

Лекция

Фрезерование. Выбор режима резания при фрезеровании

1. Общие сведения

Фрезерование — метод обработки поверхностей заготовок многолезвийным режущим инструментом — *фрезой*.

Фрезерованием обрабатывают плоские и фасонные поверхности, прорезают пазы и шпоночные канавки, разрезают заготовки.

Процесс фрезерования осуществляют в результате сложения двух движений: главного движения D_r — вращательного (фрезы) и движения подачи D_s — обычно прямолинейного (обрабатываемой заготовки или фрезы). Движением подачи может быть и вращательное движение заготовки вокруг оси вращающегося стола или барабана (карусельно-фрезерные и барабанно-фрезерные станки).

Фрезерование разделяют на черновое, получистовое, чистовое и тонкое.

Черновое фрезерование применяют для предварительной обработки заготовок. Черновое фрезерование плоскостей обеспечиваем шероховатость поверхности $Rz\ 160...80$ мкм и отклонение от прямолинейности $0,15...0,3$ мм на 1 м длины.

Получистовое фрезерование используют для уменьшения погрешностей геометрических форм и пространственных отклонений. Оно обеспечивает шероховатость поверхности $Rz\ 80...40$ мкм и отклонение от плоскостности $0,1...0,2$ мм на 1 м длины.

Чистовое фрезерование применяют для окончательной обработки или перед отделочной обработкой. Оно обеспечивает шероховатость поверхности от $Rz\ 40$ до $Ra\ 2,5$ мкм и отклонение от плоскостности $0,04...0,08$ мм на 1 м длины.

Тонкое фрезерование применяют для отделочной обработки. Тонкое фрезерование обеспечивает $Ra\ 2,5...0,63$ мкм и отклонение от плоскостности $0,02...0,04$ мм на 1 м длины. Применение скоростных режимов при фрезеровании позволяет получить при черновом $Rz80...20$ мкм, при получистовом от $Rz\ 40$ до $Ra\ 2,5$ мкм, при чистовом — $Ra\ 2,5...0,63$ мкм.

Работы на фрезерных станках выполняют против движения подачи (рис. 1, а) и по движению подачи (рис. 1, б) фрезами, различаемыми по технологическим и конструктивным признакам: цилиндрическими (рис. 1, в), торцовыми (рис. 1, г), дисковыми, прорезными, отрезными, концевыми, угловыми и фасонными.

Встречное фрезерование, когда направление движения режущей кромки фрезы, находящейся в процессе резания, противоположно направлению движения подачи;

Попутное фрезерование, когда направление движения режущей кромки фрезы, находящейся в процессе резания, совпадает с направлением движения подачи.

При встречном фрезеровании нагрузка на зуб возрастает от нуля до максимума, силы, действующие на заготовку, стремятся оторвать её от стола, а стол поднять. Это увеличивает зазоры в системе СПИД (станок - приспособление - инструмент - деталь), вызывает вибрации, ухудшает качество обработанной поверхности. Этот способ хорошо применим для обработки заготовок с коркой, производя резание из-под корки, отрывая её, тем самым значительно облегчая резание. Недостатком такого способа является большое скольжение лезвия по предварительно обработанной и наклёпанной поверхности. При наличии некоторого округления режущей кромки она не сразу вступает в процесс резания, а поначалу проскальзывает, вызывая большое трение и износ инструмента по задней поверхности. Чем меньше толщина срезаемого слоя, тем больше относительная величина проскальзывания, тем большая часть мощности резания расходуется на вредное трение.

При попутном фрезеровании этого недостатка нет, но зуб начинает работу с наибольшей толщины срезаемого слоя, что вызывает большие ударные нагрузки, однако исключает начальное проскальзывание зуба, уменьшает износ фрезы и шероховатость поверхности. Силы, действующие на заготовку, прижимают её к столу, а стол - к направляющим станины, что уменьшает вибрации и повышает точность обработки.

