Лекция 11. Компонування трьохкоординатних фрезерних верстатів. Елементи рухів в процесі різання при фрезеруванні. Технологічні особливості фрезерування авіаційних деталей. Особливості обробки фрезеруванням на багатокоординатних верстатах з числовим програмним управлінням.

11.1. Призначення й основні види фрезерування

Фрезерування – поширений у технології виробництва деталей ЛА процес оброблення плоских і фасонних поверхонь багатозубчастим різальним інструментом – фрезою.

Як свідчить практика, 55 – 60 % від обсягу фрезерних робіт доцільно виконувати на верстатах з ЧПК. Щоб поліпшити обслуговування й підвищити ефективність, ці верстати зазвичай групують у спеціалізовані цехи.

Кінематика процесу фрезерування характеризується двома рухами (див. рис. 2.3, в): швидке обертання інструменту навколо своєї осі – різання; поступальне переміщення заготовки, закріпленої на столі верстата, – подача. Під час обертання фрези зубці послідовно врізаються в заготовку й видаляють припуск оброблюваного матеріалу.

У процесі фрезерування розрізняють такі види обробки:

– *груба* – оброблення з великим і нерівномірним припуском понад 8 мм, а також оброблення по кірці гарячештампованих заготовок і поковок;

– *чорнова* – оброблення з відносно рівномірним припуском, без кірки, з глибиною різання від 3 до 8 мм;

– *напівчистова* – оброблення з рівномірним припуском і глибиною різання від 1,5 до 3 мм, висотою мікронерівностей обробленої поверхні не більше, ніж $Rz = 40$ мкм;

– *чистова* – обробка з рівномірним припуском і глибиною різання до 1,5 мм, висотою мікронерівностей обробленої поверхні не більшою за $Rz = 20$ мкм.

З точки зору специфіки програмування фрезерні операції прийнято класифікувати за кількістю осей верстата з ЧПК, що одночасно використовуються для виконання цієї операції.

Під час так званого *2,5-координатного (2,5D)*, або плоского, оброблення одночасно використовується не більше двох осей. Третя вісь править за установлювальну для підведення й відведення інструменту. 2,5-координатне фрезерування призначене для оброблення циліндричних і плоских поверхонь (контурів), напрямні й твірні яких паралельні до осі інструменту. У цьому разі оброблення здійснюється бічною поверхнею циліндричних або конічних фрез. Інше призначення 2,5-координатного фрезерування – оброблення площин, перпендикулярних до осі інструменту.

3-координатне (*3D*) фрезерування з використанням одночасно трьох осей верстата призначене для об'ємного оброблення поверхонь при

незмінному напрямі осі інструменту в просторі. Решту різновидів багатокоординатної фрезерної обробки прийнято вважати спеціалізованими.

11.2.1. Типи й зони фрезерного оброблення

Усі численні операції фрезерування можна поділити на два основні типи обробки:

– *торцеве фрезерування*, що здійснюється зубами, розташованими на торцевій частині фрези (рис. 7.3, а);

– *циліндричне фрезерування*, коли різання здійснюється зубами, розташованими на твірній циліндра (рис. 7.3, б).

Інші різновиди фрезерування є комбінаціями цих двох типів.

Торцеві фрези. Застосовуються для оброблення плоских поверхонь на вертикальних і горизонтально-фрезерних верстатах і забезпечують вищу продуктивність, ніж циліндричні. Діаметр фрези D має бути приблизно на 20 % більшим від ширини фрезерування B (див. рис. 7.2, г, д). Кожний зуб торцевої фрези (рис. 7.3, а) можна розглядати як прохідний токарний різець, який має головну різальну кромку з головним кутом у плані $\varphi = 30...90°$ і допоміжну різальну кромку з кутом φ_1. З'єднання головної і допоміжної кромок має вигляд перехідної різальної кромки з кутом $\varphi_0 = 0{,}5\varphi$.

Цілісні торцеві фрези виготовляють діаметром $D = 40...100$ мм, а збірні – діаметром $D = 80...630$ мм із зубами зі швидкорізальних сталей або твердих сплавів.

У промисловості широко застосовуються торцеві фрези з багатогранними твердосплавними пластинами, а також із зубами з надтвердих матеріалів (НТМ).

Зуби фрез виготовляють із швидкорізальних сталей марок Р6М3, Р6М5К5, Р9К10, Р14К5Ф5, а також із твердих сплавів марок ВК8, ВК10, Т14К8.

Для підвищення стійкості проти спрацювання на робочі поверхні зубів фрез наносять багатошарові зносостійкі покриття. Освоєно серійний випуск торцевих фрез діаметром 125...800 мм з механічним кріпленням круглих і багатогранних пластин із НТМ на основі нітриду бору, що мають зменшене торцеве биття зубів – від 0,002 до 0,012 мм.

