

О. П. Шиліна

**ТЕХНОЛОГІЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ
МАТЕРІАЛІВ**

**Частина третя. Основи механічної обробки
матеріалів**

**МІНІСТЕРСТВО НАУКИ ТА ОСВІТИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

О. П. Шиліна

ТЕХНОЛОГІЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Частина третя. Основи механічної обробки матеріалів

Електронний навчальний посібник
Видання 2-е, перероблене та доповнене

ВІННИЦЯ
ВНТУ
2025

УДК 669.01(075)

Ш57

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (Протокол № 8 від 30.01.2025 р.)

Рецензенти:

В. Ф. Анісімов, доктор технічних наук, професор

В. Г. Петрук, доктор технічних наук, професор

Р. І. Сивак, доктор технічних наук, професор

Шиліна, О. П.

Ш57 Технологія конструкційних матеріалів. Частина третя. Основи механічної обробки матеріалів : навчальний посібник [Електронний ресурс] / Шиліна О. П. – [Вид. 2-е, перероб. та доп.]. – Вінниця : ВНТУ, 2025. – (PDF, 83 с.)

ISBN 978-617-8163-43-3 (PDF)

В посібнику (третій частині) стисло розглянуто основи механічної обробки матеріалів. Зокрема, розглядаються фізико-механічні основи обробки металів, металорізальні верстати та особливості обробки на них заготовок поверхневим пластичним деформуванням, електрофізичні та електрохімічні методи обробки. Посібник розроблений згідно з планом кафедри та програмами дисциплін «Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство», «Основи механічної обробки матеріалів», «Теорії різання».

УДК 669.01(075)

ISBN 978-617-8163-43-3 (PDF)

© ВНТУ, 2025

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	6
1 ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ОСНОВИ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ	7
1.1 Класифікація рухів в металорізальних верстатах.....	7
1.2 Схеми обробки.....	8
1.3 Режим різання.....	8
1.4 Геометричні параметри різального інструмента	9
1.5 Процес стружкоутворення під час різання металів та явища, що його супроводять.....	12
<i>Контрольні питання</i>	13
2 ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ	14
2.1 Інструментальні сталі	14
2.2 Тверді сплави.....	15
2.3 Мінералокераміка.....	15
2.4 Абразивні матеріали	15
<i>Контрольні питання</i>	16
3 МЕТАЛОРІЗАЛЬНІ ВЕРСТАТИ	17
3.1 Класифікація та нумерація металорізальних верстатів.....	17
3.2 Кінематика верстатів	18
3.3 Кінематична схема верстата.....	24
<i>Контрольні питання</i>	27
4 ОБРОБКА ЗАГОТОВОК НА ВЕРСТАТАХ ТОКАРНОЇ ГРУПИ	28
4.1 Обробка заготовок на токарних і токарно-гвинторізних верстатах	28
4.2 Обробка заготовок на токарно-револьверних верстатах	31
4.3 Обробка заготовок на токарно-карусельних верстатах	32
<i>Контрольні питання</i>	34
5 ОБРОБКА ЗАГОТОВОК НА ВЕРСТАТАХ СВЕРДЛИЛЬНО- РОЗТОЧУВАЛЬНОЇ ГРУПИ	35
5.1 Обробка заготовок на свердлильних верстатах	35
5.2 Обробка заготовок на розточувальних верстатах.....	40
<i>Контрольні питання</i>	42
6 ОБРОБКА ЗАГОТОВОК НА ФРЕЗЕРНИХ ВЕРСТАТАХ	43
6.1 Характеристика процесу фрезерування.....	43
6.2 Типи фрез	43
6.3 Фрезерні верстати	44
6.4 Основні види фрезерних робіт.....	45
6.5 Ділильні головки	46
<i>Контрольні питання</i>	50
7 ОБРОБКА ЗАГОТОВОК НА ПРОТЯЖНИХ ВЕРСТАТАХ	51
7.1 Характеристика процесу	51
7.2 Протяжки.....	51
<i>Контрольні питання</i>	52

8 ОБРОБКА ЗАГОТОВОК НА СТРУГАЛЬНИХ І ДОВБАЛЬНИХ ВЕРСТАТАХ	53
8.1 Характеристика процесу обробки струганням і довбанням	53
8.2 Роботи, які виконують на стругальних верстатах	53
<i>Контрольні питання</i>	54
9 НАРІЗАННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС	55
9.1 Методи нарізання зубчастих коліс	55
9.2 Нарізання зубчастих коліс на зубофрезерних верстатах	56
9.3 Нарізання зубчастих коліс на зубодовбальних верстатах	57
9.4 Нарізання конічних зубчастих коліс	58
<i>Контрольні питання</i>	59
10 ОБРОБКА ЗАГОТОВОК НА ШЛІФУВАЛЬНИХ ВЕРСТАТАХ	60
10.1 Загальні відомості	60
10.2 Абразивний інструмент	60
10.3 Схеми круглого і плоского шліфування	61
10.4 Режими різання процесу шліфування	63
<i>Контрольні питання</i>	63
11 МЕТОДИ ЧИСТОВОЇ ОБРОБКИ ПОВЕРХОНЬ	64
11.1 Загальні відомості	64
11.2 Хонінгування	64
11.3 Суперфініш	65
11.4 Притирання	65
11.5 Чистова обробка зубців зубчастих коліс	66
<i>Контрольні питання</i>	67
12 ОБРОБКА ЗАГОТОВОК ПОВЕРХНЕВИМ ПЛАСТИЧНИМ ДЕФОРМУВАННЯМ	68
12.1 Загальні відомості	68
12.2 Формоутворювальні методи	68
12.3 Зміцнювально-калібрувальні методи	70
<i>Контрольні питання</i>	71
13 ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ТА ЕЛЕКТРОХІМІЧНІ МЕТОДИ ОБРОБКИ	72
13.1 ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНІ МЕТОДИ ОБРОБКИ	72
13.1.1 Електроіскрова обробка	73
13.1.2 Електроімпульсна обробка	74
13.1.3 Високочастотна електроіскрова обробка	75
13.1.4 Електроконтактна обробка	75
<i>Контрольні питання</i>	76
13.2 ЕЛЕКТРОХІМІЧНІ МЕТОДИ ОБРОБКИ	76
13.2.1 Електрохімічне полірування	76
13.2.2 Електрохімічна розмірна обробка	77
13.2.3 Електроабразивна і електроалмазна обробка	77
<i>Контрольні питання</i>	78

13.3 АНОДНО-МЕХАНІЧНА ОБРОБКА.....	79
<i>Контрольні питання</i>	80
13.4 УЛЬТРАЗВУКОВІ ТА ПРОМЕНЕВІ МЕТОДИ ОБРОБКИ	80
13.4.1 Ультразвукова обробка.....	80
13.4.2 Променеві методи обробки	81
<i>Контрольні питання</i>	81
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	82

ПЕРЕДМОВА

Незважаючи на те, що в сучасному заготівельному виробництві створені технологічні способи, які забезпечують отримання заготовок досить високої точності (лиття за моделями, що витоплюються, лиття в оболонкові форми, лиття під тиском, об'ємне штампування тощо), обробка заготовок різанням на металорізальних верстатах різальними інструментами ще залишається в більшості випадків єдиним способом виготовлення деталей потрібних форми, розмірів і якості поверхонь.

В цьому посібнику описано сучасні, найбільш поширені в практиці обробки заготовок і перетворення їх на готові деталі машин технологічні методи та способи обробки різанням, пластичним деформуванням без зняття стружки, електрофізичними та електрохімічними методами обробки.

1 ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ОСНОВИ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ РІЗАННЯМ

Механічна обробка металів різанням – це процес зрізання різальним інструментом з поверхні заготовки шару металу у вигляді стружки з метою отримання потрібної геометричної форми, точності розмірів, взаємного положення і шорсткості поверхонь деталі.

1.1 Класифікація рухів в металорізальних верстатах

Для здійснення процесу зрізання з заготовки шару металу різальному інструменту і заготовці, які встановлюються і закріплюються в робочих органах верстатів, необхідно надати певний комплекс рухів. Рухи робочих органів верстатів поділяються на рухи *різання*, *установчі*, *допоміжні* та *взаємопов'язані*.

Рухами різання називають такі рухи, які забезпечують знімання з заготовки шару металу або викликають зміну стану обробленої поверхні заготовки. До них належать *головний рух* та *рух подачі*.

Головний рух забезпечує безпосереднє знімання стружки. Він визначає швидкість деформування під час різання. Рух подачі забезпечує врізання інструмента в матеріал заготовки, тобто безперервність процесу різання.

Головний рух найчастіше буває обертальним (токарні, свердлильні, фрезерні, шліфувальні верстати), поступальним (протяжні верстати) або зворотно-поступальним (довбальні та стругальні верстати). Він може надаватися заготовці, (токарні, поздовжньо-стругальні верстати), інструменту (свердлильні, фрезерні, шліфувальні, поперечно-стругальні верстати) або і заготовці, і інструменту одночасно (наприклад, під час свердління дрібних отворів чи нарізання різьби на токарних верстатах-автоматах).

Рух подачі у більшості випадків є поступальним. Він може надаватися як інструменту (токарні, свердлильні верстати), так і заготовці (фрезерні, довбальні, стругальні, плоскошліфувальні верстати). В деяких випадках рух подачі може надаватися одночасно як інструменту, так і заготовці. Наприклад, у випадку круглого шліфування валів рухами подачі є поздовжнє пересування шліфувального круга (інструмента) і обертання заготовки. Останній рух називається коловою подачею.

У верстатах з обертальним головним рухом рух подачі неперервний, отже і процес різання також неперервний. У верстатах із зворотно-поступальним головним рухом, де робочий рух чергується з холостим, рух подачі здійснюється перед початком кожного робочого ходу і, таким чином, процес різання є переривчастим.

В металообробці швидкість головного руху позначають v , величину подачі – s .

Рухи, які забезпечують взаємне розташування інструмента і заготовки для зрізання з неї певного шару матеріалу, називають установчими.

Допоміжні рухи робочих органів верстатів не мають прямого відношення до процесу різання і потрібні, переважно, для підвищення продук-

тивності верстатів. Це такі рухи як транспортування заготовки, закріплення її на верстаті, швидкі переміщення робочих органів тощо.

Взаємопов'язаними рухами називаються рухи, які забезпечують певний взаємний зв'язок між заготовкою та інструментом за деяких видів робіт. Наприклад, під час точіння чи фрезерування різьби за кожний оберт заготовки інструмент має пересунутись вздовж заготовки на крок різьби; під час фрезерування зубчастих коліс черв'ячними фрезами має забезпечуватись рух обкатки, тобто за один оберт фрези заготовка має повернутись на число зубців, що дорівнює числу заходів фрези.

1.2 Схеми обробки

Для будь-якого процесу різання можна скласти схему обробки, на якій умовно показують оброблювану заготовку, її установлення і закріплення на верстаті, положення інструмента відносно заготовки, а також рухи різання (рис. 1). Інструмент показують у положенні, що відповідає закінченню обробки поверхні заготовки. Оброблену поверхню виділяють іншим кольором або потовщеними лініями. На схемах обробки показують характер рухів різання та їх технологічне призначення, використовуючи умовні позначення: поздовжню подачу $s_{\text{поз}}$, поперечну – $s_{\text{поп}}$, колову – $s_{\text{кол}}$, вертикальну – $s_{\text{в}}$ та ін. В процесі різання розрізняють оброблювану поверхню 1, оброблену – 2 і поверхню різання 3.

1.3 Режим різання

Основними елементами режиму різання є швидкість різання, подача і глибина різання.

Швидкістю різання v називають відстань, яку проходить точка різальної кромки інструмента відносно заготовки за одиницю часу. Швидкість різання має розмірність $m/xв$ або m/c . Якщо головний рух обертальний, то швидкість різання, $m/xв$:

$$v = \pi Dn/1000,$$

де D – діаметр органу, який здійснює головний рух, mm ;

n – частота обертання цього органу за хвилину.

Якщо головний рух зворотно-поступальний, а швидкості робочого і холостого ходів різні, то швидкість різання, $m/xв$:

$$v = Lm(k+1)/100,$$

де L – довжина ходу інструмента чи заготовки (за поздовжнього стругання), mm ;

m – число подвійних ходів інструмента чи заготовки за хвилину;

k – коефіцієнт, який показує відношення швидкостей робочого і холостого ходів. Якщо ці швидкості однакові, то остання формула матиме вигляд:

$$v = 2Lm/1000.$$

Подачею s називають шлях точки різальної кромки інструмента відносно заготовки в напрямі руху подачі за один оберт чи за один хід заготовки або інструмента. подача залежно від технологічного способу оброб-

ки має розмірність: *мм/об* – для точіння і свердління; *мм/подв.хід* – для довбання, стругання та шліфування; *мм/зуб* – для фрезерування.

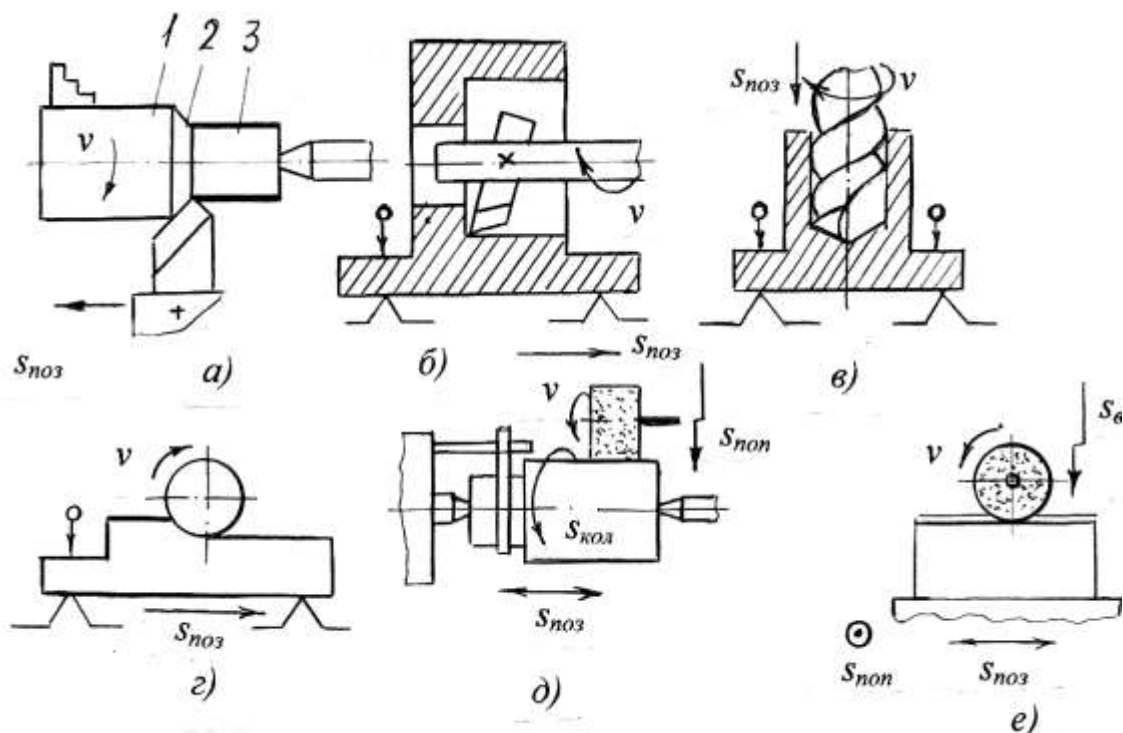


Рисунок 1 – Схеми обробки заготовок:

- а) – точінням; б) – розточуванням; в) – свердлінням; г) – фрезеруванням;
 д) – шліфуванням на круглошліфувальному верстаті; е) – шліфуванням на
 плоскошліфувальному верстаті

Глибиною різання t називають відстань між оброблюваною і обробленою поверхнями заготовки, виміряну перпендикулярно до останньої, тобто товщину матеріалу, що знімається за один прохід. Глибина різання має розмірність *мм*. Під час точіння $t = (D_{заг} - d)/2$, де $D_{заг}$ – діаметр заготовки, *мм*; d – діаметр обробленої деталі, *мм*. У випадку свердління $t = D_{св}/2$, де $D_{св}$ – діаметр свердла, *мм*; під час розточування або розсвердлювання $t = (D_1 - D_0)/2$, де D_1 – діаметр обробленого отвору, *мм*; D_0 – діаметр початкового отвору, *мм*.