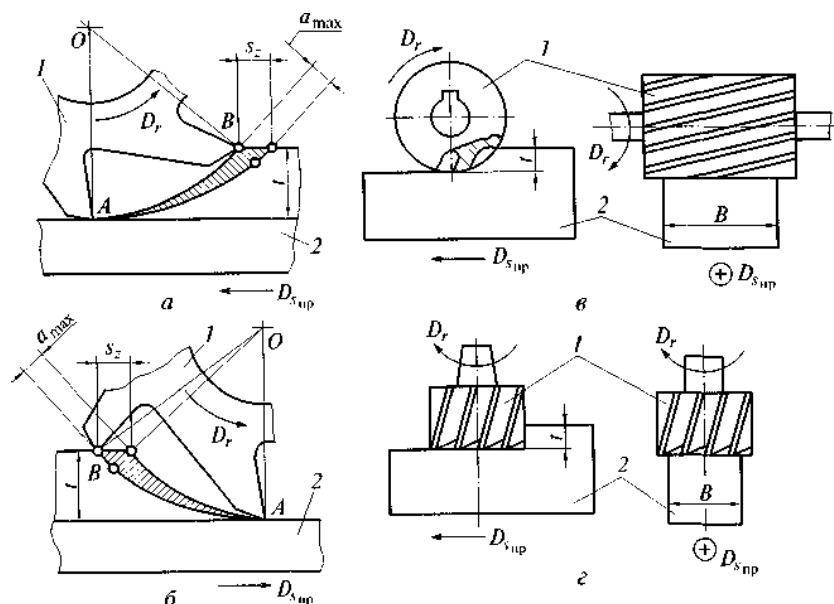


Рис. 1. Схемы фрезерования против движения подачи (а) и по движению подачи (б) цилиндрической (в) и торцевой (г) фрезами:

1 — фреза; 2 — заготовка; D_r — главное движение; $D_{спр}$ — движение продольной подачи; B — ширина фрезерования; O — ось фрезы; s_z — подача на зуб; a_{max} — максимальная толщина срезаемого слоя; t — глубина фрезерования

Тонкое фрезерование обычно проводят летучими фрезами, которые состоят из корпуса с закрепленными в нем двумя-тремя резцами. Летучие фрезы работают по методу деления глубины фрезерования. Резцы летучей фрезы установлены на различных расстояниях от оси вращения фрезы и от обрабатываемой поверхности. Ближайший к оси вращения фрезы резец — чистовой, а все последующие — черновые. Для тонкого декоративного фрезерования плоских поверхностей деталей из цветных металлов и сплавов до $a_{0,08...0,04}$ мкм шероховатости поверхности применяют летучие фрезы, оснащенные алмазными резцами.

2. Геометрические параметры режущей части фрез

Геометрические параметры режущей части цилиндрической, горновой и дисковой фрез показаны на рис.2.

Передний угол γ изменяется в плоскости схода стружки, условно принимаемой в направлении, нормальном к главной режущей кромке 1 — 2 и передней поверхности зуба.

Главный угол в плане ϕ влияет на толщину срезаемого слоя при одной и той же подаче, на соотношение составляющих сил, действующих на фрезу, на стойкость фрезы и качество обработанной поверхности. Чем меньше угол ϕ , тем меньше толщина срезаемого слоя, тем выше стойкость фрезы и чище обработанная поверхность, но тем больше осевая составляющая силы резания.

Главный задний угол α измеряют в плоскости траектории движения точки кромки, т.е. в плоскости, перпендикулярной оси фрезы. Задний угол α — угол между касательной к задней поверхности зуба фрезы и линией, касательной к траектории движения точки режущей кромки, принимаемой за окружность.

Угол наклона зубьев ω винтовой режущей кромки служит для обеспечения более спокойных условий резания и создания направления сходящей стружки. При работе фрезами с винтовыми зубьями надо обращать внимание на соответствие направлений вращения шпинделя и винтовых канавок фрезы.