Циліндричні фрези. Застосовуються для оброблення поверхонь на горизонтально-фрезерних верстатах. Виготовляють їх діаметром 40...250 мм і завдовжки до 160 мм цілісними або збірними.

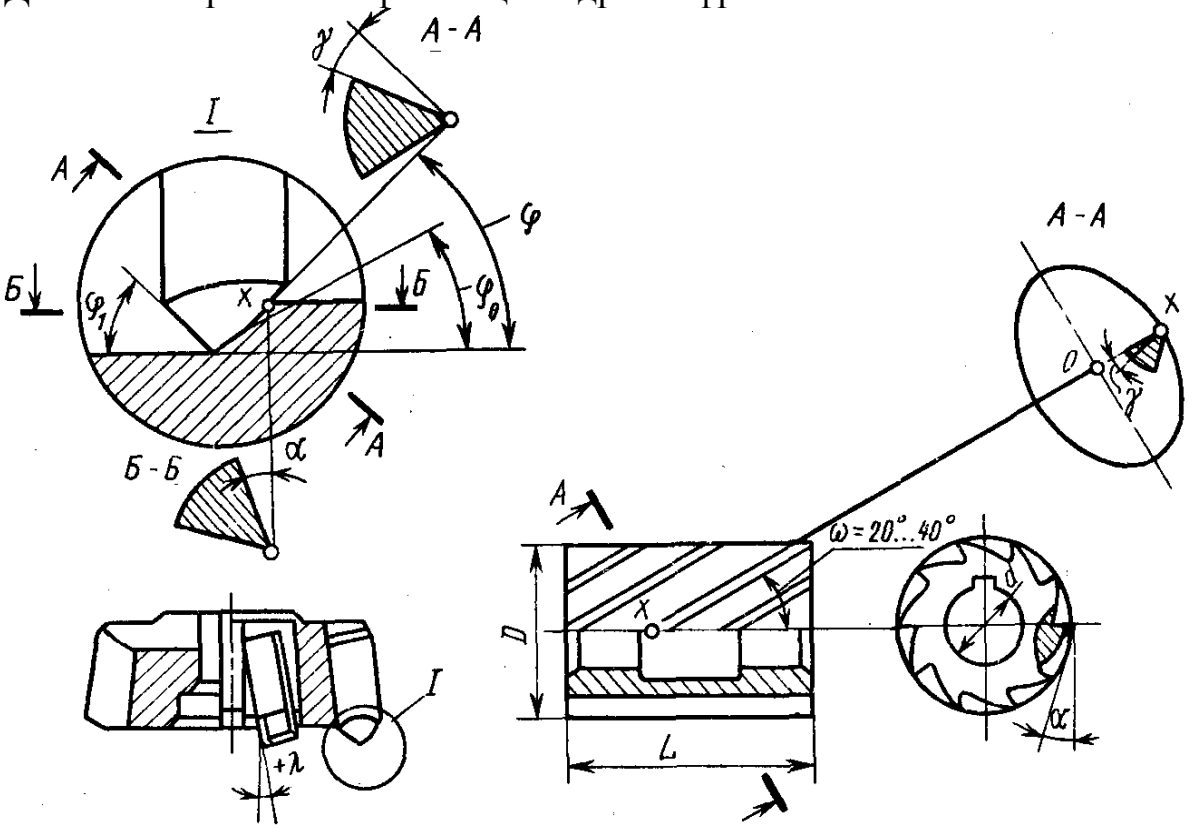
Геометричні параметри різального клина циліндричної фрези (рис. 7.3, б):

– *передній кут* γ – кут у головній січній площині А – А між дотичною до передньої поверхні у заданій точці x леза й радіусом фрези в тій самій точці;

– *кут нахилу гвинтової лінії* $\omega = 20...45°$;

– *задній кут* α – кут у торцевій площині між дотичною до задньої поверхні й дотичною до кола, утвореного обертанням точки x навколо осі фрези (α = 15...25°).