1.4 Геометричні параметри різального інструмента

Геометричні параметри різального інструмента доцільно вивчати на прикладі токарного прямого прохідного різця. Геометричні параметри інших різальних інструментів аналогічні цим параметрам.

Токарний різець (рис. 2) складається з *робочої частини (головки) 2* і *стрижня (тіла) 6*, який призначений для закріплення різця в різцетримачі верстата. Різальна робоча частина заточується так, щоб утворити на ній такі поверхні: *передню 5*, по якій сходить стружка, *головну задню 7*, обер-

нену до поверхні різання заготовки, *допоміжну задню 1*, обернену до обробленої поверхні заготовки.

Перетин передньої і головної задньої поверхонь утворює *головну різальну кромку 4*, а перетин передньої і допоміжної задньої поверхонь – *допоміжну різальну кромку 3*. Перетин головної та допоміжної різальних кромок утворює *вершину різця 8*.

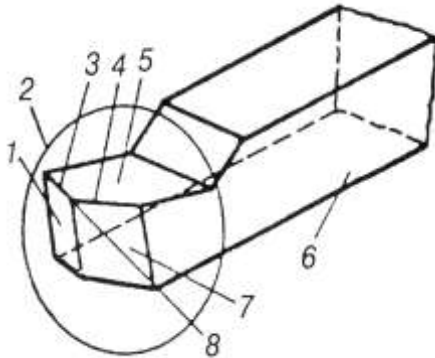


Рисунок 2 – Основні частини і елементи токарного різця

Інструмент заточують по передній і задній поверхнях.

З метою вивчення кутів, під якими розташовуються поверхні різальної частини інструмента одна відносно одної, введена статична система координат (рис. 3).

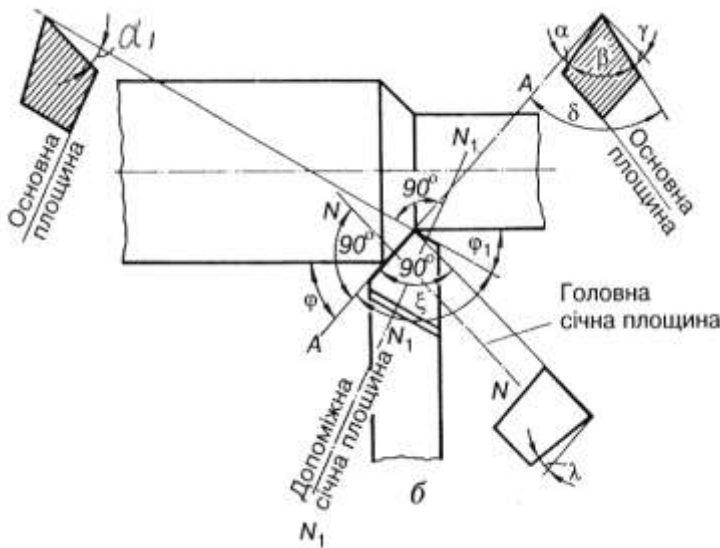


Рисунок 3 – Куты різця

Основна площина – це площина, проведена крізь точку різальної кромки різця перпендикулярно до напрямку швидкості головного руху. Вона паралельна поздовжньому чи поперечному переміщенню різця під час роботи верстата.

Площиною різання називають площину, дотичну до різальної кромки і перпендикулярну до основної площини. Площина, перпендикулярна лінії перетину основної площини і площини різання, називається *головною січною площиною N - N*. Допоміжна січна площина *N₁ - N₁* перпендикулярна до проєкції допоміжної різальної кромки на основну площину.

Кути різця, вимірювані в головній січній площині, називаються *головними*, а вимірювані в допоміжній січній площині – *допоміжними*.

Кути інструмента суттєво впливають на продуктивність процесу різання і якість обробки.

Головний передній кут γ вимірюють в головній січній площині між передньою поверхнею різця і площиною, перпендикулярною до площини різання. Цей кут відіграє важливу роль у процесі різання. З його збільшенням полегшується врізання інструмента в заготовку, зменшується деформація зрізаного шару, сили різання і витрати потужності. Одночасно полегшуються умови сходу стружки і підвищується якість обробки. Однак, надмірне збільшення кута γ призводить до послаблення міцності різальної частини різця, збільшення його спрацювання, погіршення умов відведення теплоти від різальної кромки.

В практиці різання цей кут становить від (-10°) до $(+20^\circ)$. Менші значення переднього кута вибирають у разі обробки крихких і твердих матеріалів, більші – у разі обробки заготовок з м'яких і в'язких матеріалів.

Головний задній кут α вимірюють між головною задньою поверхнею і площиною різання.

Його наявність зменшує тертя задньої поверхні різця об поверхню різання, що зменшує спрацювання інструмента по головній задній поверхні. Однак, його надмірне збільшення призводить до зниження міцності різального леза. На практиці кут α становить $6...12^\circ$.

Кут загострення β – кут між передньою і задньою поверхнями різця.

Кут різання δ – кут між передньою поверхнею різця і площиною різання.

Між головними кутами різця можуть бути такі співвідношення:

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ; \alpha + \beta = \delta; \delta + \gamma = 90^\circ.$$

Головний кут в плані φ – кут в основній площині між площиною різання і напрямом руху подачі. Він суттєво впливає на шорсткість обробленої поверхні заготовки. З його зменшенням шорсткість знижується, але зростає сила різання і деформування заготовки. Зазвичай, кут φ вибирають $30...90^\circ$.

Допоміжний кут в плані φ_1 – це кут в основній площині між проекцією допоміжної різальної кромки на основну площину і напрямом, зворотним напрямку подачі. Із зменшенням цього кута знижується шорсткість обробленої поверхні з одночасним збільшенням міцності вершини різця.

Кут нахилу основної різальної кромки λ – кут в площині різання між головною різальною кромкою й основною площиною. Зі збільшенням цього кута якість обробленої поверхні погіршується.

1.5 Процес стружкоутворення під час різання металів та явища, що його супроводять

Різнання металів – це складний процес взаємодії різального інструмента і заготовки, під час якого відбувається деформування шару металу і зсув його окремих елементів з поверхні заготовки у вигляді *стружки*.

Залежно від оброблюваного металу та умов різання утворюються три види стружки: *зливна*, *сколювання* та *надлому*. Зливна стружка утворюється під час обробки пластичних металів зі значними швидкостями різання та невеликими подачами і має вигляд суцільної стрічки, звитої в спіраль з чистою і гладенькою прирізцевою поверхнею (рис. 4, *а*). На її зовнішній поверхні є невеликі пилкоподібні зазубрини. Стружка сколювання (рис. 4, *б*) утворюється під час обробки металів середньої твердості з невисокими швидкостями різання і значними подачами та являє собою стрічку з гладенькою прирізцевою стороною і пилкоподібною протилежною з чітко вираженими зазубринами. Стружка надлому (рис. 4, *в*) утворюється під час різання крихких металів (чавуну, бронзи, деяких алюмінієвих сплавів) і складається з окремих, не зв'язаних між собою елементів.

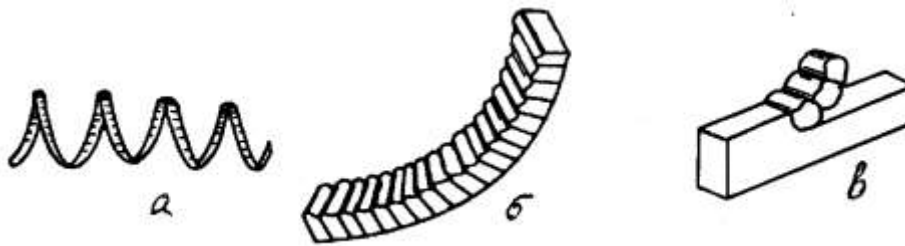


Рисунок 4 – Види стружок

Процес різання металів супроводжується такими явищами:

- * збільшенням міцності та твердості (*наклепом*) поверхневого шару заготовки внаслідок його пружного та пластичного деформування і виникнення в ньому напружень, які здатні спотворювати геометричну форму оброблених поверхонь, знижувати точність їх взаємного положення і розмірів;

- * значним виділенням теплоти внаслідок пружно-пластичного деформування в зоні стружкоутворення і тертя стружки та заготовки об поверхні інструмента. Наслідком цього явища є нагрівання заготовки та інструменту, що знижує стійкість останнього та спричиняє погіршення точності і якості деталей. Для зменшення негативного впливу теплоти на процес різання обробку ведуть в умовах застосування мастильно-охолодної рідини, яка крім охолодження завдяки мастильним властивостям зменшує тертя між інструментом і заготовкою й роботу деформації;

* *наростоутворенням*, яке полягає в тому, що внаслідок адгезійної взаємодії, великого тертя між стружкою та різцем і значного виділення теплоти на передній поверхні різця біля різальної кромки затримується і дуже міцно укріплюється шар металу стружки, який називається *наростом*. Частки наросту постійно виносяться стружкою й обробленою поверхнею заготовки, інколи наріст повністю руйнується й утворюється знову. Маючи високу твердість, наріст здатен різати метал, він захищає вершину різця і різальну кромку від передчасного спрацювання, поліпшує відведення теплоти із зони різання і під час чорнової обробки його вплив на процес різання є позитивним. Але, оскільки точність і якість обробки за утворення наросту погіршуються, то під час чистової обробки його потрібно уникати.

Контрольні питання

1. Як класифікуються рухи в металорізальних верстатах?
2. Що називається схемою обробки?
3. Що відноситься до основних параметрів режиму різання?
4. Які бувають види стружки?
5. Якими явищами супроводжується процес різання?

2 ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ

Різальні інструменти працюють в умовах значних силових навантажень, високих температур і тертя. Тому інструментальні матеріали мають задовольняти низку особливих експлуатаційних вимог. Потрібно, щоб матеріал робочої частини інструменту мав високу твердість і високі допустимі напруження на згин, розтяг, стиск, кручення. Твердість матеріалу робочої частини інструменту має значно перевищувати твердість матеріалу заготовки.

Потрібно, щоб інструментальні матеріали мали високу теплостійкість, тобто зберігали високу твердість за значних температур нагрівання. Однією з найважливіших характеристик матеріалу робочої частини інструменту є зносостійкість. Чим вище зносостійкість, тим повільніше спрацьовується інструмент і тим меншою буде різниця розмірів деталей, які послідовно оброблюються одним і тим самим інструментом.

Інструментальні матеріали поділяються на:

- * інструментальні сталі;
- * тверді сплави;
- * мінералокерамічні матеріали;
- * абразивні матеріали.

2.1 Інструментальні сталі

Вуглецеві інструментальні сталі вміщують 0,9...1,3% С. Для виготовлення інструментів застосовують якісні сталі У10А, У11А, У12А. Після термічної обробки сталі мають твердість HRC 60...62, теплостійкість 200...250 °С. Допустимі швидкості різання інструментом з таких сталей не перевищує 15...18 м/хв. Вони мають обмежене застосування. З них виготовляють мітчики, плашки, ножовочні полотна.

Леговані інструментальні сталі виготовляють на базі вуглецевих інструментальних сталей, легуючи їх незначними кількостями хрому (Х), вольфраму (В), марганцю (Г), кремнію (С), ванадію (Ф). Після термічної обробки вони мають твердість HRC 62...64, теплостійкість 250...300 °С. Допустимі швидкості різання 15...25 м/хв. Для виготовлення протяжок, свердел, мітчиків, плашок, розверток використовують сталі 9ХВГ, ХВГ, ХГ, 6ХС, 9Х5ВФ та ін.

Швидкорізальні сталі містять 8,5...19% вольфраму, 3,8...4,4% хрому (Х), 2...10% кобальту (К), ванадію (Ф) і молібдену (М). Для виготовлення різальних інструментів використовують сталі Р9, Р12, Р18, Р6М3, Р9Ф5, Р14Ф4, Р18,Ф2, Р9К5, Р9К10, Р10К5Ф2 та ін. (літера Р показує, що сталь швидкорізальна, число після неї вказує на вміст вольфраму в процентах). Різальний інструмент з такої сталі після термічної обробки має твердість HRC 62...65, теплостійкість 600...630 °С, підвищену зносостійкість і може працювати зі швидкостями різання до 80 м/хв. Зі швидкорізальних сталей виготовляють різці, фрези, зенкери, протяжки, розвертки, довб'яки, шевери тощо.

2.2 Тверді сплави

Тверді сплави – це твердий розчин карбідів вольфраму (WC), карбідів титану (TiC) і карбідів танталу (TaC) в кобальті (Co). Тверді сплави застосовують у вигляді пластинок певної форми й розмірів, виготовлених методом порошкової металургії. Пластинки попередньо пресують, а потім спікають за температури 1500...1900 °С. Пластинками оснащують різці, свердла, фрези та інші інструменти, припаюючи їх латунними припоями або прикріплюючи механічним способом.

Розрізняють тверді сплави:

- * вольфрамові – BK2, BK3, BK3M, BK4B, BK6M, BK10 та ін.;
- * титано-вольфрамові – T30K4, T15K6, T5K10, T5K12B та ін.;
- * титано-тантало-вольфрамові – TT7K12, TT20K9 та ін.

В марках твердих сплавів перші літери показують групу, до якої відноситься твердий сплав (BK – вольфрамова, T – титано-вольфрамова, TT – титано-тантало-вольфрамова), цифри у вольфрамовій групі – вміст кобальту, перші цифри в титано-вольфрамовій групі – вміст карбіду титану, а другі цифри – вміст кобальту. Перші цифри в титано-тантало-вольфрамовій групі – вміст карбідів титану й танталу, а другі цифри – вміст кобальту. Решта у всіх групах – карбіди вольфраму. Літера M в марці сплаву означає, що сплав виготовлений з дрібних порошків, літера B – із крупнозернистого карбіду вольфраму.

Пластинки твердого сплаву мають твердість HRA 86...90, високу зносостійкість і теплостійкість 800...1000 °С, що дозволяє вести обробку зі швидкостями різання до 800 м/хв.

2.3 Мінералокераміка

Мінералокераміка – синтетичний матеріал на основі глинозему (Al_2O_3), із якого методом порошкової металургії пресують і спікають за температури 1720...1750 °С пластинки, які прикріплюють до державок різців чи корпусів інструментів. Високі твердість (HRA 91...93), теплостійкість (до 1200 °С) і зносостійкість дозволяють працювати зі швидкостями різання до 1000 м/хв. Недоліками мінералокераміки є низька міцність і крихкість, що обмежує її використання. Інструменти, оснащені пластинками з мінералокераміки, можна ефективно використовувати в умовах безударних навантажень за напівчистої і чистої обробки деталей зі сталі і кольорових металів. Для підвищення експлуатаційних характеристик інструментів із пластинками з мінералокераміки до неї додають W, Mo, B, Ti, Ni. Такі матеріали називають *керметами*. Кермети можна ефективно використовувати під час обробки деталей з важкооброблюваних матеріалів.