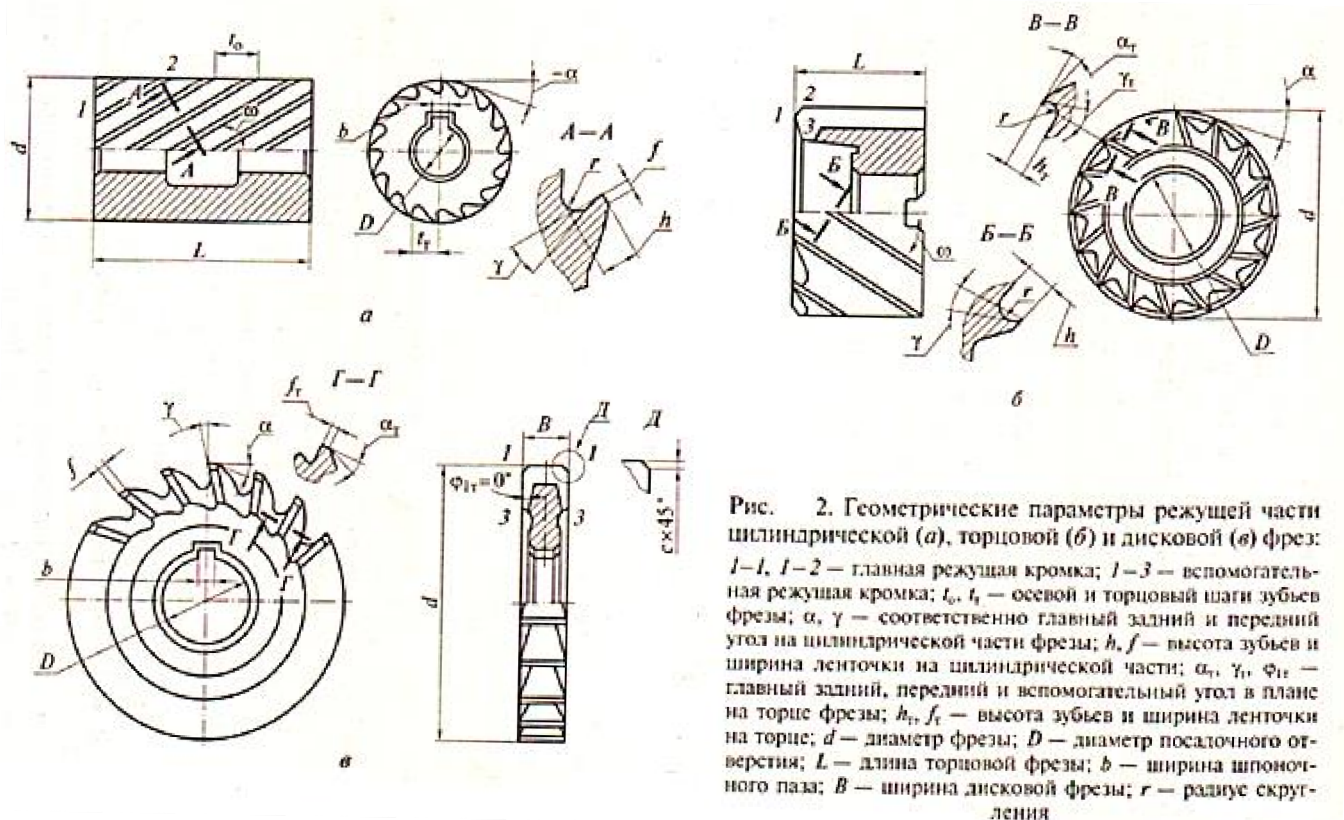


Рис. 2. Геометрические параметры режущей части цилиндрической (а), торцовой (б) и дисковой (в) фрез: 1-1, 1-2 — главная режущая кромка; 1-3 — вспомогательная режущая кромка; t_o , t_r — осевой и торцовый шаги зубьев фрезы; α , γ — соответственно главный задний и передний угол на цилиндрической части фрезы; h , f — высота зубьев и ширина ленточки на цилиндрической части; α_r , γ_r , φ_{1r} — главный задний, передний и вспомогательный угол в плане на торце фрезы; h_r , f_r — высота зубьев и ширина ленточки на торце; d — диаметр фрезы; D — диаметр посадочного отверстия; L — длина торцовой фрезы; b — ширина шпоночного паза; B — ширина дисковой фрезы; r — радиус скругления

3. Режим резания и элементы срезаемого слоя при фрезеровании

К режиму резания при фрезеровании относят скорость главного движения резания v , подачу s , глубину резания t , ширину фрезерования B осевую силу P и эффективную мощность N_e .

Скорость главного движения резания (окружная скорость вращения фрезы), м/с:

$$v = \pi d n / (1000 \times 60),$$

где d — диаметр фрезы, мм;

n — частота вращения фрезы, об/мин.