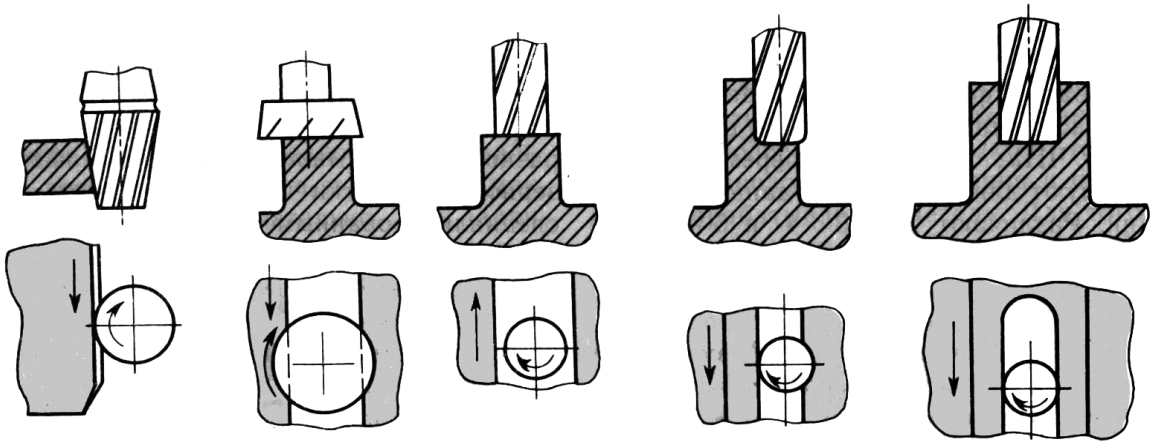
Головна різальна кромка циліндричних фрез може бути прямолінійною (за твірною циліндра), похилою до твірної циліндра або гвинтовою. Допоміжної різальної кромки циліндричні фрези не мають.



а б

Рис. 7.3. Геометрія торцевої (а) і циліндричної (б) фрез

Під час фрезерування виділяють певні *зони оброблення* (рис. 7.4) – відкриті, напіввідкриті, закриті й комбіновані.



а б в г д

Рис. 7.4. Зони оброблення під час фрезерування: а – в – відкриті; г – напіввідкрита; д – закрита

До *відкритих* зон (див. рис. 7.4, а – в) відносять ділянки оброблення, які не накладають обмежень на переміщення фрезерного інструменту вздовж його осі або в площині, перпендикулярній до цієї осі. У напіввідкритих зонах (див. рис. 7.4, г) переміщення фрезерного інструменту обмежені як уздовж осі інструменту, так і в площині, перпендикулярній до неї. У закритих зонах (рис. 7.4, д) переміщення фрезерного інструменту обмежене у всіх напрямках. Комбіновані зони формуються з описаних вище внаслідок з'єднання декількох оброблюваних поверхонь різних типів.

У випадку плоского оброблення внутрішні з'єднання з постійним радіусом формуються за рахунок відповідної конфігурації фрезерного інструменту. Щоб забезпечити технологічність під час виготовлення деталі, такі з'єднання слід виконувати з однаковим, типовим для конкретного контуру або заготовки радіусом.

11.2.2. Схеми формування траєкторії фрези

Для програмування фрезерного оброблення використовують типові схеми формування траєкторії фрези.

Існують дві основні схеми формування траєкторії фрези: зигзагоподібна й спіралеподібна [4].

У разі *зигзагоподібної* схеми інструмент у процесі оброблення здійснює рухи в протилежних напрямах уздовж паралельних рядків.

Зигзагоподібна схема має декілька різновидів залежно від порядку обходу меж оброблення:

– без обходу меж оброблення (рис. 7.5, а);

– із проходом уздовж меж наприкінці оброблення (рис. 7.5, б);

– з попереднім проходом уздовж меж (рис. 7.5, в).

Попереднє прорізування меж (див. рис. 7.5, в) забезпечує симетрію різання для інструменту в процесі виконання цього робочого ходу, а також полегшує умови роботи інструменту під час подальшого оброблення на початку та в кінці кожного рядка.

Основний недолік зигзагоподібної схеми – змінний характер фрезерування: уздовж одного рядка оброблення виконується у напрямі подачі, уздовж наступного – у протилежному напрямі, що негативно впливає на точність та якість обробки.

У випадку *спіралеподібної* схеми оброблення здійснюється коловими рухами інструменту вздовж зовнішньої межі області на різних відстанях від неї.

Спіралеподібна схема забезпечує найкращу обробку за рахунок незмінного напряму фрезерування.