2.4 Абразивні матеріали

Абразивними називаються матеріали, які використовуються для виготовлення *абразивного інструменту* – шліфувальних кругів, брусків то-

що. У промисловості застосовують переважно штучні абразивні матеріали: електрокорунд (Al_2O_3), карборунд (SiC), синтетичні алмази, ельбор.

Електрокорунд виготовляють із глинозему плавленням в електропечах. Залежно від вмісту в ньому чистого оксиду алюмінію електрокорунд поділяють на електрокорунд нормальний (12А, 13А), білий електрокорунд (22А, 23А), хромистий електрокорунд (37А), монокорунд(43А). Інструмент з електрокорунду використовують, переважно, для обробки загартованої і термічно необробленої сталі, ковкого чавуну, бронзи та ін.

Карборунд (карбід кремнію) теж виготовляють в електропечах із суміші антрациту і кварцового піску. Порівняно з електрокорундом карборунд більш твердий і крихкий. Чорний карбід кремнію (53С, 54С) застосовують для шліфування чавуну, мідних і алюмінієвих сплавів. Зелений карбід кремнію (63С, 64С) використовують для обробки твердих сплавів.

Синтетичні алмази застосовують для остаточного шліфування твердосплавного інструмента й особливо тонкої чистової обробки.

Ельбор (кубічний нітрид бору) має більшу теплостійкість, ніж алмаз і використовується для обробки високотвердих матеріалів і конструкційних сталей.

Контрольні питання

1. Які вимоги мають задовольняти інструментальні матеріали?
2. Як класифікують інструментальні матеріали?
3. Як класифікують і маркують інструментальні сталі? Які їх властивості?
4. Які інструментальні тверді сплави застосовуються в металообробці? Як вони маркуються та які їх властивості?
5. З яких матеріалів виготовляють абразивний інструмент?

3 МЕТАЛОРИЗАЛЬНІ ВЕРСТАТИ

Сучасні металорізальні верстати – це різноманітні й досконалі робочі машини, на яких здійснюється обробка заготовок із метою надання їм необхідних розмірів, форми і якості поверхонь. Використовуючи механічні, електричні та гідравлічні методи здійснення рухів і керування робочим циклом, обробкою на металорізальних верстатах вирішуються найскладніші технологічні задачі з виготовлення деталей будь-яких розмірів, маси, форми, точності, із будь-яких матеріалів практично для кожної галузі машинобудування.

3.1 Класифікація та нумерація металорізальних верстатів

В основу системи класифікації металорізальних верстатів покладено технологічний метод обробки заготовок згідно з такими ознаками, як вид різального інструмента, характер оброблюваної заготовки та схема обробки. За цією системою металорізальні верстати поділені на дев'ять груп: 1 група – токарні верстати; 2 – свердлильні й розточувальні; 3 – шліфувальні; 4 – верстати для електрофізичної та електрохімічної обробки; 5 – верстати для обробки зубчастих коліс і нарізання різьб; 6 – фрезерні; 7 – стругальні, довбальні та протяжні; 8 – розрізні; 9 – різні верстати та пристрої, що не ввійшли до жодної з перелічених груп (балансувальні, ділильні, для виготовлення пилок тощо). В кожній групі верстати об'єднані за спільністю технологічного методу обробки або близькі за призначенням (наприклад, свердлильні та розточувальні).

Кожна група верстатів поділяється на дев'ять типів за технологічним призначенням, конструктивними особливостями, кількістю головних робочих органів, ступенем універсальності тощо.

Всередині кожного типу верстати різняться своїми характерними, притаманними кожному типу розмірами.

Згідно з прийнятою системою класифікації кожній моделі верстата присвоюють певний номер, що складається з трьох або чотирьох цифр і літер. Перша цифра вказує на групу верстата, друга – на тип у цій групі. Третя або третя та четверта цифри показують умовний розмір верстата: для токарних верстатів – це висота центрів над станиною в сантиметрах або дециметрах, для свердлильних – максимальний діаметр отвору, який можна просвердлити на цьому верстаті, для фрезерних – умовний розмір стола тощо.

Літера, що стоїть після першої або другої цифри, вказує на модернізацію (поліпшення) основної базової моделі верстата, а літера, що стоїть у кінці номера, означає модифікацію (видозміну) базової моделі.

Приклади нумерації верстатів: 162 – це верстат токарної групи (1), токарно-гвинторізальний (6), висота центрів 2 дм (200 мм); 1А62, 1К62 – це токарно-гвинторізальні верстати, основна базова модель яких (162) пройшла послідовну модернізацію (літери А і К) із поліпшенням конструкції, зокрема, із підвищенням потужності та діапазону частот обертан-

ня шпинделя; номер 2135 означає, що це верстат належить свердлильній групі (2), вертикально-свердлильний (1), із найбільшим діаметром свердління 35 мм.

За рівнем спеціалізації розрізняють верстати *універсальні*, призначені для виконання різноманітних робіт із використанням заготовок багатьох найменувань в умовах одиничного, дрібносерійного та ремонтного виробництва; *спеціалізовані*, на яких обробляють деталі одного найменування, але різних розмірів, наприклад, колінчасті вали; *спеціальні*, на яких виконують певний вид робіт на одній певній деталі в масовому виробництві.

За ступенем точності верстати поділяють на п'ять класів: Н – нормальної точності, П – підвищеної, В – високої, А – особливо високої точності і С – особливо точні верстати.

За ступенем автоматизації розрізняють верстати з *ручним керуванням, напівавтоматами, автоматами та верстати з програмним керуванням*.

Автоматами називають верстати, на яких після їх увімкнення всі операції здійснюються автоматично без участі оператора за циклом, що періодично повторюється. До циклу входить установлення й закріплення заготовки на верстаті, обробка її поверхонь, знімання обробленої деталі, подача й закріплення наступної заготовки.

Напівавтомати відрізняються від автоматів тим, що знімання обробленої деталі, установлення нової заготовки на верстат і увімкнення верстата здійснює оператор. Цикл обробки ж заготовки автоматичний.

Металорізальні верстати із системами числового програмного керування (ЧПК) мають високий рівень автоматизації, включно автоматичну заміну різальних інструментів і заготовок, зміну режимів різання, отримання заданих розмірів поверхонь деталей. Їх застосовують як для виконання простих операцій (свердління отворів, обточування валів тощо), так і для обробки складних фасонних поверхонь.

3.2 Кінематика верстатів

Приводом верстата називають сукупність механізмів, які передають рух від джерела руху (електродвигуна) до робочих органів верстата з закріпленими в них інструментами та заготовками. Залежно від виду руху розрізняють приводи головного руху, подачі та допоміжних рухів.

Рухи робочих органів верстатів здійснюються за допомогою різноманітних передач, які встановлюються між джерелом руху і робочим органом.

Передачею називають механізм, що передає рух від одного елемента до другого (з вала на вал) або перетворює один рух на інший (наприклад, обертальний на поступальний). В передачі елемент, від якого передається рух, називають *ведучим*, а елемент, що приймає рух, – *веденим*. Кожна передача характеризується *передаточним відношенням*, яке показує, в скільки разів частота обертання веденого елемента відрізняється від частоти

обертання ведучого елемента: $i = n_{вн} / n_{вч} = n_2 / n_1$, де i – передаточне відношення; $n_{вн}$ (n_2) – частота обертання веденого вала, об/хв; $n_{вч}$ (n_1) – частота обертання ведучого вала, об/хв.

На рис. 5 наведено схеми деяких передач, що застосовуються в приводах металорізальних верстатів. Передаточні відношення цих передач такі.

Пасова передача (рис. 5, а) здійснюється плоскими, клиновими або круглими пасами за допомогою шківів, закріплених на ведучому та веденому валах. Передаточне відношення передачі $i = d_1 \eta_n / d_2$, де d_1 і d_2 – діаметри ведучого й веденого шківів, мм; η_n – коефіцієнт, який враховує прослизання паса відносно поверхонь шківів ($\eta_n = 0,96 \dots 0,99$).

Ланцюгова передача (рис. 5, б) здійснюється роликівим або безшумним ланцюгом, що з'єднує зірочки, закріплені на ведучому та веденому валах. Передаточне відношення ланцюгової передачі $i = z_1 / z_2$, де z_1 і z_2 – кількості зубців ведучої та веденої зірочки.

Зубчаста передача складається з циліндричних (рис. 5, в) або конічних (рис. 5, г). Передаточне відношення зубчастої передачі $i = z_1 / z_2$, де z_1 і z_2 – кількість зубців ведучого і веденого зубчастих коліс.

Черв'ячна передача (рис. 5, д) складається з черв'яка (гвинта) та черв'ячного зубчастого колеса і призначена для суттєвого зниження частоти обертання веденого вала, коли ведучим є черв'як. Якщо різьба черв'яка має k заходів, а кількість зубців черв'ячного колеса дорівнює z , то передаточне відношення черв'ячної передачі $i = k / z$.

Рейкова передача (рис. 5, е) перетворює обертальний рух рейкового зубчастого колеса на поступальний рух зубчастої рейки. Якщо рейкове колесо має z зубців, а модуль його та рейки m , мм, то за один оберт рейкового колеса рейка переміститься на величину $S = \pi m z$, мм.

Гвинтова передача (рис. 5, ж) складається з гвинта та гайки і призначена для перетворення обертального руху гвинта на поступальний рух гайки. Якщо крок різьби гвинта дорівнює t , мм, кількість заходів різьби дорівнює k , то за один оберт ходового гвинта гайка переміститься на величину $S = tk$, мм.

В таблиці 1 наведено умовні позначення передач і механізмів, найбільш поширених у металорізальних верстатах.

В приводах головного руху та руху подач крім розглянутих передач є ще механізми, за допомогою яких можна змінювати напрям і швидкість руху. Зміна напрямку руху (реверсування) забезпечується включенням в ланку передачі руху між двома паралельними валами I і II (рис. 6, а) «паразитного» колеса z_0 . Під час передачі обертального руху між двома взаємно перпендикулярними валами застосовують реверсивні механізми з конічними зубчастими колесами (рис. 6, б). В обох випадках реверсування вала II досягається переключенням двосторонньої муфти M .

Регулювання швидкості головного руху і руху подач в металорізальних верстатах може бути безступінчастим і ступінчастим. Системи безсту-

пінчастого регулювання дають можливість отримувати частоту обертання шпинделя і величину подачі точно згідно з розрахованим режимом різання і забезпечити, таким чином, оптимальну продуктивність процесу механічної обробки матеріалів. В металорізальних верстатах для безступінчастого регулювання швидкості використовуються системи електромашинного підсилення, системи генератор – двигун, гідравлічні двигуни та механічні пристрої, наприклад, варіатори.

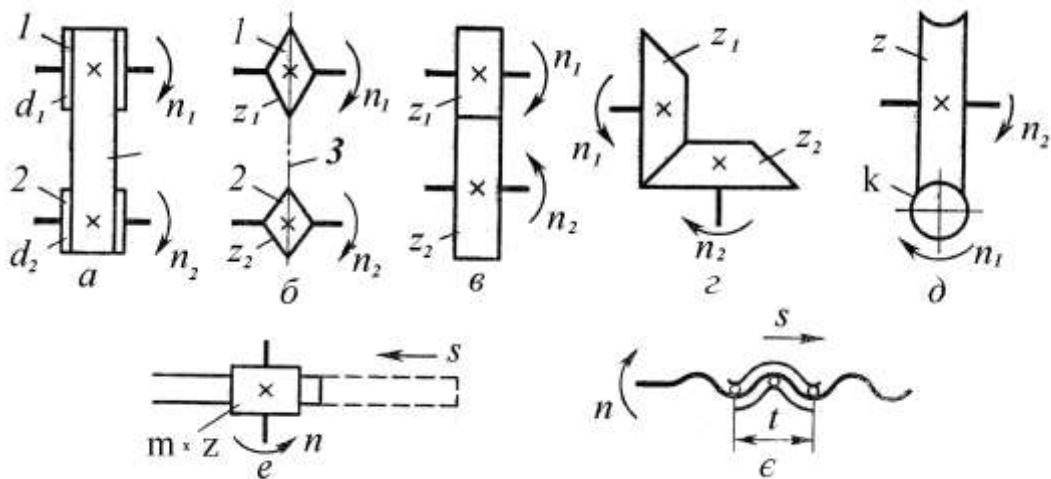


Рисунок 5 – Передачі в металорізальних верстатах

Для ступінчастого регулювання швидкості в металорізальних верстатах використовують дво-, три- і чотиришвидкісні асинхронні електродвигуни та різні механізми на основі зубчастих передач. До них відносяться *гітари*, *коробки швидкостей* в приводах головного руху та *коробки подач* в приводах подач.

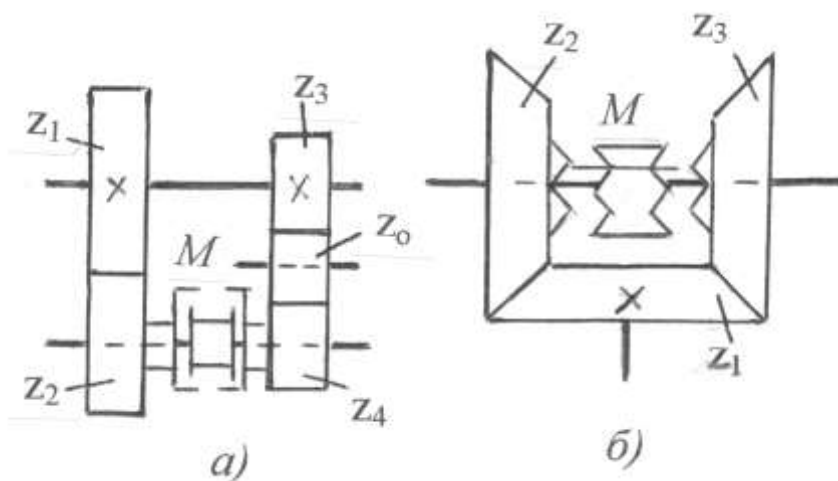


Рисунок 6 – Реверсивні механізми металорізальних верстатів

Гітарами називаються пристрої в приводах металорізальних верстатів, за допомогою яких передача руху з вала I на вал II (рис. 7) здійснюється змінними зубчастими колесами. Виводячи вали I і II за межі станини верстата в зручному для обслуговування місці та підбираючи відповідним чином числа зубців змінних коліс, можна між цими валами забезпечувати практично будь-яке передаточне відношення.

За конструкцією гітари бувають однопарними з двома змінними зубчастими колесами A і B (рис. 7, а) і двопарними (рис. 7, б) з чотирма змінними колесами a , b , c , d . В однопарних гітарах кількість можливих швидкостей дорівнює кількості змінних коліс. Передаточне відношення i визначається числами зубців A і B : $i = A/B$. Однопарні гітари встановлюють у приводах головного руху і, зазвичай, вони забезпечують 2...12 швидкостей.