Скорость резания, допускаемую геометрией и режущими свойствами фрезы, свойствами материала заготовки и условиями обработки, подсчитывают по эмпирической формуле, м/с:

$$v = \frac{C_v d^q \omega^p K_v}{T^m s^x t_z^y B^r z^n 60}$$

где C_v — коэффициент, характеризующий материал и условия обработки;

d — диаметр фрезы, мм;

ω — угол наклона винтовой канавки фрезы, (для торцовых фрез угол ω не учитывают);

T — стойкость фрезы, мин;

s_z — подача на один зуб, мм/зуб;

t — глубина резания, мм;

B — ширина фрезерования, мм;

z — число зубьев фрезы;

q, p, m, x, y, r, n — показатели степеней (приводятся в справочниках с индексами u , для простоты написания в формуле индексы u опущены);

K_v — общий поправочный коэффициент, учитывающий изменение условий обработки.

Подача — величина перемещения обрабатываемой заготовки в минуту S_m , мм/мин, за время углового поворота фрезы на один зуб s_z , мм/зуб, или за время одного оборота фрезы S_0 мм/об.

На практике пользуются всеми тремя значениями подачи. Между ними существуют следующие зависимости:

$$s_z = \frac{s_0}{z} = \frac{s_M}{nz} ;$$

— .

$$s_0 = s_z z;$$

$$s_m = s_0 n = s_z z n$$

где z — число зубьев фрезы.

Ширина фрезерования B — это ширина обрабатываемой поверхности, мм.

Глубина фрезерования t — толщина слоя металла, снимаемого с поверхности заготовки за один проход, мм.

Толщина срезаемого слоя a переменна на протяжении всей дуги контакта зуба фрезы с заготовкой. Она измеряется в радиальном направлении от центра фрезы.

У цилиндрических, дисковых, фасонных и концевых фрез с прямым зубом толщина срезаемого слоя постоянна вдоль всей длины режущей кромки. Ширина B и глубина t фрезерования при обработке основными видами фрез показаны на рис. 1, в, г.

Величину окружной силы резания P , Н, при фрезеровании подсчитывают по формуле

$$P = C_p t^x s^y B^z z^n d^{-q}$$

где C_p — коэффициент, характеризующий обрабатываемый материал и условия обработки.

Коэффициент C_p и показатели степеней x, y, q приведены в справочниках с индексами p , как и C_p . Эффективная мощность, кВт,

$$N_e = P_v / (1000 \times 60).$$

Назначение рациональных режимов резания предусматривает выбор для заданных условий обработки (обрабатываемый материал, размеры заготовки, припуск на обработку и др.) типа и размера фрезы, материала и марки режущей части, оптимальных геометрических параметров режущей части, условий охлаждения и др. После этого необходимо установить оптимальные значения следующих параметров режима резания: B, t, s_z, v, n, N_n, T .

Зависимость производительности фрезерования от объема снятого слоя металла выражена формулой

$$Q = B t s_m = B t s_z z n,$$

$$\text{но } n = 1000v/\pi D.$$

Подставляя вместо n его выражение, получим

$$Q = 1000 B t s_z z v / \pi D$$

Следовательно, при постоянном диаметре фрезы на производительность фрезерования параметры B, t, s_z и v оказывают одинаковое влияние, так как каждый из них влияет в первой степени. Это означает, что при увеличении любого из них, например в два раза (при прочих неизменных параметрах), производительность также увеличивается в два раза.

Задача выбора рационального режима резания состоит в выборе наиболее выгодного для заданных условий режима резания. С учетом стойкости инструмента выгоднее прежде всего выбирать максимально допустимые значения тех параметров, которые в меньшей степени влияют на стойкость инструмента, т. е. в порядке, обратном их влиянию на стойкость фрезы. Так как скорость резания оказывает самое большое влияние на стойкость, то ее выбирают исходя из принятой для данного инструмента нормы стойкости.

Выбор режимов резания при фрезеровании следует производить в следующей последовательности:

1. Определить максимально допустимую глубину резания исходя из припуска на обработку. Припуск на обработку желательно снять за один проход.

