углов фрез: передний угол $\gamma=10-12^\circ$ и задний угол $\alpha=12-16^\circ$. Меньшие значения углов рекомендуются для работы с увеличенными значениями глубины резания и подачи.

Сравнительные испытания фасонных фрез с положительным передним углом, а также с радиальной передней гранью ($\gamma=0^\circ$), проведенные на ЛМЗ, показали, что фрезы с положительным передним углом дают более высокую чистоту поверхности, значительно уменьшают вибрацию станка и имеют повышенную стойкость.

Фасонные затылкованные фрезы для обработки лопаток из жаропрочной аустенитной стали изготавливаются из быстрорежущей стали Р18. Работа ими выполняется при скорости резания $v=11$ м/мин, подаче $s_z=0,01$ мм/зуб и глубине резания $t=2-3$ мм. Охлаждение эмульсией.

Весьма трудоемкой операцией является предварительная обработка пазов в роторах из жаропрочной стали ЭИ415, ЭИ673 и ЭИ726. На заводах она обычно производилась с использованием большого количества фрез: дисковых трехсторонних, концевых нормальных и фасонных — при большом числе переходов.

Для повышения производительности обработки и уменьшения количества применяемых инструментов предложена концевая фасонная фреза¹ для предварительной обработки пазов за один проход в целом материале. Фрезы изготавливаются из быстрорежущей стали Р18 и подвергаются термообработке до твердости HRC 62—64.

Наиболее целесообразный режим резания оказался следующий: средняя скорость резания $v = 7,5$ м/мин, минутная подача $s_m = 4,4$ мм/мин и подача на зуб $s_z = 0,02$ мм/зуб.

При обработке пазов в диске из стали ЭИ726 режимы резания снижаются вследствие худшей обрабатываемости этой стали по сравнению со сталью ЭИ415. Для стали ЭИ726 скорость резания $v = 5,9$ м/мин, подача в минуту $s_m = 3,9$ мм/мин, подача на зуб $s_z = 0,018$ мм/зуб. Средняя стойкость фрез составляет около 150 мин. В качестве смазывающе-охлаждающей жидкости применяется смесь из сульфозфрезола (50—60%), олеиновой кислоты (25—30%) и керосина или скипидара (15—20%). Чистота поверхности при черновом фрезеровании соответствует $\nabla 4 - \nabla 5$.

Число переточек фрезы 3—4. При большем числе переточек увеличивается припуск на чистовое фрезерование. Допустимая величина припуска для стали ЭИ415—0,4—1,1 мм; для стали ЭИ726—0,4—0,9 мм. Значительное увеличение стойкости фрез (до 2 раз) достигается путем цианирования.

Для чистовой обработки пазов ротора используются фрезы с прямыми стружечными канавками. По стали ЭИ415 режим резания был следующий: скорость резания $v = 11,5$ м/мин, подача на зуб $s_z = 0,014$ мм/зуб, подача в минуту $s_m = 8$ мм/мин, глубина резания $t = 0,8 - 1,0$ мм. Чистота поверхности после обработки чистовой фрезой соответствует классам $\nabla 6 - \nabla 7$.

В результате применения фрез новой конструкции для обработки пазов в дисках роторов под хвостовики лопаток упростилась сборка роторов, так как отпала необходимость в индивидуальных (по фактическим размерам паза) лопатках; повысилась производительность обработки вследствие уменьшения числа проходов с 18 до 2;

¹ Фреза предложена кафедрой «Станкостроение» Ленинградского политехнического института им. М. И. Калинина.

уменьшилось количество инструментов и расходы на их изготовление.

Для фрезерования хвостовиков турбинных лопаток из жаропрочных сплавов применяют профильные дисковые фрезы из быстрорежущих сталей Р18, Р9К5, Р10К5Ф5 и Р18Ф2. Твердость фрез после термообработки должна составлять *HRC* 63—66.

Высокая точность размеров профильной части хвостовика требует применения чистовых фрез с передним углом $\gamma = 0^\circ$; задние углы получаются путем затылования фрезы на шлифовальном станке.