Передаточне відношення двопарної гітари для кожної настройки привода з такою гітарою визначається співвідношенням чисел зубців змінних коліс:

$$i = \frac{a}{b} \frac{c}{d}.$$

До верстатів з двопарною гітарою додаються набори змінних коліс. Набори бувають п'яткові, парні та універсальні. В п'ятковому наборі числа зубців змінних коліс від 20 до 100 змінюються через 5, в парному наборі – через 4 зубці. Універсальний набір є найповнішим і використовується для відповідальних ділильних ланцюгів.

Двопарні гітари можуть давати необмежену кількість швидкостей і їх встановлюють у приводах взаємопов'язаних рухів (різьбонарізних, обкатки тощо) і в приводах подач.

Гітари як механізми настройки верстатів на певний режим роботи застосовують у спеціальних і спеціалізованих верстатах, де зміна режиму роботи відбувається не часто, бо на заміну зубчастих коліс потрібно витрачати певний час. В універсальних же верстатах, під час роботи на яких зміни режимів різання відбуваються досить часто, використовують інші механізми регулювання швидкостей, зокрема коробки швидкостей і коробки подач.

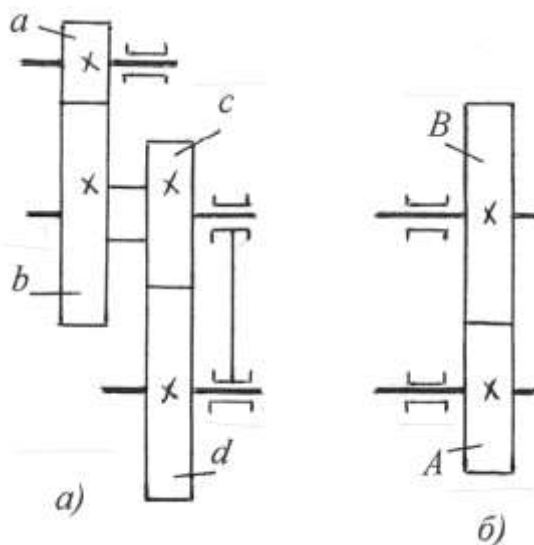


Рисунок 7 – Схеми гітар

Шестеренні коробки швидкостей знайшли значне поширення в металорізальних верстатах завдяки своїй компактності, меншій вартості, зручності передачі обертального руху робочим органам верстатів.

Зміна швидкості обертання веденого вала шестеренних коробок досягається за рахунок включення в роботу певної комбінації зубчастих коліс. В коробках швидкостей використовують різні способи передачі руху з ведучого вала I на ведений вал II:

* *пересувними блоками шестерень* (рис. 8, а). Потрійний блок шестерень *Б* забезпечує три передачі з передаточними відношеннями z_1/z_2 , z_3/z_4 , z_5/z_6 ;

* *переключаючи муфти М*, надаємо обертання валу II через колеса z_1/z_2 чи z_3/z_4 (рис. 8, б, в);

* *накидними шестернями* (рис. 8, г). Зубчасті колеса z_1, z_2, z_3, z_4, z_5 нерухомо закріплені на валу I. Рух на вал II передається зубчастим колесом z_H , що вільно сидить на проміжному валу, і колесом z_0 , яке пересувається на валу II на напрямній шпонці. Механізм забезпечує п'ять передач з передаточними відношеннями $z_1/z_0, z_2/z_0, z_3/z_0, z_4/z_0, z_5/z_0$. Вал II, таким чином, має п'ять значень частоти обертання.

Отже, в приводах металорізальних верстатів є передачі з постійним передаточним відношенням і механізми (гітари, коробки швидкостей), передаточні відношення в яких можна змінювати і, таким чином, регулювати швидкості руху робочих органів верстатів.

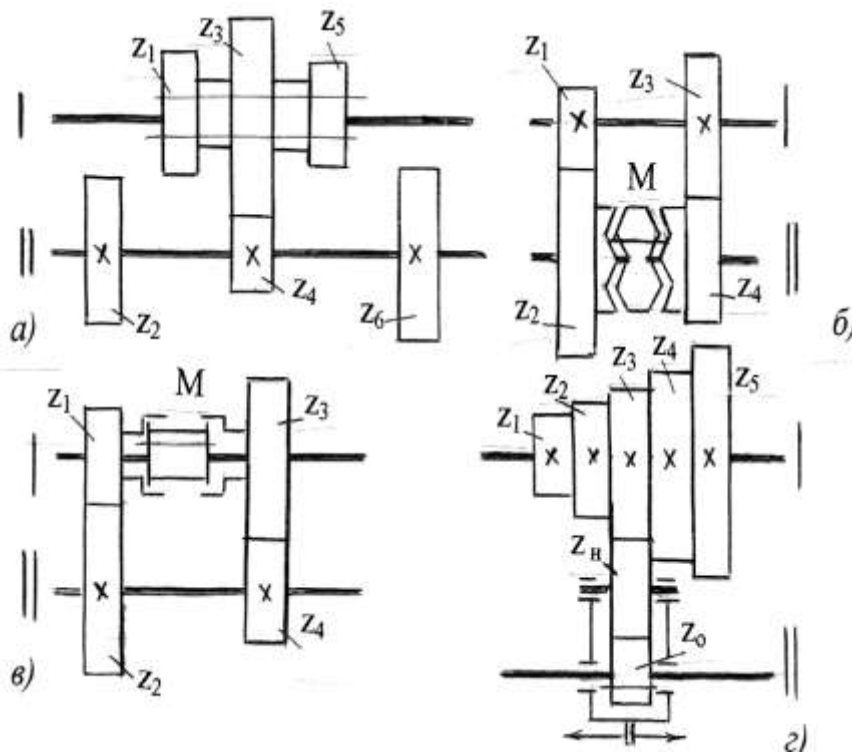


Рисунок 8 – Схеми передач руху в коробках швидкостей

Таблиця 1 – Умовні позначення основних передач і механізмів металорізальних верстатів

Назва елемента	Позначення	Назва елемента	Позначення
Електродвигуни		Пасові передачі: <i>a</i> - плоским пасом; <i>б</i> - клиновими пасами	<i>a)</i> <i>б)</i>
Вал, вісь, стрижень		Ланцюгові передачі: <i>a</i> - роликівим ланцюгом; <i>б</i> - зубчастим (безшумним) ланцюгом	<i>a)</i> <i>б)</i>
Радіальні підшипники на валу: <i>a</i> - без уточнення типу; <i>б</i> - кочення; <i>в</i> - ковзання	<i>a)</i> <i>б)</i> <i>в)</i>	Гвинтова передача: <i>a</i> - з нерознімною гайкою; <i>б</i> - з рознімною гайкою	<i>a)</i> <i>б)</i>
Кінці шпинделей для робіт: <i>a</i> - центрових; <i>б</i> - патронних; <i>в</i> - свердлильних; <i>г</i> - фрезерних; <i>д</i> - шліфувальних	<i>a)</i> <i>б)</i> <i>в)</i> <i>г)</i> <i>д)</i>	Кулачкові муфти зчеплення: <i>a</i> - одностороння; <i>б</i> - двостороння	<i>a)</i> <i>б)</i>
З'єднання деталі з валом; <i>a</i> - нерухоме; <i>б</i> - вільне; <i>в</i> - рухоме вздовж осі з прямою шпонкою; <i>г</i> - рухоме вздовж осі шліцевої; <i>д</i> - нерухоме з'єднання двох деталей на втулці	<i>a)</i> <i>б)</i> <i>в)</i> <i>г)</i> <i>д)</i>	Фрикційні муфти зчеплення: <i>a</i> - дискова одностороння; <i>б</i> - електромагнітна одностороння	<i>a)</i> <i>б)</i>
Зубчасті зачеплення: <i>a</i> - циліндричні з прямими, косими й шевронними зубцями; <i>б</i> - конічне; <i>в</i> - гвинтове; <i>г</i> - черв'ячне (у двох проекціях); <i>д</i> - рейкове	<i>a)</i> <i>б)</i> <i>в)</i> <i>г)</i> <i>д)</i>	Муфта обгону	
		З'єднання двох співосних валів: <i>a</i> - жорстке; <i>б</i> - еластичне; <i>в</i> - телескопічне	<i>a)</i> <i>б)</i> <i>в)</i>

3.3 Кінематична схема верстата

Сукупність умовних позначень передач і механізмів верстата, які забезпечують задані закони руху виконавчих органів, називається кінематичною схемою. Вона дає уявлення про відносне розташування елементів привода та дозволяє встановити, в якому напрямку передається рух, як змінюється його швидкість і на який рух він перетворюється в механізмах привода. Частина кінематичної схеми, яка передає рух від електродвигуна до виконавчого органу або від одного виконавчого органу до іншого, називається кінематичним ланцюгом. Розрізняють кінематичні ланцюги головного руху, руху подач, прискорених і взаємопов'язаних рухів.

Запозичується рух в кожному кінематичному ланцюзі від певного органу верстата і закінчується на відповідному виконавчому органі. Ці органи початку й кінця ланцюгів називаються кінцевими ланками кінематичних ланцюгів. Відношення рухів кінцевих ланок кінематичних ланцюгів один до одного дорівнює загальному передаточному відношенню кінематичного ланцюга між кінцевими ланками, яке дорівнює добутку передаточних відношень усіх механізмів, що беруть участь у передачі руху між кінцевими ланками ланцюга. Рухи кінцевих ланок будь-якого кінематичного ланцюга з урахуванням передаточних відношень усіх проміжних ланок (передач) можна виразити через *рівняння кінематичного балансу* цього ланцюга.

На рис. 9 показано спрощену кінематичну схему токарно-гвинторізного верстата. Головний рух надається шпинделю таким кінематичним ланцюгом: електродвигун $N = 7$ кВт, $n = 1450$ об/хв – пасова передача 225/254 – реверсивний механізм з двосторонньою фрикційною муфтою M_1 – 12-ти ступінчаста коробка швидкостей з пересувними блоками зубчастих коліс B_1 , B_2 і B_3 – шпиндель. Вал I обертається з постійною швидкістю $n_1 = 1450 \cdot 225/254 \cdot 0,98 = 1260$ об/хв. На вал II рух передається за включення муфти M_1 ліворуч через колеса 30–60 (пряме обертання шпинделя), а за включення муфти праворуч – через колеса 36–28–36 (зворотне обертання шпинделя). За нейтрального положення муфти M_1 рух на вал II передаватися не буде. (Подальший аналіз кінематичного ланцюга головного руху розглядатимемо тільки для прямого обертання шпинделя). Вал II обертається також з постійною швидкістю $n = 1260 \cdot 30/60 = 630$ об/хв. На вал III рух передається через потрійний блок зубчастих коліс B_1 : через колеса 36–36, 40–32 або 32–40. Вал III, таким чином, може обертатися з трьома різними швидкостями: $n_1 = 630 \cdot 32/40 = 500$, $n_2 = 630 \cdot 36/36 = 630$ і $n_3 = 630 \cdot 40/32 = 800$ об/хв. З вала III на вал IV кожна з цих трьох швидкостей може передаватися за допомогою подвійного рухомого блока B_2 через колеса 32–50 або 46–36 і вал IV набуває вже шість швидкостей: $n_1 = 500 \cdot 32/50 = 320$; $n_2 = 630 \cdot 32/50 = 400$; $n_3 = 800 \cdot 32/50 = 500$; $n_4 = 500 \cdot 46/36 = 630$; $n_5 = 630 \cdot 46/36 = 800$; $n_6 = 800 \cdot 46/36 = 1000$ об/хв. На вал V кожна з цих 6 швидкостей може передаватися через одну з двох передач подвійного пересувного блока B_3 – 21–67 або 49–39 і вал V (шпиндель) має, таким чином, 12 швидкостей: 100; 125; 160; 200; 250; 315; 400; 500; 630; 800; 1000 і 1250 об/хв.

Рівняння кінематичного балансу ланцюга головного руху записується так:

$$n_{\text{шп}} = 1450 \cdot \frac{225}{254} \cdot 0,98 \cdot \frac{30}{60} \cdot i_{\text{кор.шв}},$$

де $n_{\text{шп}}$ – розрахункова частота обертання шпинделя;
 $i_{\text{кор.шв}}$ – передаточне відношення коробки швидкостей, яке може забезпечити таку частоту обертання шпинделя (або найближчу до неї). З цього рівняння виводиться формула для визначення передаточного відношення коробки швидкостей:

$$i_{\text{кор.шв}} = \frac{n_{\text{шп}} \cdot 254 \cdot 60}{1450 \cdot 225 \cdot 0,98 \cdot 30}.$$

Наприклад, у випадку точіння заготовки діаметром $d = 100$ мм зі швидкістю різання $v = 80$ м/хв частота обертання шпинделя має бути:

$$n_{\text{шп}} = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot d} = \frac{1000 \cdot 80}{3,14 \cdot 100} = 255 \text{ об/хв.}$$

Найближче значення стандартної частоти обертання в нашому випадку є 250 об/хв. Підставивши це значення у формулу для визначення передаточного відношення коробки швидкостей, маємо $i_{\text{кор.шв}} = 0,4$. Таке передаточне відношення забезпечується включенням в роботу таких пар зубчастих коліс коробки швидкостей: 36/36, 46/36, 21/67.

Кінематичний ланцюг подачі запозичує рух від шпинделя і містить такі механізми: зубчасту передачу 45–45, реверсивний механізм з пересувним блоком зубчастих коліс B_4 , за допомогою якого змінюється напрям пересування супорта від ходового гвинта з кроком 8 мм і який використовується під час нарізання лівих і правих різьб; гітари зі змінними колесами a , b , c і d ; коробку подач із ступінчастим блоком зубчастих коліс з накидним колесом 36 і пересувним подвійним блоком B_5 ; муфти M_2 , M_3 , M_4 і двома механізмами пересування супорта – ходовим гвинтом XII і ходовим валом XIII. Ходовий гвинт використовується тільки під час нарізання різьб, а ходовий вал – під час токарних робіт.

Під час нарізання різьби підвищеної точності вмикаються муфти M_2 і M_4 а муфта M_3 вимикається. Рух на ходовий гвинт передається безпосередньо з гітари, яка настроюється на крок різьби τ , що нарізається. Формула настроєння гітари виводиться з рівняння кінематичного балансу різьбонарізного ланцюга:

$$\tau = 1 \text{ об.шп.} \cdot \frac{45}{45} \cdot \frac{42}{42} \cdot \frac{a}{b} \cdot \frac{c}{d} \cdot 8.$$

$$\text{Звідки формула для настроєння гітари: } \frac{a}{b} \cdot \frac{c}{d} = \frac{\tau}{8}.$$

Приклад. Для нарізання метричної різьби з кроком 1мм $\frac{a}{b} \cdot \frac{c}{d} = \frac{1}{8}$. За наявності п'яткового набору змінних зубчастих коліс підбираємо: $a = 25$, $b = 50$, $c = 20$, $d = 80$.

Обертання ходовому гвинту можна надавати і через коробку подач, вимкнувши муфту M_2 і ввімкнувши муфту M_3 . У цьому випадку з гітари рух подається на вал VIII, знімається з одного з п'яти коліс ступінчастого блока на накидну шестерню 36 і вал IX. З вала IX через муфту M_3 рух передається на широке зубчасте колесо 40, що вільно обертається на валу IX і знаходиться в постійному зачепленні з колесом 40 рухомого подвійного блока B_5 вала X. З вала X на вал XI передається через колеса 40 – 20 або 20 – 40 і далі на ходовий гвинт через муфту M_4 . Передаючи рух на ходовий гвинт таким чином за незмінного передаточного відношення гітари можна нарізати різьби з десятьма різними кроками. Так, наприклад, за передаточного відношення гітари $1/4$ мінімальний крок різьби може бути таким:

$\tau_{min} = 1 \text{ об. шп.} \cdot 45/45 \cdot 42/42 \cdot 1/4 \cdot 18/36 \cdot 40/40 \cdot 20/40 \cdot 8 = 0,5 \text{ мм}$, а максимальний – $\tau_{max} = 1 \cdot 45/45 \cdot 42/42 \cdot 1/4 \cdot 54/36 \cdot 40/20 \cdot 8 = 3 \text{ мм}$. Таким різьбонарізним ланцюгом користуються під час нарізання різьб звичайної точності.