2. Найти максимально допустимую по условиям обработки подачу на зуб s_z . При черновом фрезеровании она ограничивается прочностью зуба фрезы, прочностью фрезы (концевые фрезы, фрезы малых диаметров и др.), недостаточной мощностью, жесткостью и виброустойчивостью станка и т. д. При чистовой обработке величина подачи должна отвечать требованиям точности и шероховатости обработанной поверхности.

3. По выбранной глубине резания и подаче на зуб (и заданной ширине фрезерования) определяют по таблицам нормативов режимов фрезерования скорость резания v .

4 Определяют эффективную мощность резания N_e . Выбранный режим может быть осуществлен, если $N_e < N_{ст}$.

Если окажется, что $N_e > N_{ст}$, то необходимо прежде всего снизить скорость резания пропорционально недостатку мощности по формуле

$$v_N = v_T = N_e / N_{ст}$$

где v_N - скорость резания по станку, м/мин;

v_T - скорость резания по нормативам режима резания, м/мин;

$N_{ст}$ - эффективная мощность станка, кВт;

N_e - эффективная мощность резания, кВт.

5. В зависимости от принятой скорости резания v_T или v_N определяют ближайшую ступень чисел оборотов шпинделя станка из числа имеющихся на данном станке.

6. Определяют минутную подачу и выбирают ближайшую из имеющихся на данном станке.

7. Определяют машинное время.

4. Особенности процесса фрезерования

Процесс образования стружки при фрезеровании сопровождается теми же явлениями, что и процесс стружкообразования при точении. Вместе с тем процесс фрезерования имеет свои специфические *особенности*: толщина слоя, срезаемого каждым зубом фрезы, переменна и изменяется от некоторого минимума до максимума или наоборот (см. рис. 1, а, б); одновременно в работе находится несколько режущих лезвий; режущие лезвия работают с перерывами. **Если главное движение, т.е. вращение фрезы (см. рис. 1, а) и движение подачи направлены навстречу друг другу, то имеет место встречное фрезерование, называемое обычно фрезерованием против движения подачи. Если главное движение и движение подачи происходят в одном направлении (см. рис. 1,б) имеет место попутное фрезерование, называемое обычно фрезерованием по движению подачи.**

Встречное фрезерование характеризуется тем, что процесс резания начинается в точке *А* с нулевой толщины срезаемого слоя и заканчивается в точке *В* с максимальной толщиной a_{max} срезаемого слоя.

Фреза отрывает заготовку от стола, приводя к увеличению зазора между столом и направляющими станины, вызывая вибрации и увеличение шероховатости обработанной поверхности. Работа зубьев фрезы связана с затруднительными условиями врезания зуба в металл.

При встречном фрезеровании нагрузка на зуб фрезы возрастает от нуля до максимума.

Достоинство фрезерования против движения подачи — это работа зубьев фрезы «из-под корки», т.е. фреза подходит к твердому поверхностному слою снизу и отрывает стружку при подходе к точке *В*. *Недостаток* — наличие начального скольжения зуба по наклепанной поверхности, образованной предыдущим зубом, что вызывает повышенный износ фрезы.

Попутное фрезерование приводит к срезанию слоя наибольшей толщины в момент входа зуба фрезы в металл в точке *В* и нулевой толщины в момент выхода зуба в точке *А*.

Фреза прижимает заготовку к столу, а стол — к направляющим станины. Работа по второй схеме протекает более спокойно и обеспечивает более высокое качество обработанной поверхности, чем при работе по первой схеме.

При фрезеровании по движению подачи зуб фрезы сразу начинает срезать слой максимальной толщины и подвергается максимальной нагрузке. Это исключает начальное проскальзывание зуба, уменьшает износ фрезы и шероховатость обработанной поверхности.

5. Равномерность процесса фрезерования

Процесс фрезерования считают равномерным, когда суммарная длина режущих кромок, находящихся в работе, остается постоянной, что приводит к плавному изменению суммарной площади поперечного сечения срезаемого слоя, а, следовательно, к незначительному колебанию силы резания. Это достигается только для фрез с винтовым зубом при условии кратности ширины фрезерования B осевому шагу t_0 фрезы (рис. .3), т.е.

$$B/t_0 = k$$

где k — целое число зубьев, работающих одновременно.