Наблюдается, что при работе профильными дисковыми фрезами стружечные канавки быстро забиваются стружкой, что, по-видимому, связано с высоким нагреванием стружки и ее схватыванием с поверхностью стружечных канавок. Для лучшего размещения и отвода стружки целесообразно увеличивать размеры канавок, даже за счет уменьшения числа зубьев фрезы. Это способствует повышению стойкости фрезы и производительности обработки.

При обработке жаропрочных сплавов вследствие затрудненных условий работы фасонных фрез требуется их весьма тщательная заточка: зубья должны быть заточены наостро; ленточка на задней грани зуба не допускается; радиальное биение фрез в рабочем положении не должно превышать 0,02 мм. Станки и приспособления должны быть возможно более жесткими.

При обработке хвостовиков лопаток из весьма труднообрабатываемого сплава Ж6 профильной фрезой из быстрорежущей стали Р18 диаметром 85 мм с числом зубьев $z = 14$ были испытаны подачи в минуту $s_m = 12, 17$ и 24 мм/мин. Скорость резания при этом была $v = 6$ м/мин, а глубина резания $t = 2$ мм. Охлаждение эмульсией. С увеличением подачи от $s_m = 12$ мм/мин до $s_m = 24$ мм/мин, стойкость фрез снижалась от $T = 180$ мин до $T = 16$ мин. Рациональным режимом резания для этой операции будет следующий: скорость резания $v = 6$ м/мин, подача на зуб $s_z = 0,04—0,05$ мм и глубина резания t до 2 мм. Критерий затупления $h_3 = 0,2$ мм. Работа с охлаждением эмульсией.

Для жаропрочного сплава ЭИ437 при ширине фрезерования B до 15 мм, глубине резания $t = 3$ мм и подаче $s_z = 0,06—0,08$ мм/зуб скорость резания $v = 10—$

12 м/мин. Чистота поверхности при фрезеровании жаропрочных сплавов с указанными режимами резания достигает $\nabla 7 - \nabla 8$.

Таблица 44

Режим резания при обработке хвостовиков из жаропрочных сплавов профильными фрезами (ширина фрезерования $B = 20-30$ мм)

Обрабатываемый сплав	Материал режущей части фрезы	Режимы резания			Стойкость фрезы T в мин
		v в м/мин	s_z в мм/зуб	t в мм	
ЭИ437А	P18	19	0,04	3	60
ЭИ437Б	P18	15	0,05—0,06	3	40—50
	P18Ф2	16		2	
ЭИ617	P18	10	0,07	1,5	60
ЖС6К	P18	8	0,03—0,04	1,5	25
	P18Ф2	5	0,05—0,06	1,5	120—130

Режимы резания при обработке профильными фрезами хвостовиков лопаток из жаропрочных сплавов которых марок приведены в табл. 44.



СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ ЕДИНИЦАМ ИЗМЕРЕНИЙ В ТЕХНИЧЕСКОЙ
И МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМАХ ЕДИНИЦ

Физическая величина		Единицы измерения				
Наименование	Обозначение	Международная система единиц		Техническая система единиц (прежняя)		Переводной множитель
		Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение	
Длина	<i>L, l</i>	Метр	<i>м</i>	Метр	<i>м</i>	
Масса	<i>m</i>	Килограмм	<i>кг</i>	Килограмм-сила-секунда в квадрате на метр	<i>кгс · сек²/м</i>	$1 \text{ кгс} \cdot \text{сек}^2/\text{м} = 9,80665 \text{ кг}$
Время	<i>t</i>	Секунда		Секунда	<i>сек</i>	
Площадь	<i>S</i>	Квадратный метр		Квадратный метр	<i>м²</i>	
Объем	<i>V</i>	Кубический метр	<i>м³</i>	Кубический метр	<i>м³</i>	
Угол плоский	φ	Радян	<i>рад</i>	Радян	<i>рад</i>	$1 \text{ рад} = 57^\circ 17' 44'', 8$
Угол телесный	ω	Стерadian	<i>стер</i>	Стерadian	<i>стер</i>	
Скорость линейная	<i>v</i>	Метр в секунду	<i>м/сек</i>	Метр в секунду	<i>м/сек</i>	
Скорость угловая	ω	Радян в секунду	<i>рад/сек</i>	Радян в секунду	<i>рад/сек</i>	$2\pi \text{ рад/сек} = 1 \text{ об/сек}$
Ускорение линейное	<i>a</i>	Метр на секунду в квадрате	<i>м/сек²</i>	Метр на секунду в квдрате	<i>м/сек²</i>	
Ускорение угловое		Радян на секунду в квадрате	<i>рад/сек²</i>	Радян на секунду в квдрате	<i>рад/сек²</i>	