Під час токарних робіт рух на ходовий вал XIII з вала XI передається за вимкненої муфти M_4 через колеса 28 – 56 і обгонну муфту M_6 . З ходового вала через колеса 28 – 28 рух передається на двозаходний черв'як, черв'ячне колесо з 60 зубцями, конічну передачу 28 – 28, конічний реверс з двосторонньою кулачковою муфтою M_5 і на рейкове колесо з десятьма зубцями модулем 3 мм.

Мінімальна подача за передаточного відношення гітари $1/4$ буде:

$$s = 1 \text{ об. шп.} \cdot \frac{45}{45} \cdot \frac{42}{42} \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{18}{36} \cdot \frac{40}{40} \cdot \frac{20}{40} \cdot \frac{28}{56} \cdot \frac{28}{28} \cdot \frac{2}{60} \cdot \frac{28}{28} \cdot \frac{28}{28} \cdot \pi \cdot 3 \cdot 10 = 0,09 \text{ мм/об}$$

Максимальна подача буде:

$$s = 1 \text{ об. шп.} \cdot \frac{45}{45} \cdot \frac{42}{42} \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{54}{36} \cdot \frac{40}{20} \cdot \frac{40}{56} \cdot \frac{28}{28} \cdot \frac{2}{60} \cdot \frac{28}{28} \cdot \frac{28}{28} \cdot \pi \cdot 3 \cdot 10 = 1,13 \text{ мм/об.}$$

Прискорене переміщення супорта відбувається за підключення електродвигуна $N = 1 \text{ кВт}$ через пасову передачу з діаметрами шківів 100 – 150 мм на ходовий вал.

Швидкість прискореного переміщення супорта буде:

$$s = 1410 \cdot \frac{100}{150} \cdot \frac{28}{28} \cdot \frac{2}{60} \cdot \frac{28}{28} \cdot \frac{28}{28} \cdot \pi \cdot 3 \cdot 10 = 2950 \text{ мм/хв.}$$

(На цій кінематичній схемі не показано механізм поперечного переміщення верхньої каретки супорта).

Контрольні питання

1. Як позначають металорізальні верстати?
2. За якими ознаками класифікують металорізальні верстати?
3. Що називається кінематичною парою, кінематичним ланцюгом, кінематичною схемою?
4. Що таке рівняння кінематичного балансу, як воно записується?
5. Які існують механізми для регулювання швидкостей робочих органів верстатів?

4 ОБРОБКА ЗАГОТОВОК НА ВЕРСТАТАХ ТОКАРНОЇ ГРУПИ

Згідно з прийнятою системою класифікації металорізальних верстатів усі токарні верстати належать до першої групи і поділяються на 9 типів: 1 і 2 – відповідно одно- і багатошпиндельні автомати і напівавтомати; 3 – револьверні; 4 – свердлильно-відрізні; 5 – карусельні; 6 – токарні і лоботокарні (лобові); 7 – багаторізцеві; 8 – спеціалізовані; 9 – різні токарні. На верстатах цієї групи обробляють зовнішні та внутрішні поверхні тіл обертання: циліндричні, конічні, фасонні, а також плоскі поверхні, перпендикулярні до осі обертання заготовки.

4.1 Обробка заготовок на токарних і токарно-гвинторізних верстатах

Токарні верстати, зазвичай, виготовляють високої і особливо високої точності і вони відрізняються від токарно-гвинторізних відсутністю ходового гвинта. На машинобудівних заводах, в ремонтних майстернях тощо використовують, переважно, токарно-гвинторізні верстати, на яких крім вказаних вище робіт можна ще нарізати різьби різцем на зовнішніх та внутрішніх поверхнях, а також спіральні канавки на торцевих поверхнях заготовок.

Токарно-гвинторізний верстат має такі основні вузли (рис. 10): станина 2, закріплена на тумбах 1 з електродвигуном головного привода і 12 з баком для мастильно-охолодної рідини та насосною станцією; передня бабка 6 з коробкою швидкостей, керування якою виведено на панель 5; задня бабка 11; поздовжній супорт 7 із закріпленими на ньому фартухом 10, верхнім супортом 9 і різцетримачем 8; коробка подач 3; гітара 4.

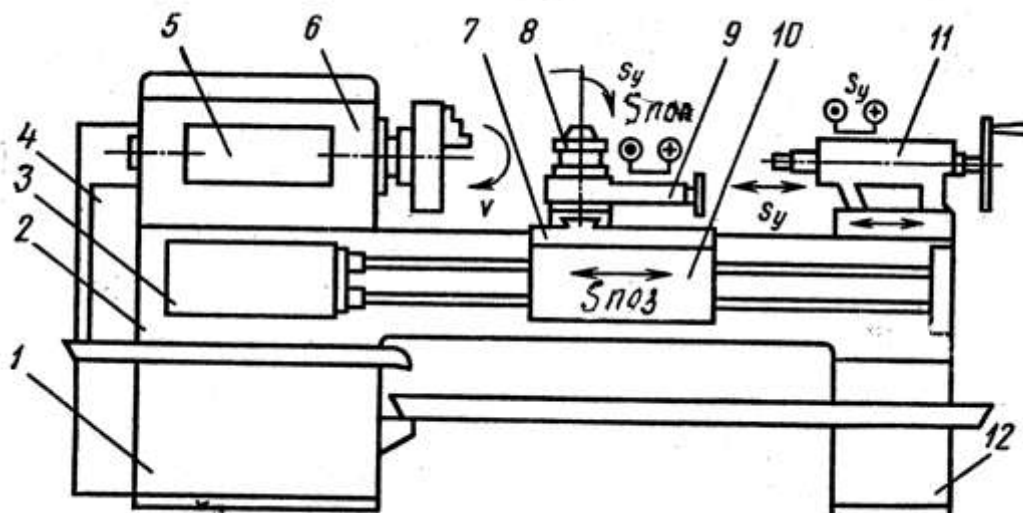


Рисунок 10 – Загальний вигляд токарно-гвинторізного верстата

Станина 2 має напрямні, по яких переміщуються супорт 7 і задня бабка 11. Переміщення супорта може бути як поздовжнім, так і поперечним та здійснюватись як через коробку подач, так і вручну маховиками, змонтованими на фартусі 10. Поздовжнє переміщення супорта може відбуватися або від ходового гвинта під час нарізання різьб, або від ходового вала за інших видів токарних робіт.

Переміщення задньої бабки по напрямних станини здійснюється вручну. В корпусі задньої бабки є шпindel (піноль) з конічним отвором, в якому встановлюється задній центр для підтримування довгих заготовок, наприклад, валів, або інструменти для обробки отворів у заготовці (свердла, зенкери, розвертки). Корпус задньої бабки можна зміщувати в поперечному напрямі на невелику величину, що необхідно для обточування довгих зовнішніх конічних поверхонь.

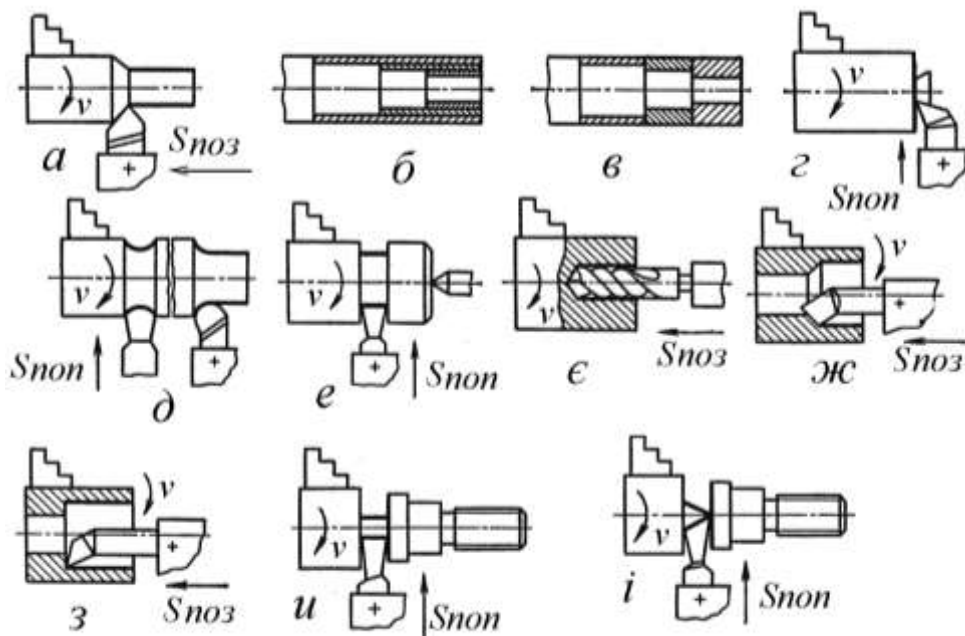


Рисунок 11 – Схеми обробки заготовок на токарних верстатах

Технологічний метод формоутворення поверхонь заготовок точінням характеризується двома рухами: обертальним рухом заготовки (швидкість різання v) і поступальним рухом інструмента (рух подачі s). Рух подачі здійснюється вздовж осі обертання заготовки (s_{noz}), перпендикулярно до осі обертання заготовки (s_{non}) чи під кутом до осі обертання заготовки (s_n на рис.12).

Схеми обробки заготовок на токарно-гвинторізному верстаті показано на рис. 11:

* обточування зовнішніх циліндричних поверхонь прохідними різцями з поздовжньою подачею – рис. 11, а. Ступінчасті вали обточують за схемами поступового зрізання припуску на кожній частині вала (рис. 11, б) або зрізанням на кожній частині вала зразу всього припуску (рис. 11, в);

- * підрізання торців заготовки підрізними різцями з поперечною подачею різця – рис. 11, г;
- * обточування заокруглень між ступенями валів – рис. 11, д;
- * проточування канавок прорізними різцями – рис. 11, е;
- * свердління, зенкерування, розвертування отворів відповідними інструментами, які закріплюють у пінолі задньої бабки, з поздовжньою подачею пінолі вручну – рис. 11, є;
- * розточування наскрізних циліндричних отворів прохідними розточувальними різцями (рис. 11, ж), а глухих або ступінчастих – упорними (рис. 11, з);
- * відрізання оброблених деталей відрізними різцями з прямою головною різальною кромкою (рис. 11, и) або похилою різальною кромкою (рис. 11, і).

Обточування зовнішніх конічних поверхонь заготовок на токарних верстатах здійснюється одним з таких способів:

1. Широкими токарними різцями з їх поперечною подачею (рис. 12, а).

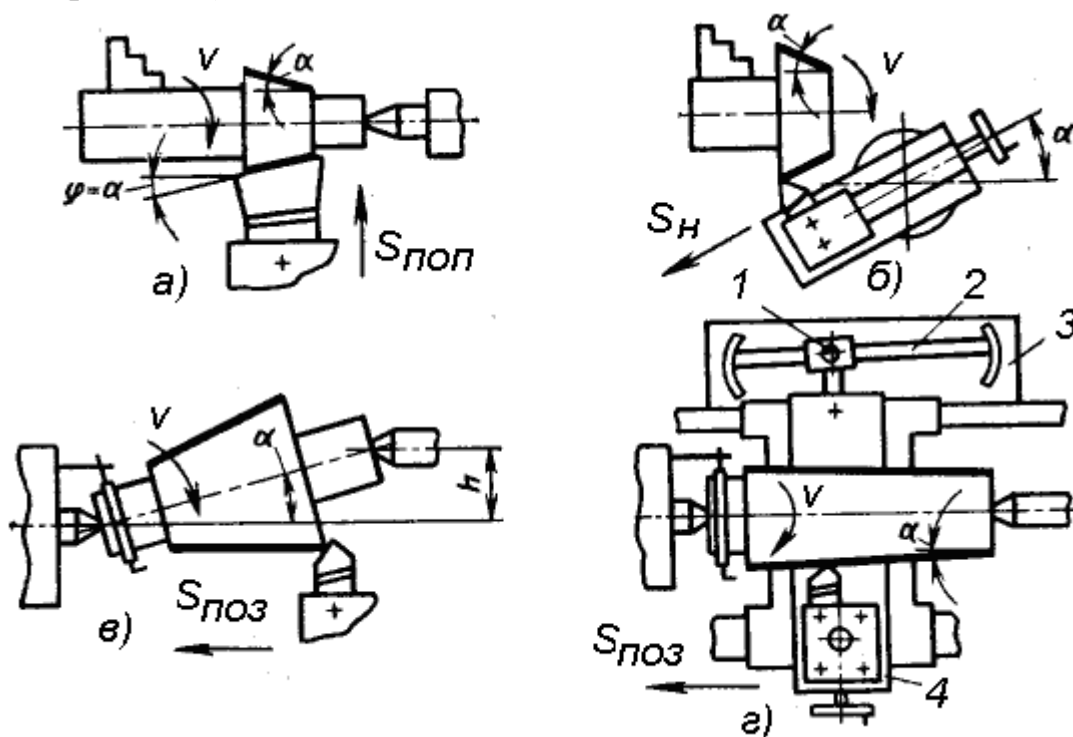


Рисунок 12 – Схеми обточування зовнішніх конічних поверхонь на токарних верстатах

2. Поворотом каретки верхнього супорта на кут α , що дорівнює половині кута при вершині оброблюваного конуса (рис. 12, б). Подачу s_H здійснюють вручну пересуванням каретки верхнього супорта.
3. Зміщенням корпусу задньої бабки на величину h в напрямі, перпендикулярному до лінії центрів верстата (рис. 12, в).

4. З допомогою конусної лінійки 2, корпус якої 3 закріплюють на станині верстата. Конусна лінійка встановлюється під кутом α до лінії центрів верстата і по її напрямних переміщується повзун 1, з'єднаний з кареткою поперечного супорта 4. Таким чином, верхній каретці одночасно надаватимуться два рухи: поздовжній разом із супортом і поперечний, що й забезпечить утворення конічної поверхні на заготовці.

Крім вказаних операцій на токарно-гвинторізних верстатах обробляють фасонні поверхні фасонними різцями з їх поперечною подачею та прохідними різцями із застосуванням фасонних копирів, які встановлюють аналогічно конусним лінійкам, а також нарізають різні типи різьб різцями з відповідним профілем їх різальних кромки.