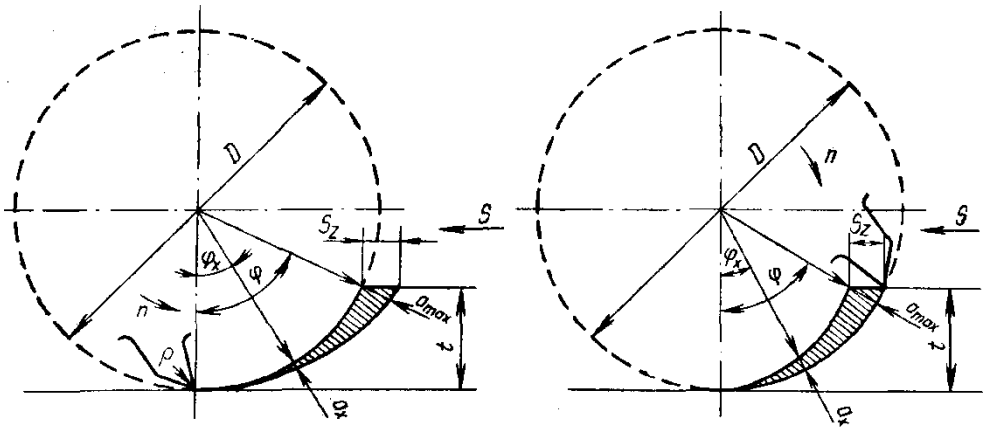
11.2.3. Схеми різання під час фрезерування

Під час фрезерування циліндричними, дисковими, кутовими й фасонними фрезами застосовують дві схеми різання для знімання припуску: зустрічне й збіжне фрезерування (рис. 7.6).

Фрезерування, під час якого фреза й заготовка рухаються назустріч одна одній, називають *зустрічним*.

Фрезерування називають *збіжним*, якщо напрями руху фрези й заготовки збігаються.

Зі схем різання під час фрезерування видно, що товщина зрізу a є змінною величиною: у разі зустрічної схеми a зростає від нуля до a_{max}, а у випадку збіжної схеми, навпаки, зменшується від a_{max} до нуля.



а б

Рис. 7.6. Схеми різання під час зустрічного (а) і збіжного (б) циліндричного фрезерування

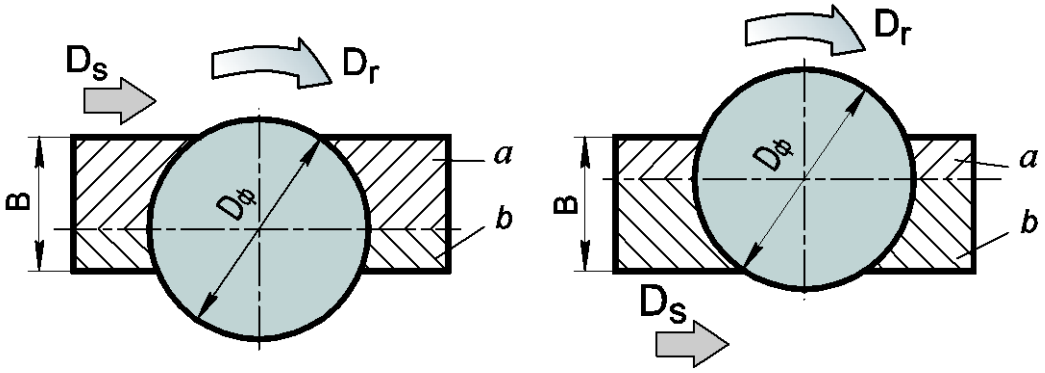
Максимальна товщина зрізу для обох схем різання $a_{max} = S_z \sin\varphi$, де кут φ – кут контакту зуба фрези. Максимальна товщина зрізу залежить не лише від подачі на зуб S_z, але й від співвідношення t/D: $a_{max} = 2S_z\sqrt{t/D - (t/D)^2}$.

За умов *зустрічної* схеми різання навантаження на зуби зростає поступово. Цю схему доцільно застосовувати для чорнових операцій, оскільки припуск знімають з-під кірки. Недоліком цієї схеми є те, що на початку роботи через наявність скруглення леза зуба фрези радіусом ρ кожний зуб не ріже, а ковзає по оброблюваній поверхні, зміцнюючи (наклепуючи) її. Особливо інтенсивним наклепування буде у разі різання в'язких нержавіючих та інших важкооброблюваних матеріалів. Тому під час чистового й напівчистового фрезерування таких матеріалів ефективнішим буде збіжне фрезерування, оскільки проковзування зубів на виході є значно меншим, стійкість фрез збільшується вдвічі-втричі.

Під час *торцевого* фрезерування незалежно від напряму обертання фрези є наявними обидві схеми різання – зустрічна й збіжна (рис. 7.7).

У тій частині заготовки ***a,*** де вектор головного руху (обертання фрези) D_r збігається з напрямом руху подачі заготовки D_s, фрезерування відбувається як збіжне. Відповідно у частині заготовки ***b***, де вектори

головного руху й рух подачі напрямлені назустріч один одному, фрезерування відбувається за схемою зустрічного різання.