Физическая величина		Единицы измерения				
Наименование	Обозначение	Международная система единиц		Техническая система единиц (прежняя)		Переводной множитель
		Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение	
Сила	F	Ньютон	n ($mkг/сек^2$)	Килограмм или килограмм-сила	$кГ$ или $кгс$	$1 кгс = 9,80665 n$
Вес	G					
Удельный вес	γ	Ньютон на кубический метр	$n/м^3$	Килограмм-сила на кубический метр	$кгс/м^3$	$1 кгс/м^3 = 9,80665 n/м^3$
Плотность	ρ	Килограмм на кубический метр	$кг/м^3$	Килограмм-сила-секунда в квадрате на метр в четвертой степени	$кгс \times \times сек^2/м^4$	$1 кгс \cdot сек^2/м^4 = 9,80665 кг/м^3$
Импульс силы		Килограммометр в секунду	$кгм/сек$	Килограмм-сила в секунду	$\cdot сек$	$1 кгс \cdot сек = 9,81 мкг/сек$
Количество движения		Килограммометр в секунду	$кгм/сек$	Килограмм-сила в секунду	$кгс \cdot к$	$1 кгс сек = 9,81 мкг/сек$
Момент силы	M	Ньютон-метр	$\cdot м$	Килограмм-сила-метр	$кгс \cdot м$	$1 кгс \cdot м = 9,80665 n м$
Давление	p	Ньютон на квадратный метр	$/м^2$	Килограмм-сила на квадратный метр	$кгс/м^2$	$1 кгс/м^2 = 9,80665 n/м^2$
Работа	A	Джоуль	$дж$ ($м^2кг/сек^2$)	Килограмм-сила-метр	$м$	$1 кгс м = 9,80665 дж$
Энергия	E	Джоуль	$дж$	Килограмм-сила-метр	$кгс м$	$1 кгс м = 9,80665 дж$
Мощность	N	Ватт	$вт$ ($м^2кг/сек^3$)	Килограмм-сила-метр в секунду	$кгс \cdot м/сек$	$1 кгс \cdot м/сек = 9,80665 вт$

Физическая величина		Единицы измерения				Переводной множитель
Наименование	Обозначение	Международная система еди		Техническая система единиц (прежняя)		
		Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение	
Момент инерции	<i>J</i>	Килограмм-квадратный метр	<i>м²</i>	Килограмм-сила-метр-секунда в квадрате	<i>кгс м сек²</i>	$1 \text{ м кгс сек}^2 = 9,81 \text{ м}^2 \text{ кг}$
Коэффициент продольного растяжения		Метр-секунда в квадрате на килограмм	<i>м /кг</i>	Метр в квадрате на килограмм-силу	<i>м²/</i>	
Коэффициент поперечного сжатия	β	Метр-секунда в квадрате на килограмм	<i>м сек²/кг</i>	Метр в квадрате на килограмм-силу	<i>м²/кгс</i>	
Модуль Юнга	<i>E</i>	Килограмм на метр-секунду в квадрате	<i>кг/м сек²</i>	Килограмм-сила на метр в квадрате	<i>кгс/м²</i>	
Модуль сдвига	<i>N</i>	Килограмм на метр-секунду в квадрате	<i>кг/м сек²</i>	Килограмм-сила на метр в квадрате	<i>кгс/м²</i>	
Период колебаний	<i>T</i>	Секунда		Секунда		
Частота колебаний	γ	Герц	<i>гц (1/сек)</i>	Герц	<i>гц</i>	
Угловая частота	ω	Радиан в секунду	<i>рад/сек</i>	Радиан в секунду	<i>рад/сек</i>	