4.2 Обробка заготовок на токарно-револьверних верстатах

Токарно-револьверні верстати призначені для обробки деталей порівняно складної форми, що потребують застосування значної кількості різноманітних інструментів. Вони мають спеціальний багатопозиційний пристрій для закріплення інструментів – револьверну головку. Вона монтується на поздовжньому супорті особливої конструкції. Розрізняють револьверні верстати з багатогранною револьверною головкою, що обертається навколо вертикальної осі, та верстати з круглою головкою, яка має горизонтальну вісь обертання. Всі потрібні для обробки деталі інструменти встановлюються заздалегідь у певній послідовності в револьверній головці та в поперечних супортах (передньому і задньому) і під час обробки заготовки їх по чергові швидко вводять у роботу. Інструменти, що працюють з поздовжньою подачею (прохідні та розточувальні різці, свердла, зенкери, розвертки, мітчики, плашки тощо) закріплюють у револьверній головці, а інструменти, що потребують поперечної подачі (відрізні, підрізні, фасонні та ін. різці) – в різцетримачах поперечних супортів. Револьверні верстати з круглою револьверною головкою, яка обертається навколо горизонтальної осі, поперечних супортів не мають. Усі інструменти закріплюють у гніздах револьверної головки. Поперечна подача інструментів на таких верстатах замінюється їх коловою подачею – повільним обертанням револьверної головки навколо горизонтальної осі.

На токарно-револьверних верстатах обточують зовнішні циліндричні поверхні, підрізають торці, свердлять, зенкерують, розвертають і розточують отвори, обточують фасонні поверхні, проточують канавки, нарізають зовнішні (плашками) та внутрішні (мітчиками) різьби.

На рис. 13 показано схему токарно-револьверного верстата з багатогранною головкою, а на рис. 14 показано налагодження револьверного верстата на виготовлення різьбової пробки.

Обробку всіх поверхонь здійснюють за сім переходів, використовуючи в позиціях 3 і 4 паралельну роботу інструментів, що скорочує основний час обробки.

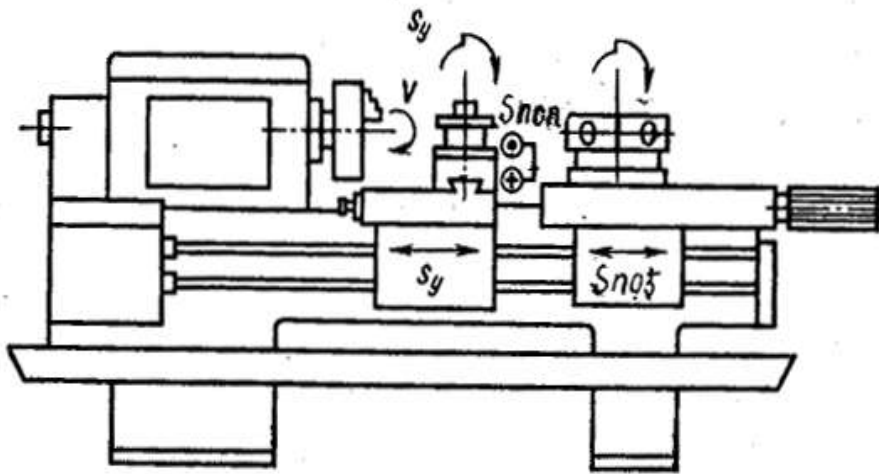


Рисунок 13 – Схема токарно-револьверного верстата

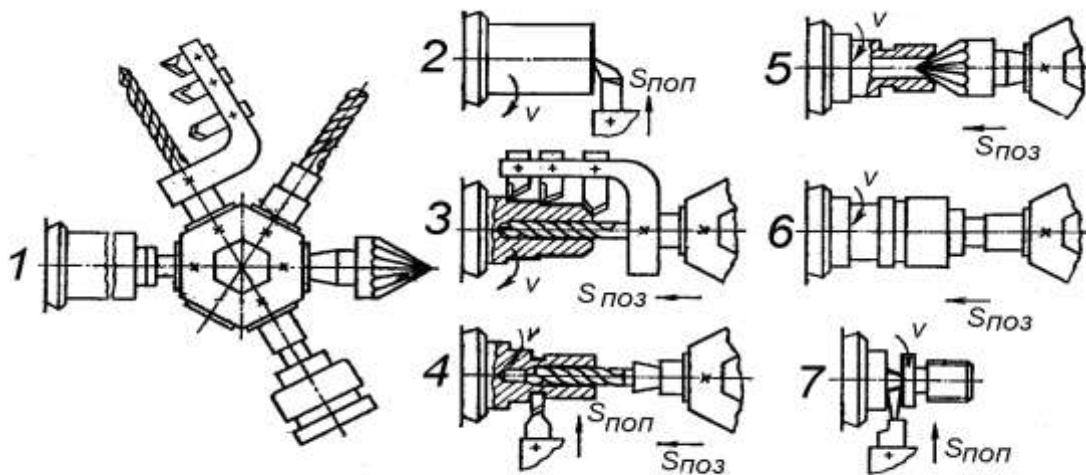


Рисунок 14 – Схеми обробки поверхнь заготовки на револьверному верстаті

1 – подача прутка до упору; 2 – підрізання правого торця; 3 – обточування двох циліндричних поверхонь, знімання фаски і свердління отвору; 4 – зенкерування отвору і проточування кільцевої канавки; 5 – зенкування; 6 – нарізання різьби плашкою; 7 – відрізання готової деталі

4.3 Обробка заготовок на токарно-карусельних верстатах

Токарно-карусельні верстати призначені для обробки важких (масою до 200 т) заготовок великого діаметра (до 24 м) і довжиною до 0,3...0,5 діаметра (ротори водяних і газових турбін, зубчасті колеса, маховики, шківни тощо). Особливістю цих верстатів є наявність круглого горизонтального стола з вертикальною віссю обертання, що полегшує установлення і закріплення заготовок на верстаті. За конструкцією карусельні верстати бувають одно- і двостояковими з діаметрами стола від 0,5 до 21 м.

На рис. 15, а показано схему двостоякового карусельного верстата, а на рис. 15, б – схему обробки заготовки на такому верстаті.

Токарно-карусельний верстат складається зі станини 1, на якій змонтовано круглий стіл (карусель) 12, і стояків 2, з'єднаних поперечиною 6. По вертикальних напрямних стояків переміщується рухома траверса 3, що дає можливість установити її на певному рівні над столом залежно від висоти заготовки.

На траверсі встановлено вертикальний супорт 5 з коробкою подач 4 і револьверний супорт 7 з револьверною головкою 8 і коробкою подач 9. На правому стояку встановлено боковий супорт 10 з коробкою подач 11.

Головним рухом у карусельних верстатів є обертання заготовки, яке здійснюється від привода головного руху з коробкою швидкостей, змонтованими у станині верстата.

Різальні інструменти закріплюють у різцетримачах супортів і в гніздах револьверної головки. Кожен із супортів має горизонтальну та вертикальну подачі. Супорт 5, крім того, має ще поворотні полозки, повертаючи які на кут до $\approx \pm 45^\circ$ можна надавати різцетримачу, встановленому на цих полозках, подачу під заданим кутом і обробляти конічні поверхні.

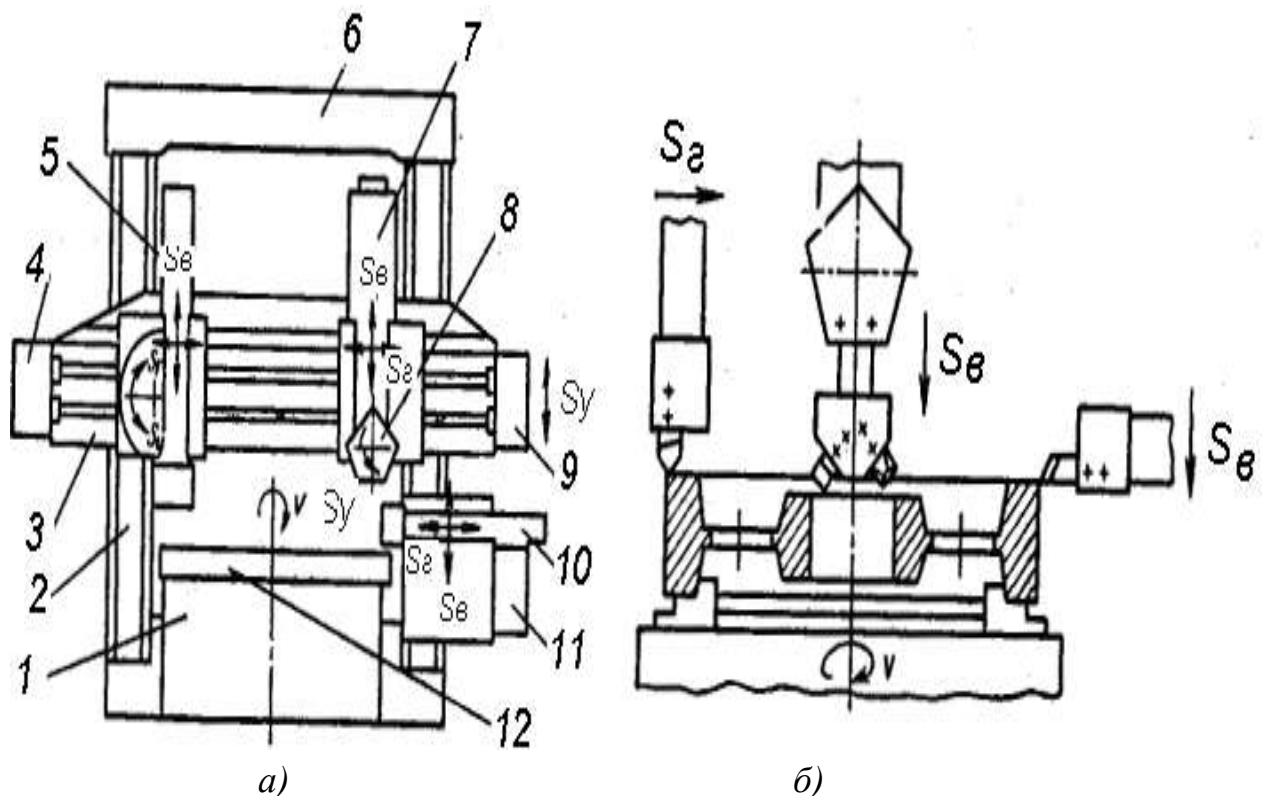


Рисунок 15 – Схеми токарно-карусельного верстата (а) і обробки на ньому заготовки (б)

На токарно-карусельних верстатах можна здійснювати такі операції:

- обточувати зовнішні та розточувати внутрішні циліндричні і конічні поверхні,
- обточувати фасонні поверхні, свердлити, зенкерувати та розвертати отвори,
- обточувати плоскі торцеві поверхні, використовуючи багатоінструментну обробку.

На рис. 15, б наведено схему обробки маховика великого діаметра кількома інструментами.

Контрольні питання

1. На які типи поділяються верстати токарної групи?
2. Які види робіт виконуються на токарно-гвинторізних верстатах?
3. Основні частини токарно-гвинторізного верстата.
4. Основні види токарних різців.
5. Основні методи обробки конічних поверхонь на токарних верстатах.
6. Призначення та особливості будови револьверних верстатів.
7. Призначення та основні види робіт на карусельних верстатах.

5 ОБРОБКА ЗАГОТОВОК НА ВЕРСТАТАХ СВЕРДЛИЛЬНО-РОЗТОЧУВАЛЬНОЇ ГРУПИ

За прийнятою системою класифікації ці верстати відносяться до другої групи і до них належать свердлильні (вертикально-, радіально-, горизонтально-свердлильні), розточувальні (координатно-, горизонтально-розточувальні) та свердлильні автомати й напівавтомати. Головне призначення таких верстатів – обробка отворів у заготовках деталей машин.

5.1 Обробка заготовок на свердлильних верстатах

Свердління – поширений метод отримання в суцільному матеріалі наскрізних і глухих отворів та оброблення попередньо отриманих отворів з метою збільшення їхніх розмірів, підвищення точності та покращення якості поверхні.

Свердління здійснюють за поєднання обертального руху інструмента навколо осі – головного руху і поступального його руху вздовж осі – руху подачі. Обидва ці рухи на свердлильних верстатах надають інструменту.

Найбільш поширеним інструментом для свердління і розсвердлювання є *спіральне свердло* (рис. 16, а), яке складається з робочої частини б, шийки 2, хвостовика 4 і лапки 3.

В робочій частині б розрізняють різальну 1 і напрямну 5 частини з гвинтовими канавками. Шийка 2 з'єднує робочу частину свердла з хвостовиком. Хвостовик 4 потрібен для встановлення свердла в шпинделі верстата. Лапки 3 використовують як упор під час вибивання свердла з отвору шпинделя.

Елементи робочої частини і геометричні параметри спірального свердла показано на рис. 16, б. Свердло має дві головні різальні кромки 11, утворені перетином передніх 10 і задніх 7 поверхонь, які й виконують основну роботу різання; поперечну різальну кромку 12 (перемичку) і дві допоміжні різальні кромки 9. На напрямній частині свердла 5 (рис. 16, а) вздовж гвинтової канавки розташовано дві вузькі стрічки 8 завширшки 0,2...2,6 мм для забезпечення напрямку свердла під час різання. Умови роботи свердла визначаються його геометричними параметрами. *Передній кут* γ вимірюють у головній січній площині II – II, перпендикулярній до головної різальної кромки. *Задній кут* α вимірюють в площині I – I, паралельній осі свердла. Ці кути в різних точках головної різальної кромки різні. Біля зовнішньої поверхні кут γ найбільший, а кут α найменший; ближче до осі – навпаки. *Кут при вершині свердла* 2φ вимірюють між головними різальними кромками і його значення залежить від оброблюваного матеріалу: для обробки сталі і чавуну $2\varphi = 118^\circ$, для обробки м'яких і в'язких матеріалів (алюмінію, силуміну) – $2\varphi = 80...90^\circ$, для свердління твердих і крихких матеріалів – $2\varphi = 13...140^\circ$. *Кут нахилу поперечної різальної кромки* (перемички) 12 свердла $\psi = 50...55^\circ$. *Кут нахилу гвинтової канавки* ω вимірюють по зовнішньому діаметру. З його збільшенням збільшується

передній кут γ ; водночас полегшується процес різання і покращується вихід стружки.