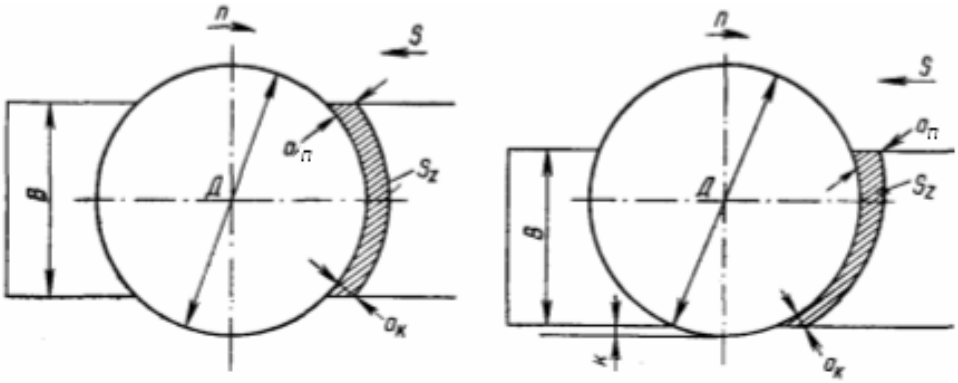


а б

Рис. 7.7. Схеми різання під час збіжного (а) і зустрічного (б) торцевого фрезерування

Слід уникати небезпеки «підривання» заготовки, для чого у випадку переміщення торцевої фрези частина заготовки ***b*** має бути ширшою за частину ***a*** (рис. 7.7, б).

Залежно від того, яким чином установлено фрезу відносно заготовки, торцеве фрезерування може бути симетричним (рис. 7.8, а) і несиметричним (рис. 7.8, б).



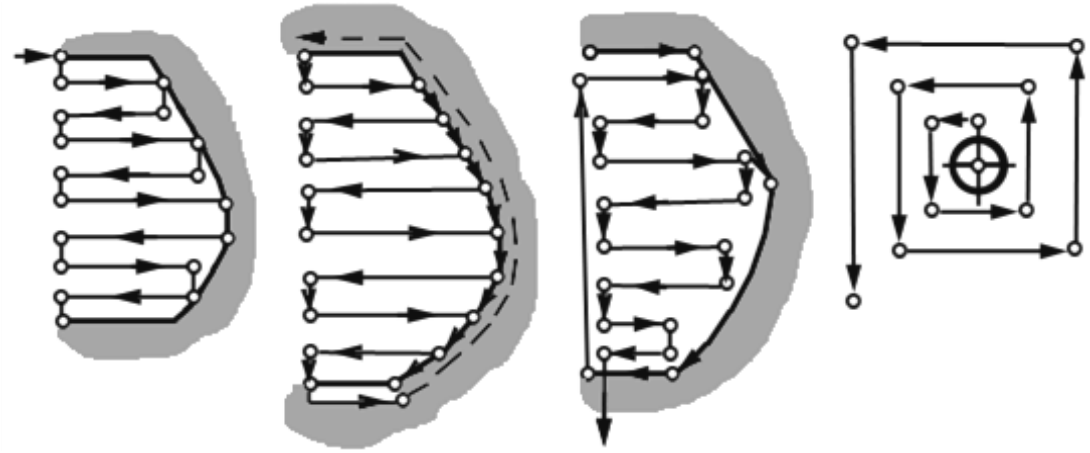
а б

Рис. 7.8. Схеми симетричного (а) і несиметричного (б) торцевого фрезерування

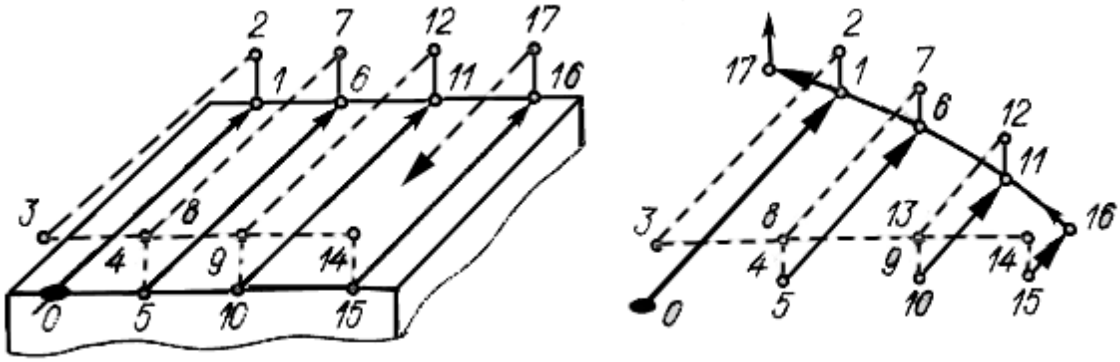
У разі *симетричного* торцевого фрезерування початкова a_n і скінченна $a_к$ величини товщини зрізу однакові й залежать від співвідношення B/D (оптимальний діапазон становить $B/D = 0{,}7...0{,}8$).