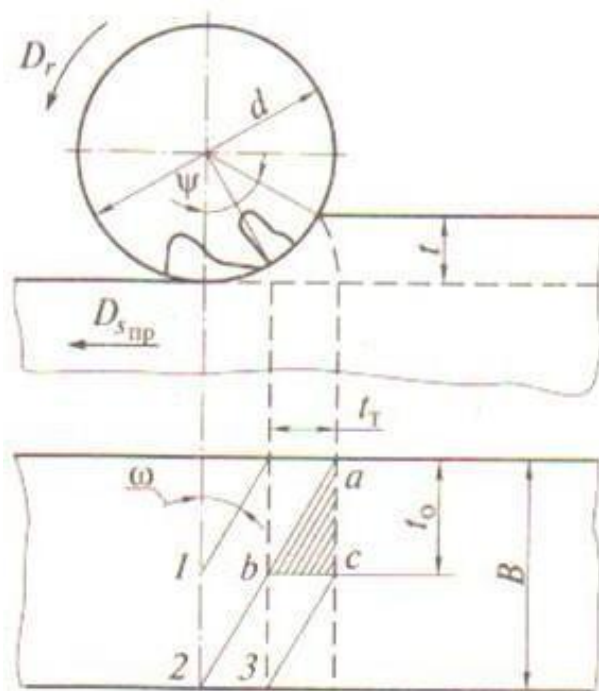


Рис. 3. Схема расположения зубьев при равномерном фрезеровании 1, 2, 3 — развертка на плоскость винтовых зубьев фрезы; t — глубина резания; Ψ — угол, охватывающий обрабатываемую поверхность; ω — угол наклона зуба; abc — треугольник, катетами которого являются шаги зубьев; остальные обозначения см. на рис. 2

Зависимость между осевым t_0 и торцовым t_T шагами цилиндрической фрезы диаметром d определяется из треугольника abc . Так как торцовый шаг

$$t_T = \frac{\pi d}{z}, \text{ то } t_0 = \frac{\pi d}{z} \operatorname{ctg} \omega$$

Угол наклона зубьев фрезы при равномерном фрезеровании определяют по формуле:

$$\omega = \operatorname{arctg} \frac{Bz}{k\pi d}$$

Рекомендуется брать $k = 2 \dots 3$. В этом случае наибольшее колебание силы резания не превышает 20 %, что обеспечивает получение высокого качества обработанной поверхности.

6. Технологическое оборудование для фрезерования

Конструкции фрезерных станков многообразны: вертикальные и горизонтальные консольные, непрерывные, копировальные, бесконсольные вертикальные, широкоуниверсальные, продольные и др. Выпускают станки универсальные, специализированные и специальные.

К универсальному виду оборудования относят консольные горизонтально- и вертикально-фрезерные станки, они имеют много общих узлов. Прежде всего консоль — выступающая корпусная деталь, в которой расположена коробка подачи и которая перемещается по вертикальным направляющим станины станка (вертикальная подача D_{sv}). По направляющим на консоли перемещаются салазки (поперечная подача D_{sp}), а по направляющим салазок перемещается стол (продольная подача $D_{спр.}$). Таким образом, заготовка, устанавливаемая на столе в тисках или другом приспособлении, получает перемещения вдоль трех взаимно-перпендикулярных координатных осей. Главное движение резания D_r — это вращение шпинделя вокруг вертикальной оси (у вертикально-

фрезерных станков моделей 6Н11, 6А12Р, 6С12Ц и др. с размерами прямоугольных столов от 200х800 до

630х 1600 мм или с круглым накладным столом диаметром 320 мм и более) или вокруг горизонтальной оси (у горизонтально-фрезерных станков моделей 6Н804Г, 6Н81Г, М83Г и др. с размерами прямоугольных столов от 160х630 мм у модели 6Н80Г до 400х 1 600 мм у модели 6М83Г).

Коробка скоростей всех вышеупомянутых станков размещена в их станине.

На вертикально-фрезерном станке шпиндельная головка, несущая шпиндель, может поворачиваться в вертикальной плоскости. На ряде этих станков возможно как встречное, так и попутное фрезерование.

К универсальным относят горизонтально-фрезерные станки, имеющие поворотную плиту, которая позволяет поворачивать рабочий стол в горизонтальной плоскости и устанавливать его в требуемом положении.

У всех фрезерных станков величины поступательных перемещений элементов станка регулируются коробками подач, а главные вращательные перемещения (шпинделей) — коробками скоростей.