ЛИТЕРАТУРА

1. Геллер Ю. А. Современные стали для режущих инструментов и их применение в инструментальном производстве. М., ЦИНТИАМ, 1962 с. 173—199. (Труды конференции инструментальщиков Западной Сибири. Сборник I. Современные конструкции режущих инструментов.)
2. Смирнов Ф. Ф. Твердые сплавы новых марок, их назначение и эксплуатационные свойства, М., МДНТП, 1962, с. 17—43. (Материалы семинара. Сборник I. Твердые сплавы в машиностроении.)
3. Грановский Г. И., Грудов П. П., Кривоухов В. А. и др. Резание металлов. М., Машгиз, 1954. 472 с.
4. Общемашиностроительные нормативы режимов резания и времени для технического нормирования работ на фрезерных станках. (Серийное производство.) М., Машгиз, 1959, 269 с.
5. Апраксин В. И. Кинематика зоны резания. — Научно-технический информационный бюллетень ЛПИ им. М. И. Калинина, 1962, № 2, с. 71—79.
6. Аршинов В. А., Алексеев Г. А. Резание металлов. М., Машгиз, 1956. 484 с.
7. Панкин А. В. Обработка металлов резанием. М., Машгиз, 1961. 520 с.
8. Резников Н. И. Учение о резании металлов. М., Машгиз, 1947. 586 с.
9. Беспрозванный И. М. Основы теории резания металлов. М., Машгиз, 1948. 390 с.
10. Режимы резания металлов инструментами из быстрорежущей стали, М., Машгиз, 1960. 160 с.
11. Руководство к универсальному прибору для измерения сил резания УДМ-1. М., Изд. Отдел технической информации ВНИИ (Всесоюзный научно-исследовательский инструментальный институт), 1961. 19 с.
12. Мухин Б. И. Теоретические вопросы конструирования приборов для измерения сил резания. М., ЦИНТИАМ, 1962, с. 281—295. (Труды конференции инструментальщиков Западной Сибири. Сборник I. Современные конструкции режущих инструментов.)
13. Аврутин С. В. Рациональная работа фрезеровщика. М., Машгиз, 1962. 310 с.
14. Егоров С. В. и Руднев А. В. Эффективные методы охлаждения режущих инструментов при обработке жаропрочных сплавов. — «Станки и инструмент», 1961, № 6, с. 23—25.

15. Кривоухов В. А., Егоров С. В., Руднев А. В. и др. Пути повышения эффективности режущих инструментов. — «Станки и инструмент», 1962, № 1, с. 30—33.
16. Каширин А. И. и Рассохин В. Я. Значение окружной силы при торцовом фрезеровании твердосплавными фрезами. — «Станки и инструмент», 1951, № 10, с. 6—8.
17. Шифрин А. Ш. и Асс Е. П. Скоростное торцовое фрезерование нержавеющей стали. Л., ЛДНТП, 1954. 15 с.
18. Капительман В. И. Скоростное фрезерование нержавеющей стали. — «Вестник машиностроения», 1956, № 11, с. 42—43.
19. Карасев В. Я. и Шифрин А. Ш. Производительная обработка металлов фрезами с неравномерным окружным шагом. Л., ЛДНТП, 1961, 98 с.
20. Резников Н. И., Жарков И. Г., Зайцев В. М. и др. Производительная обработка нержавеющей и жаропрочных материалов. М., Машгиз, 1960. 198 с.
21. Романов К. Ф. Высокопроизводительная обработка титановых сплавов резанием. М., МДНТП, 1958, 25 с.
22. Усовершенствование производства турбинных лопаток. Под общей редакцией инж. Б. А. Ильичева, М.—Л., Машгиз, 1956. 226 с.
23. Климахин А. А. Фасонные фрезы для обработки лопаток турбин. — «Машиностроитель», 1957, № 3, с. 33—36.
24. Златин. Способы обработки сплава титан-алюминий-хром. — «Am. Machinist», 1955, № 8, с. 137—140.





ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава I.	
Основные сведения о процессе фрезерования (С. А. Журавлев)	5
1. Типы фрез и их назначение . . .	—
2. Материалы для изготовления фрез . . .	6
3. Геометрические параметры режущей части фрез	14
4. Процесс резания и его особенности при фрезеровании	26
Глава II.	
Фрезерование цилиндрическими, концевыми, дисковыми и фасонными фрезами (С. А. Журавлев)	32
5. Фрезерование цилиндрическими фрезами	—
6. Равномерность фрезерования . . .	42
7. Фрезерование против подачи и по подаче	46
8. Силы, действующие на фрезу и мощность	48
9. Фасонное фрезерование . . .	63
10. Приборы для измерения сил резания при фрезеровании	66
11. Износ и стойкость цилиндрических фрез	70
12. Смазочно-охлаждающие жидкости . . .	77
13. Скорость резания при фрезеровании цилиндрическими, дисковыми и концевыми фрезами	78
Глава III.	
Торцовое фрезерование (С. А. Журавлев)	84
14. Элементы резания	—
15. Силы и мощность при торцовом фрезеровании	87
16. Износ и стойкость торцовых фрез . . .	91
17. Скорость резания при торцовом фрезеровании	92
18. Выбор режима резания	94

Глава IV

Фрезерование труднообрабатываемых металлов (А. Ш. Шифрин) 107

19. Некоторые особенности фрезерования труднообрабатываемых металлов	—
20. Фрезерование торцовыми фрезами	110
21. Фрезерование цилиндрическими фрезами	126
22. Фрезерование концевыми фрезами	132
23. Фрезерование дисковыми пазовыми трехсторонними и прорезными фрезами	137
24. Фасонное фрезерование	140
Приложение	145
Литература	148



Редактор издательства инж. *Л. И. Вожик*

Обложка художника *И. П. Кремлева*

Технический редактор *Т. П. Малашкина*

Корректор *Н. С. Дворецкая*

Сдано в производство 27/VI 1964 г. Подписано к печати 8/XII 1964 г. М-42180.

Формат бумаги 84 × 108¹/₃₂. Печ. листов 7,79. Уч.-изд. листов 7,2.

Тираж 6000 экз. Цена 25 к. Заказ 1110.

Ленинградская типография им. Котлякова издательства «Финансы»
Государственного комитета Совета Министров СССР по печати.
Ленинград, Садовая, 21.



БИБЛИОТЕЧКА ФРЕЗЕРОВЩИКА

ПЕРЕЧЕНЬ ВЫПУСКОВ

1. Журавлев С. А., Шифрин А. Ш. **Основы фрезерования и режимы резания.**
2. Журавлев С. А., Шифрин А. Ш. **Фрезы.**
3. Ковалев Н. М., Переломов Н. Г. **Фрезерные станки.**
4. Плотицын В. Г. **Технология фрезерных работ.**
5. Ансеров М. А. **Фрезерные приспособления.**
6. Оглоблин А. Н. **Делительные головки и их настройки.**
7. Амосов И. С., Скраган В. А. **Точность, вибрации и шероховатость поверхности при фрезеровании.**
8. Блумберг В. А. **Пути повышения производительности при фрезеровании.**
9. Сергеев М. А. **Организация рабочего места фрезеровщика и техника безопасности.**

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть	По чьей вине
19	12-я сверху	Угол наклона ре- жущей кромки	Угол наклона ре- жущей кромки λ .	Тип.
19	13-я сверху	кромки	кромки λ	
19	22-я сверху	С помощью угла	С помощью угла λ	
29	2-я снизу	l	l_c	
44	16-я сверху	$\psi_2 = \psi^{\text{III}}$	$\psi_2^{\text{I}} = \psi_1^{\text{III}}$	
78	19-я снизу	$v = \frac{C_v D^q v}{T^m t^x v s^y v B^u v z p v}$	$v = \frac{C_v D^q v}{T^m t^x v s^y v z^p v}$	
89	6-я снизу	k_m	k_{mN}	
90	13-я снизу	$= \frac{C}{D^{0,19} n^{0,19}}$	$= \frac{C'}{D^{0,19} n^{0,19}}$	

С. А. Журавлев, А. Ш. Шифрия

Заказ 1110