Несиметричне фрезерування дає можливість значно зменшити товщину зрізу $a_к$ і, відповідно, зменшити нормальні й дотичні напруження на зубах у момент виходу.

При малих значеннях K суттєво зменшується адгезійне спрацювання фрез і підвищується їхня стійкість. Наприклад, під час фрезерування важкооброблюваних матеріалів, якщо $K \leq 5...8$ мм і $K/D \leq 0{,}05$, стійкість інструменту зростає в шість разів.



а б в г



д е

Рис. 7.5. Типові схеми формування траєкторії: а, б, в – зигзагоподібні; г – спіралеподібна; д, е – Ш-подібні

Спіралеподібна схема має два основні види, один з яких характеризується рухом інструменту від центра області до периферії (рис. 7.5, г), а другий, навпаки, – від межі області до її центра. Використовуючи ці схеми, слід мати на увазі, що під час оброблення колодязів з тонким дном у деталях з алюмінієвих сплавів може статися підривання дна наприкінці оброблення за схемою "від периферії до центра".

Витримати незмінним характер фрезерування можна також з допомогою схем *Ш-подібного* типу. Інструмент після виконання робочого ходу вздовж рядка відводять на невелику відстань від оброблюваної поверхні й на прискореній подачі допоміжного ходу повертають назад. Ш-подібна схема може мати такі ж різновиди, що й зигзагоподібна: без обходу меж (рис.

7.5, д); із проходом уздовж меж наприкінці оброблення області (рис. 7.5, е). Суттєвим недоліком цієї схеми є велика кількість допоміжних ходів.

11.3 Особливості процесів оброблення на багатоцільових верстатах

У виробництві часто виникають ситуації, коли необхідно виготовляти складні корпусні деталі, які потребують оброблення в шістьох напрямках, а інколи в десяти й більше (якщо деталі мають похилі площини). Кожна зі сторін складного корпуса має виступи, кармани, пази, напрямні, ребра та інші конструктивні елементи, тобто кожна сторона корпуса – це поверхня з кількома глибинними рівнями й складним контуром. Крім того, корпусні деталі мають певну кількість основних і кріпильних отворів (гладких, східчастих, конічних і нарізних), різних за розмірами, глибиною й точністю.

Багатоцільові верстати (БВ) дозволяють поєднати операції фрезерування прямолінійних і криволінійних поверхонь, центрування, свердління, розсвердлення, зенкерування, розгортання, цекування, розточування, розвальцьовування й накатування отворів, нарізування різі (мітчиками, плашками, різцевими головками, різцями), кругове фрезерування зовнішніх і внутрішніх циліндричних, конічних і фасонних поверхонь і кругових пазів кінцевими й дисковими фрезами.

Для досягнення високої ефективності БВ усю обробку заготовок прагнуть виконувати на одному верстаті за один-два установа. Але доводиться зважати на небезпеку деформування форми деталі внаслідок перерозподілу залишкових напружень у початковій заготовці. У цих випадках технологічний процес поділяють на операції чорнової (обдирної) і подальшої обробки. Чорнове оброблення виконують на потужних, особливо жорстких верстатах (із ЧПК або універсальних), а потім піддають їх термообробленню для зняття внутрішніх напружень. Подальше механічне оброблення виконується на багатоопераційному верстаті.

Площини фрезерують торцевими й кінцевими фрезами із твердосплавними багатогранними непереточуваними пластинами (БНП). Зазвичай це роблять за два переходи: перший перехід – чорнове фрезерування – при великих припусках доцільно виконувати послідовними проходами торцевих фрез уздовж оброблюваної поверхні. Ширину поверхні, що оброблюється за один робочий хід інструменту, а отже, і діаметр фрези вибирають такими, щоб віджимання інструменту не впливало на точність чистового переходу. Якщо припуск великий і нерівномірний, то діаметр фрези доводиться зменшувати. Для другого, чистового, переходу використовують фрезу, діаметр якої дозволяє охопити всю зону обробки.

Для одержання особливо дрібної шорсткості поверхні при малих припусках застосовують торцеві фрези із пластинами з ельбору й мінералокераміки.

Кінцевими фрезами відкриті площини обробляють рідше, головним чином, тоді, коли ту саму фрезу використовують для фрезерування інших поверхонь (уступів, пазів), щоб зменшити номенклатуру застосовуваних

інструментів.