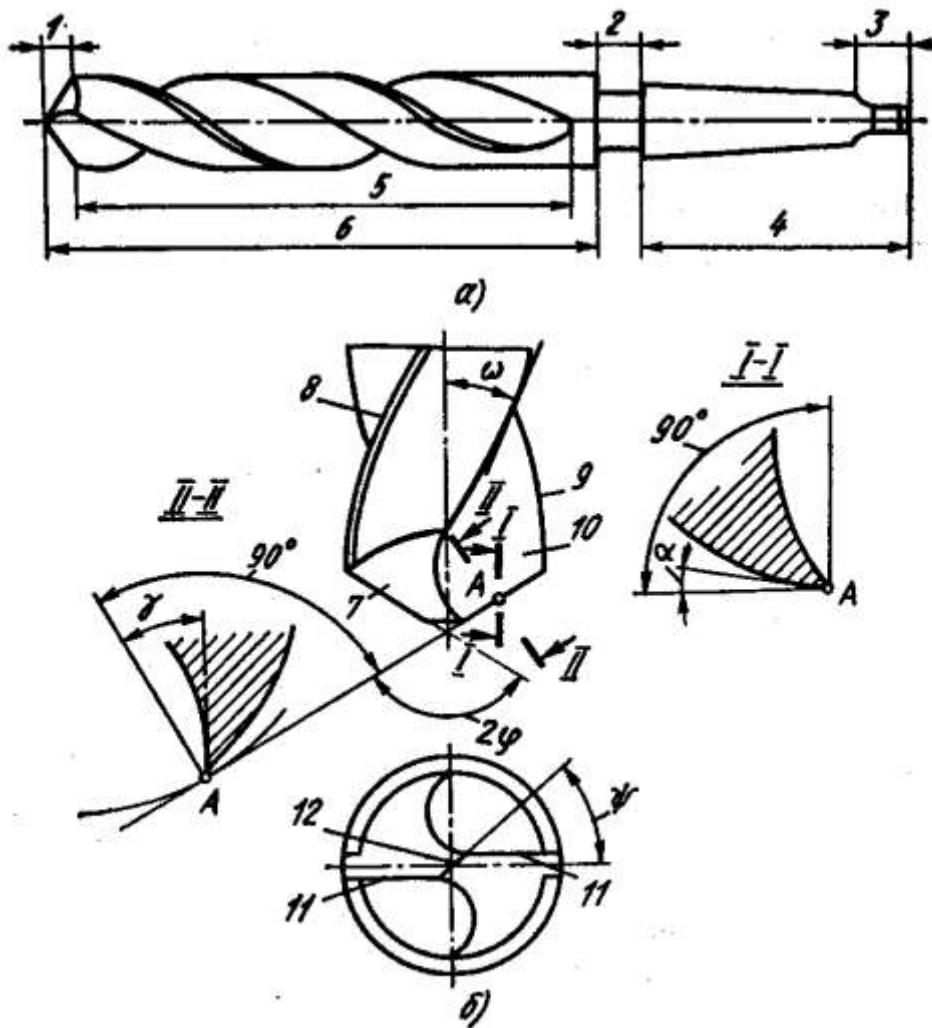


Рисунок 16 – Частина, елементи й кути спірального свердла

Попередньо просвердлені отвори, а також отвори в литих і штампованих заготовках оброблюють *зенкерами* (рис. 17). На відміну від свердел зенкери мають три або чотири головні різальні кромки і не мають поперечної кромки. Різальна частина 1 виконує основну роботу різання. Калібрувальна частина 5 спрямовує зенкер у отвір і забезпечує необхідну точність і шорсткість поверхні (2 – шийка, 3 – лапка, 4 – хвостовик, 6 – робоча частина).

Залежно від призначення зенкери поділяють на циліндричні (рис. 17, а), конічні – *зенківки* (рис. 17, б) та торцеві (рис. 17, в). За способом кріплення зенкери бувають суцільні з конічним хвостовиком (рис. 17, а, б) і насадні (рис. 17, в).

Для остаточної обробки отворів використовують *розвертки*. За формою отвору, що оброблюється, розрізняють циліндричні (рис.17, г) і конічні

ні (рис. 17, д) розвертки. Розвертки мають 6...12 головних різальних кромок, розташованих на різальній частині 7 з напрямним конусом. Калібрувальна частина 8 спрямовує розвертку у отвір і забезпечує необхідні точність і шорсткість поверхні.

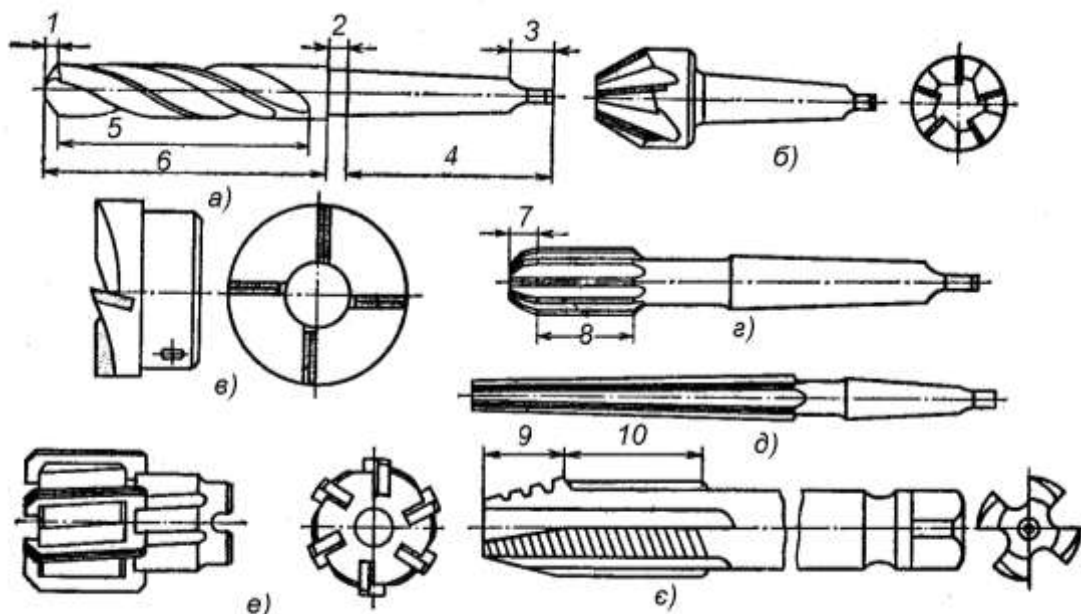


Рисунок 17 - Інструменти для обробки отворів на свердлильних верстах:

a) – в) – зенкери; г) – е) – розвертки; є – мітчик

За конструкцією кріплення розвертки поділяють на хвостові і насадні. На рис. 17, е) показано машинну розвертку з механічним кріпленням різальних пластинок у її корпусі.

Для нарізання зовнішніх різьб на свердлильних верстатах використовують такі інструменти як *мітчики* рис. 17, є). Мітчик – це гвинт з прорізаними прямими чи гвинтовими канавками, які утворюють різальні кромки. Робоча частина мітчика має різальну 9 і калібрувальну 10 частини. Профіль різьби мітчика відповідає профілю різьби, яка нарізається.

В машинобудуванні найпоширенішими свердлильними верстатами є *вертикально-свердлильні* та *радіально-свердлильні*. Це універсальні верстати, призначені для обробки отворів в одиничному та дрібносерійному виробництвах. За використання спеціальних пристроїв, наприклад, багатошпиндельних свердлильних головок, їх можна застосовувати і в крупносерійному та масовому виробництвах.

Загальний вигляд вертикально-свердлильного верстата подано на рис. 18. На фундаментній плиті 1 змонтовано станину 2, у верхній частині якої розміщено коробку швидкостей 6 зі шпинделем, якому надається головний обертальний рух. Рух подачі інструмент отримує від коробки подач 5, розташованої в кронштейні 4. Заготовку встановлюють на столі 3. Су-

міщення осі обертання інструмента з віссю отвору досягається переміщенням заготовки.

Під час обробки великогабаритних значної маси заготовок з отворами, розташованими на значній віддалі один від одного, використовують радіально-свердлильні верстати, в яких суміщення осей різального інструмента і оброблюваних отворів досягається переміщенням шпиндельної головки верстата. На рис. 19 показано загальний вигляд такого верстата. До фундаментної плити 1 прикріплена нерухома колона 2 з гільзою 3, яка може повертатися на 360° . Встановлена на гільзі траверса 4 може переміщуватися по ній вертикально і закріплюватися на певній висоті за допомогою механізму 5. По горизонтальних напрямних траверси переміщується шпиндельна головка 6 з коробками швидкостей 7 і подач 8.

Шпиндель 9 з інструментом отримує головний рух і вертикальну подачу. Заготовка може бути встановлена і закріплена на столі 10 або безпосередньо на фундаментній плиті 1. Поворотом гільзи з траверсою навколо осі колони і переміщенням шпиндельної головки по напрямних траверси досягається суміщення осей інструмента і отвору заготовки.

Схеми операцій, які можна виконувати на вертикально- та радіально-свердлильних верстатах, наведено на рис. 20.

Свердління наскрізного отвору (рис. 20, а) здійснюється спіральним свердлом.

Розсвердлювання (рис. 20, б) – процес збільшення діаметра раніше просвердленого отвору свердлом більшого діаметра. Діаметр отвору під розсвердлювання вибирають так, щоб поперечна різальна кромка в роботі участі не брала для зменшення осьового зусилля.

Зенкерування – обробка попередньо отриманих отворів для надання їм більш правильної геометричної форми, підвищення точності та зниження шорсткості багатолезовим різальним інструментом – зенкером (рис. 20, в).

Розвертання – остаточна обробка циліндричного або конічного отвору розверткою (зазвичай після зенкерування) з метою отримання високої точності і низької шорсткості обробленої поверхні (рис. 20, г), д).

Цекування – обробка торцевої поверхні деталі біля отвору торцевим зенкером для досягнення перпендикулярності плоскої торцевої поверхні до осі отвору (рис. 20, е).

Зенкуванням – отримують у готових отворах циліндричні чи конічні заглиблення під головки гвинтів, болтів, заклепок тощо. На рис. 20, є), ж) показано зенкування циліндричного та конічного заглиблень відповідно циліндричним та конічним зенкерами (зенківками).

Нарізання різьби – отримання в отворі гвинтової канавки за допомогою мітчика (рис. 20, з).

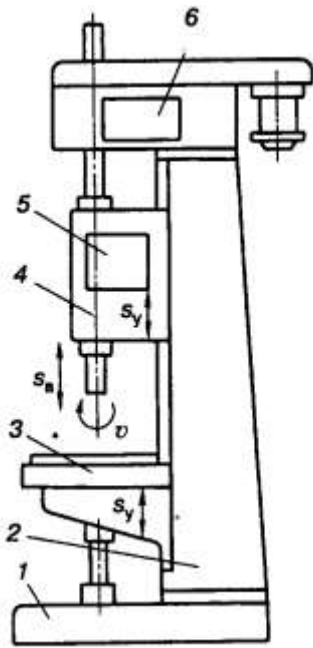


Рисунок 18 – Загальний вигляд вертикально-свердильного верстата

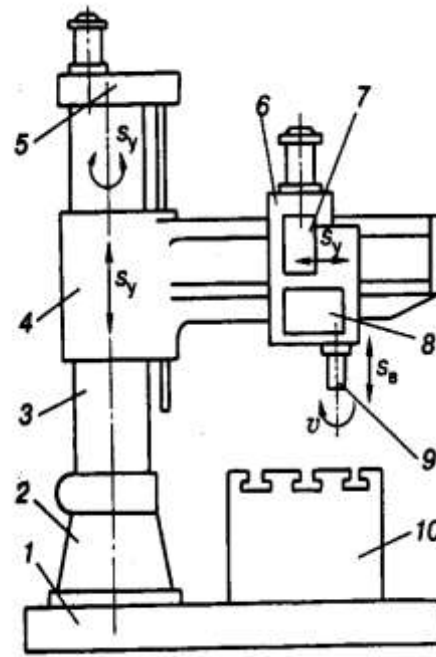


Рисунок 19 – загальний вигляд радіально-свердильного верстата

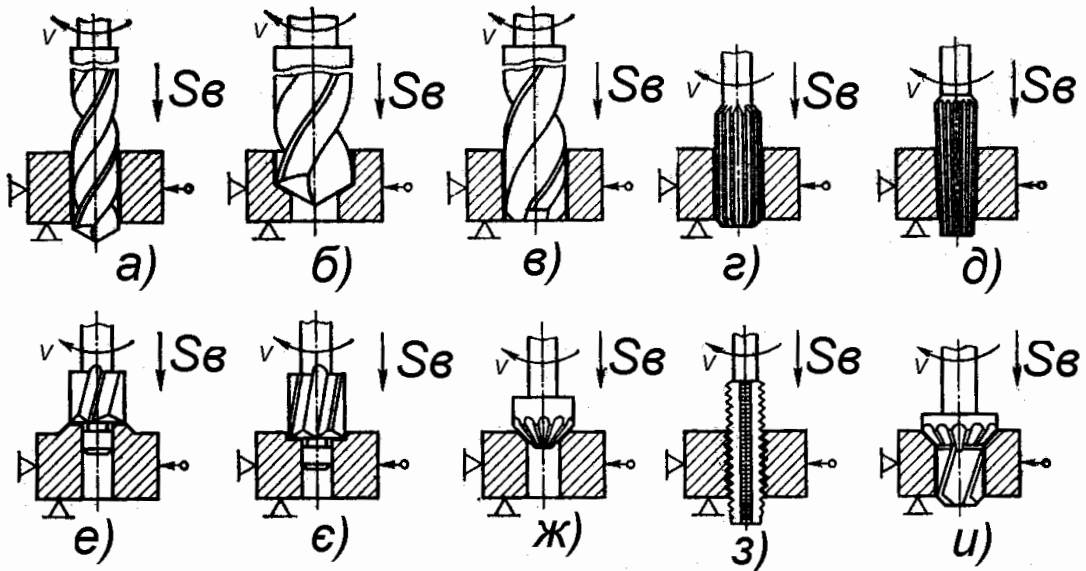


Рисунок 20 – Схеми обробки заготовок на свердильних верстатах

Отвори складного профілю обробляють за допомогою комбінованого різального інструмента. На рис. 20, *u*) показано комбінований зенкер для обробки двох поверхонь: циліндричної і конічної.

Заготовку встановлюють на поворотному столі 11, який розміщується на каретці 10, що переміщується в поперечному напрямі. Каретка 10 встановлена на полозках 9, які переміщуються в поздовжньому напрямі по напрямних станини. Головним рухом є обертання розточувального шпинделя або планшайби. Рух подачі може отримувати стіл 11 (заготовка), розточувальний шпиндель 6, радіальний супорт 5 або ж шпиндельна бабка 5, залежно від оброблюваної поверхні (рис. 22).

На горизонтально-розточувальних верстатах оброблюють циліндричні та конічні отвори, зовнішні циліндричні та плоскі поверхні, уступи, канавки, нарізають різцями зовнішні та внутрішні різьби тощо.

На рис. 22 наведено схеми обробки деяких поверхонь на горизонтально-розточувальних верстатах: розточування циліндричних отворів (рис. 22, а), б), в), розточування конічних отворів (рис. 22, г), підрізання торців різцями (рис. 22, д), е), фрезерування вертикальної поверхні (рис. 22, є).

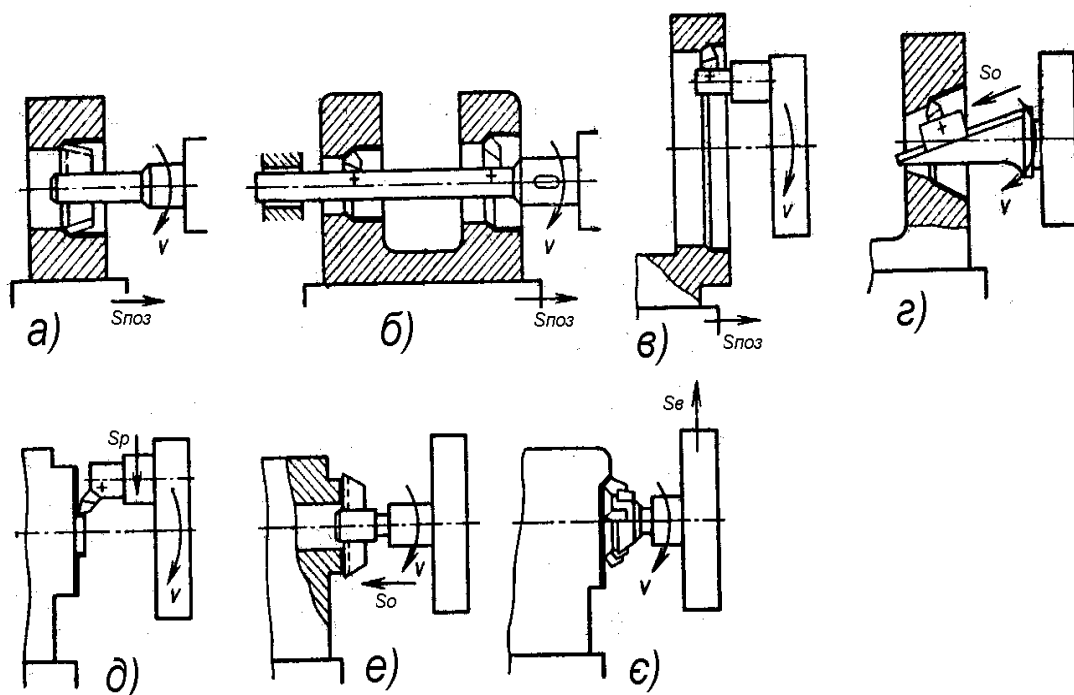


Рисунок 22 – Схеми обробки заготовок на горизонтально-розточувальних верстатах

Координатно-розточувальні верстати призначені для обробки точних отворів, осі яких мають бути точно скоординовані одна відносно іншої або від базових поверхонь. Для точного відрахунку переміщень (координат) верстати обладнані спеціальними оптичними пристроями, які забезпечують точність установлення координатних розмірів до 0,001 мм.