Обработку на этих станках осуществляют специальными или обычными стандартными фрезами.

На вертикально-фрезерном бесконсольном станке с ЧПУ программированные перемещения заготовки относительно инструмента одновременно по нескольким координатам позволяют получать сложную фасонную поверхность. Обработку заготовок на фрезерных станках с ЧПУ проводят попутным и встречным фрезерованием с одинаковой точностью, так как в коробках подач предусмотрено устройство для выбора зазоров.

Станки непрерывного фрезерования (модели 621М, 6М23, 6А23 и др.) бывают карусельно-фрезерные, у которых стол с заготовками (карусель) поворачивается относительно вертикальной оси, и барабанно-фрезерные, с горизонтальной осью поворота барабана (стола) также при круговой подаче. Станки применяют в условиях серийного и массового производства, причем часто загрузку-выгрузку заготовок на карусель или барабан осуществляют на ходу, без их остановки.

Копировально-фрезерные станки предназначены для обработки фасонных поверхностей сложного профиля. Различают контурное и объемное фрезерование. Контурное фрезерование применяют для получения плоских фасонных поверхностей замкнутого криволинейного контура с прямолинейной образующей (например, плоских кулачков, шаблонов и т.п.). Объемное фрезерование применяют для получения объемных фасонных поверхностей (например, лопаток турбин, коноидов, деталей пресс-форм и т.п.).

Копировально-фрезерные станки (модели 6Л463, 6А426, 6М42К и др.) выполняют универсальными и специализированными, для обработки конкретной детали (шинных пресс-форм, профилей плоских шаблонов, лонжеронов, лопаток турбин и т.д.). Универсальные копировальные станки позволяют делать гравировку или изготавливать детали штампов, матриц, пресс-форм и другие детали с рельефными поверхностями и контурами. Собственно копирование осуществляют по разметке с ручным управлением, по плоскому шаблону, по объемной модели (из гипса, дерева, металла), по программе, записанной на магнитной пленке, или по копиру.

Продольно-фрезерные станки (модели 6605, 6606, 6Г608 и др.) предназначены для обработки заготовок большой массы и размеров (типа станин, корпусов, коробок передач, рамных конструкций и т.п.). Продольно-фрезерные станки строят одно- и двухстоечными с длиной стола 1250... 12000 мм и шириной 400...5000 мм, с одним или несколькими шпинделями. Они позволяют фрезеровать вертикальные, горизонтальные и наклонные плоскости, пазы и т.п. на самых длинных и крупных заготовках (массой до 30 т) или группы заготовок одновременно в условиях серийного производства с применением быстрорежущих и твердосплавных фрез.

Некоторые станки позволяют вести встречное и попутное фрезерование.

Продольно-фрезерные станки с ЧПУ оснащены ползунковыми бабками, расположенными на стойках и траверсе, и имеют перемещение по двум взаимно-перпендикулярным координатам. Бабки оснащены комплектом быстросменных или автоматически сменяемых навесных головок, что позволяет без перезакрепления проводить комплексную фрезерно-сверлильно-расточную обработку.

Объемное фрезерование наиболее успешно осуществляется на фрезерных станках с ЧПУ.

На базе фрезерных станков с ЧПУ выпускают многоцелевые станки, предназначенные для комплексной обработки корпусных заготовок с четырех сторон без переустановки.

Широкоуниверсальные фрезерные станки могут работать с горизонтальным, наклонным или вертикальным расположением одного или двух шпинделей при обработке средних по величине

деталей различной формы. Эти станки оснащают большим набором принадлежностей: угловыми и круглыми столами, тисками, делительными головками и столами, быстропроходными головками и т. п.

Стол станка имеет размеры от 200х500 мм (мод. 675) до 400х 1 600 мм (мод. 6М83Ш). Станки находят применение в условиях единичного и серийного производства.

Разные станки фрезерной группы включают в себя металлорежущее оборудование, предназначенное для обработки конкретных заготовок или видов поверхностей: резбофрезерные, шпоночно-фрезерные, шлицефрезерные, а также станки для обработки шлицов корончатых гаек, канавок спиральных и центровочных сверл, канавок шпоночных и дисковых фрез, плоскостей слитков и т.д.