Пази, *вікна* й *уступи* зазвичай обробляють кінцевими фрезами, які оснащено твердосплавними пластинами.

Щоб підвищити точність обробки по ширині паза й зменшити номенклатуру інструментів, діаметр фрези беруть трохи меншим за розмір паза. Оброблення виконують послідовно: спочатку фрезерують середню частину паза, потім обидві сторони, використовуючи можливість одержання високої точності паза по ширині шляхом введення корекції радіуса фрези. Наприкінці циклу корекцію скасовують.

Для підвищення стійкості інструменту, поліпшення умов відведення стружки під час оброблення глухих пазів застосовують кінцеві фрези зі збільшеним кутом нахилу спіралі й полірованих канавок. Для полегшення врізання з осьовою подачею використовують фрезу з торцевими зубами особливого заточення. Підвищену твердість має фреза з посиленою серцевиною конічної форми й канавками змінної глибини. При збільшених вильотах фрези, що обумовлені конфігурацією заготовки, застосовують фрези з підсилювальним конусом. Вібрації можна зменшити, якщо застосовувати різношагові фрези – фрези з трьома або чотирма зубами, відстані між якими неоднакові.

Кругове фрезерування – нова операція, що стала можливою з появою фрезерних і багатоцільових верстатів з ЧПК. Отвори в корпусних деталях завжди обробляли розточуванням. На верстаті з ЧПК вони можуть бути оброблені фрезеруванням, якщо для фрези задати кругову подачу.

Як показує аналіз даних побудов ТП фрезерних операцій, у сучасних умовах круговому фрезеруванню віддають перевагу завжди, коли застосування цього процесу можливе. Обмеженнями є лише глибина отвору (яка обумовлена довжиною звичайних кінцевих фрез і становить 60...80 мм), його діаметр і точність обробки. Слід зазначити, що особливо успішно використовують кругове фрезерування для попередньої обробки отворів у литих заготовках (для зняття чорнового припуску).

Обробка отворів – найпоширеніший вид технологічних переходів на БВ. Серед них – свердління й нарізування різі в кріпильних отворах під болти, гвинти та шпильки; свердління, зенкерування, розгортання, розточування точних посадкових отворів – гладких й східчастих; обробка отворів у литих деталях.

Співвісні отвори в протилежних стінках корпусних деталей обробляють на БВ консольно закріпленими інструментами послідовно з поворотом заготовки разом зі столом верстата на 180°. Співвісність отворів залежить від точності ділильного стола. Похибка розподілу не повинна перевищувати половини поля допуску на відхилення взаємного розташування отворів згідно з кресленням деталі. Для збільшення твердості шпиндельного вузла отвори розточують з постійним вильотом шпинделя шляхом переміщення стола або стояка верстата.

Якщо вимоги до точності обробки отворів *осьовим інструментом* невисокі, то операції виконують у такій послідовності: спочатку обробляють

усі отвори одним інструментом, потім іншим (за умови, що заміна інструменту на даному верстаті потребує більше часу, ніж позиціювання стола). Якщо вимоги до точності діаметрів і форми отворів є високими, то кожний отвір обробляють окремо, заміняючи інструмент для кожного отвору, а шпиндель здійснює переміщення тільки по осі Z. У протилежному випадку похибка обробки буде збільшуватися за рахунок похибки позиціювання.

Для скорочення часу свердління *спіральними свердлами* й підвищення стійкості інструментів використовують швидке автоматичне змінення режиму різання. Після прискореного підведення свердла до заготовки включають робочу подачу, а коли більша частина отвору буде просвердлена, подачу зменшують, щоб уникнути поломки інструменту через стрибкоподібне змінення навантаження під час виходу свердла з отвору. Якщо на вході в отвір або на виході з нього є ливарна кірка, то в програмі має бути передбачене зменшення частоти обертання шпинделя на цих ділянках.

У зв'язку з тим, що на БВ під час свердління кондуктор, як правило, не використовується, широко застосовують засвердлення отворів короткими твердими свердлами – своєрідну розмітку розташування майбутніх отворів. За наявності ливарної кірки ця операція дає можливість вирішити й інші завдання: полегшити врізання, підвищити стійкість свердел з невеликими діаметрами й разом з цим зняти фаску на вході в отвір, якщо її передбачено на кресленні. Засвердлення доцільно застосовувати для оброблення отворів діаметром до 8...15 мм у деталях із чорних металів.

Для оброблення *отворів у корпусних заготовках* досить ефективним є використання інструментів, що призначалися раніше тільки для свердління глибоких отворів, наприклад двокромкових свердел з механічно закріпленими тригранними твердосплавними пластинами. Застосування таких свердел разом із розподілом припуску по ширині зрізу й внутрішнім підведенням МОЖ дає можливість у три–п'ять разів підвищити ефективність різання порівняно зі звичайними спіральними свердлами.

Велика кількість оброблюваних поверхонь, наявність чорнових, напівчистових і чистових проходів під час оброблення кожної поверхні, значна кількість інструментів у магазині ускладнюють вибір плану обробки деталі на БВ. Необхідно вибрати такий варіант, що буде найбільш ефективним. Можливостей для цього досить багато: можна, наприклад, спочатку повністю обробити деталь з одного боку, потім розгорнути її; можна спочатку обробити деталь із усіх боків начорно, потім розпочати чистове оброблення; можна спочатку обробити всі площини, потім розпочати оброблення отворів. Для деталей зі співвісними отворами доцільно застосовувати послідовне оброблення із двох протилежних боків і т.д.

На прийняття конкретного рішення впливає багато різноманітних факторів. Існує кілька загальних принципів, якими варто керуватися при цьому: чим вищою є точність елемента конструкції, тим пізніше варто передбачати його обробку; спочатку слід планувати чорнову обробку, а потім чистову; чим менше час спрацьовування виконавчого органа (заміна

інструменту, поворот стола та ін.), тим частіше цей орган має функціонувати. Найвищої точності досягають, якщо деталь обробляється з одного установу. Для деталей із великими припусками необхідно передбачити розвантажувальні операції, частину яких доцільно виконувати на універсальному або спеціалізованому устаткуванні.

Вибираючи план обробки деталей на багатоцільових верстатах, насамперед доцільно використовувати типові схеми, які наведено у відповідних нормативних документах [20, 21]. Зазвичай у цих документах рекомендується вибирати послідовність переходів операцій залежно від типу деталі й заготовки, виду оброблюваних поверхонь та точності їхньої обробки тощо.

Приклад. Зміст і послідовність переходів під час оброблення деталі типу «корпус» на багатоцільовому верстаті (рис. 13.5):

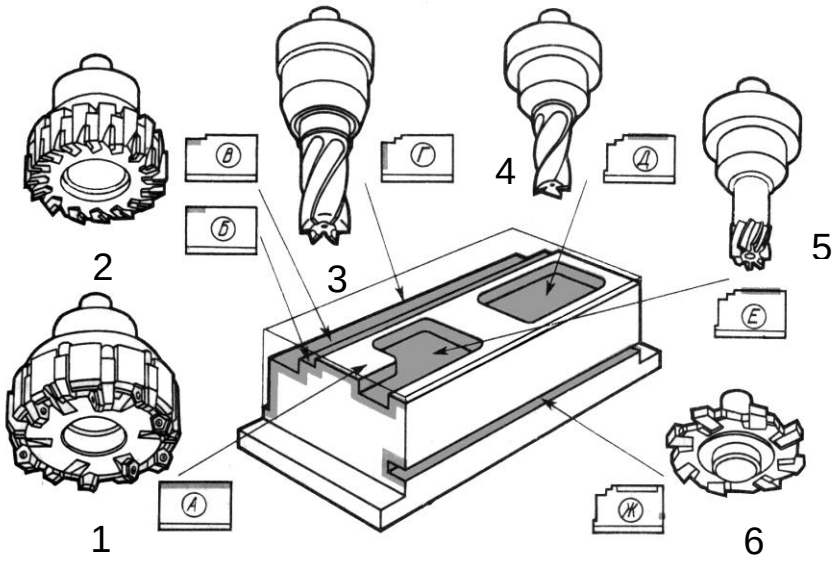


Рис. 13.5. Схема оброблення деталі типу «корпус»: 1 – фреза торцева; 2 – фреза торцева зі вставними ножами з прямим кутом; 3 – фреза кінцева швидкорізальна; 4 – фреза кінцева швидкорізальна із торцевими зубами; 5 – фреза кінцева швидкорізальна; 6 – фреза кінцева пазова із твердосплавними вставними ножами

1) фрезерування верхньої площини (зона А), фреза торцева;

2) фрезерування верхнього уступу (зона Б), фреза торцева зі вставними ножами з прямим кутом;

3) фрезерування нижнього уступу (зона В), фреза торцева зі вставними ножами з прямим кутом;

4) фрезерування бічної поверхні (зона Г), фреза кінцева швидкорізальна;

5) фрезерування вікна (зона Д), фреза кінцева швидкорізальна із торцевими зубами;

6) фрезерування контурної виїмки (зона Е), фреза кінцева швидкорізальна;

7) фрезерування поздовжнього паза (зона Ж), фреза кінцева пазова із твердосплавними вставними ножами.