Для забезпечення високої точності обробки ці верстати ізолюють від дії роботи сусіднього обладнання і встановлюють в приміщеннях з постійною температурою $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Застосовують координатно-розточувальні верстати переважно для остаточної обробки отворів у деталях точних приладів і в інструментальних цехах під час обробки точних пристроїв, кондукторів, штампів, пресформ тощо.

Алмазно-розточувальні верстати призначені для остаточної обробки отворів в блоках циліндрів і гільзах тракторних, автомобільних, мотоциклетних двигунів, циліндрів гідравлічних систем тощо алмазними і твердосплавними інструментами.

Висока точність і мала шорсткість обробленої поверхні забезпечується використанням високих швидкостей різання (до 1000 м/хв), незначних подач ($0,01\dots 0,1\text{ мм/об}$) і глибин різання (до $0,2\text{ мм}$).

Контрольні питання

1. На які типи поділяються верстати свердлильно-розточувальної групи?
2. Типи свердлильних верстатів та їх схеми.
3. Операції, які виконуються на свердлильних верстатах.
4. Призначення та типи розточувальних верстатів.
5. Операції, які виконуються на розточувальних верстатах.

6 ОБРОБКА ЗАГОТОВОК НА ФРЕЗЕРНИХ ВЕРСТАТАХ

6.1 Характеристика методу фрезерування

Фрезерування – це високопродуктивний і поширений у машинобудуванні метод обробки поверхонь заготовок багатолезовим різальним інструментом – фрезою.

На фрезерних верстатах обробляють горизонтальні, вертикальні та похилі поверхні, фасонні поверхні, пази різного профілю.

Технологічний метод формоутворення поверхонь фрезеруванням визначається головним обертальним рухом інструмента і, зазвичай, поступальним рухом подачі заготовки. Подачею може бути і обертальний рух заготовки навколо осі стола, який обертається.

До режимів різання за фрезерування відносять швидкість різання v , подачу s , глибину різання t , ширину фрезерування B .

Під час фрезерування розрізняють три розмірності подачі: 1) подача на один зуб фрези s_z , мм/зуб, – переміщення заготовки у разі повороту фрези на кут між двома сусідніми зубцями; 2) подача на один оберт фрези s_o , мм/об; подача за хвилину $s_{хв}$, мм/хв. Вони пов'язані між собою такими залежностями:

$$s_{хв} = s_o \cdot n = s_z \cdot z \cdot n$$

де n і z – відповідно частота обертання фрези і число зубців.

6.2 Типи фрез

Залежно від призначення та виду оброблюваних поверхонь розрізняють такі типи фрез: циліндричні (рис. 23, а), торцеві (рис. 23, б), ж), дискові (рис. 23, в), кінцеві (рис. 23, г), кутові (рис. 23, д), шпонкові (рис. 23, е), фасонні (рис. 23, є).

Фрези виготовляють суцільними (рис. 23, б - є) або збірними зі вставними зубцями – ножами (рис. 23, а, ж). Різальні кромки можуть бути прямі (рис. 23, д) або гвинтові (рис. 23, а). Фрези можуть мати гострозаточені (рис. 23, з) або затиловані (рис. 23, и) зубці. У фрез з гострозаточеними зубцями передня і задня поверхні зубців плоскі. Такі фрези заточують по задній поверхні. У фрез із затилованими зубцями передня поверхня зубців плоска, а задня виконана по спіралі Архімеда. В таких фрезах під час переточування по передній поверхні зберігається незмінним профіль зуба фрези.

Суцільні фрези виготовляють з інструментальних сталей. У збірних фрез зубці (ножі) виготовляють з швидкорізальних сталей або твердих сплавів і закріплюють у корпусі фрези механічно або паянням

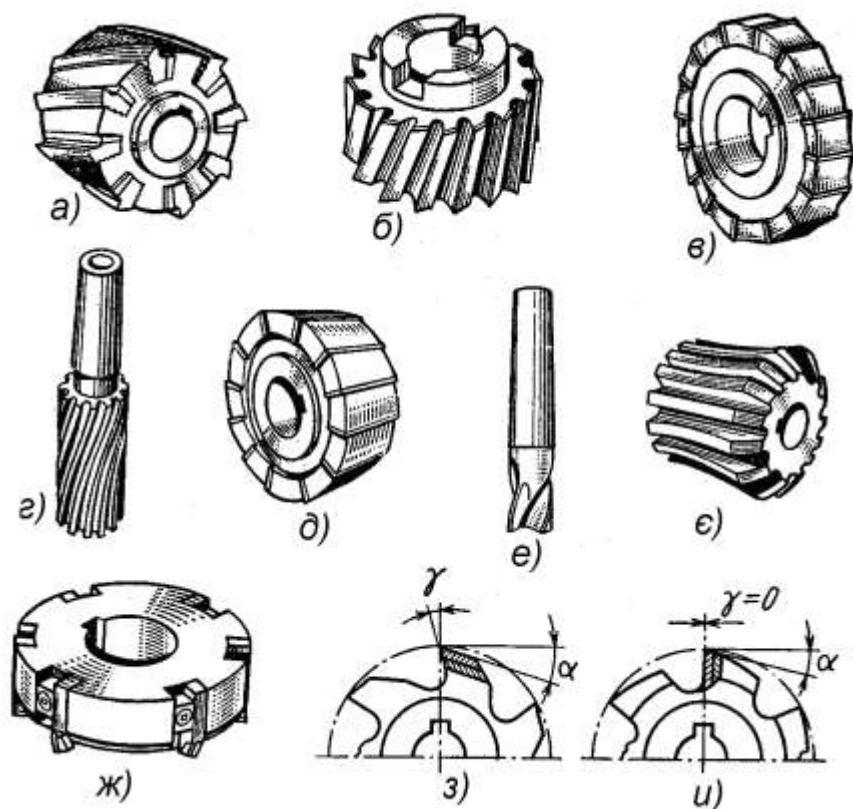


Рисунок 23 – Типи фрез

6.3 Фрезерні верстати

За поширенням у металообробці фрезерні верстати після верстатів токарної групи є найпоширенішими. До фрезерної групи належать такі типи верстатів: консольно-фрезерні вертикальні та горизонтальні, вертикальні безконсольні, фрезерні верстати безперервної дії, поздовжньо-фрезерні, копіювальні, гравірувальні та ін.

Найбільш поширеними серед названих верстатів є консольні вертикальні та горизонтальні. На рис. 24 показано горизонтально-консольний (а) та вертикально-консольний (б) фрезерні верстати. Консольними верстатами названі так тому, що їх стіл 4 розміщено на консольній балці (консолі) 7, яка може переміщатися по вертикальних напрямних станини. В станині 1 розміщена коробка швидкостей 2. Заготовка, яка встановлюється на столі 4 в лещатах або в пристрої, отримує подачу в трьох напрямках: поздовжньому (переміщення стола по напрямних полозків б), поперечному (переміщення полозків по напрямних консолях) і вертикальному (переміщення консоля по напрямних станини). Коробка подач 8 розташована всередині консоля.

Вертикально-фрезерний верстат побудований аналогічно вертикально-фрезерному, тільки вісь шпинделя у нього розташована вертикально в

шпиндельній головці, яка може повертатися навколо горизонтальної осі, що дає змогу встановлювати торцеві фрези під кутом і фрезерувати похилі площини (див. рис. 27, д).

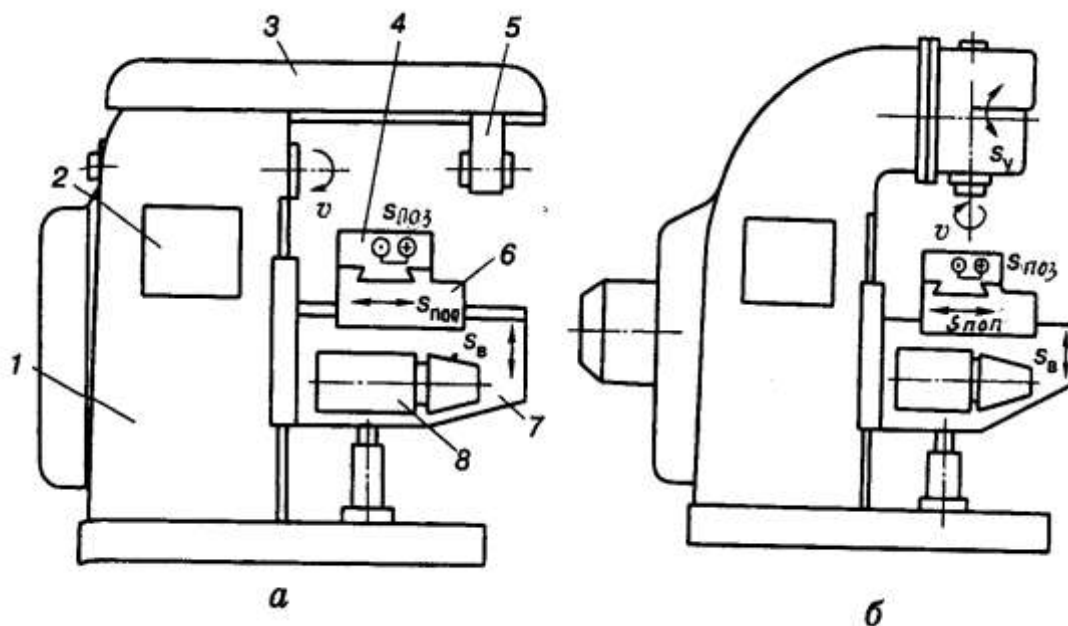


Рисунок 24 – Консольні горизонтально-фрезерний (а) і вертикально-фрезерний (б) верстати

6.4 Основні види фрезерних робіт

На рис. 25 показано схеми фрезерування поверхонь на горизонтально- і вертикально-фрезерних верстатах:

Горизонтальні поверхні фрезерують на горизонтально-фрезерних верстатах циліндричними фрезами (рис. 25, а) і на вертикально-фрезерних верстатах торцевими фрезами (рис. 25, б), що більш продуктивно внаслідок більшої кількості одночасно працюючих зубців.

Вертикальні площини фрезерують на горизонтально-фрезерних верстатах торцевими фрезами (рис. 25, в) і на вертикально-фрезерних верстатах – кінцевими фрезами (рис. 25, з).

Похилі площини фрезерують торцевими (рис. 25, д) і кінцевими фрезами на вертикально-фрезерних верстатах з поворотною фрезерною головкою і на горизонтально-фрезерних верстатах кутовими фрезами (рис. 25, е).

Комбіновані поверхні фрезерують набором фрез (рис. 25, є) на горизонтально-фрезерних верстатах.

Уступи й прямокутні пази фрезерують кінцевими (рис. 25, ж) й дисковими (рис. 25, з) фрезами на вертикально- і горизонтально-фрезерних верстатах.

Фасонні пази фрезерують фасонною дисковою фрезою (рис. 25, и), *кутові пази* – кутовою фрезою (рис. 25, і) на горизонтально-фрезерних верстатах.

Клиновий паз («ластівчин хвіст») фрезерують на вертикально-фрезерному верстаті за два проходи: прямокутний паз – кінцевою фрезою, потім скоси паза – кінцевою однокутовою фрезою (рис. 25, і).

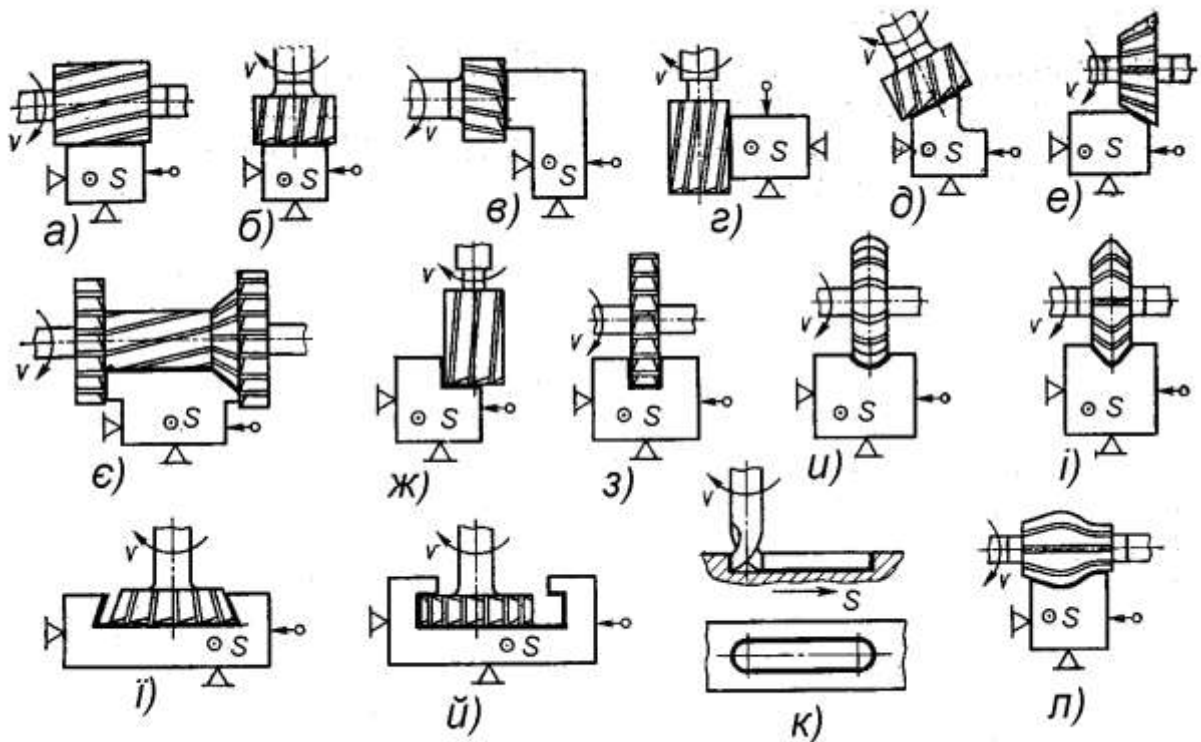


Рисунок 25 – Схеми обробки заготовок на горизонтально- і вертикально-фрезерних верстатах

T-подібні пази (рис. 25, и), які мають значне поширення в машинобудуванні як верстатні пази, наприклад, на столах свердильних, фрезерних верстатів, фрезерують зазвичай за два проходи: спочатку паз прямокутного профілю кінцевою фрезою, потім нижню частину паза T-подібною фрезою.

Шпонкові пази фрезерують шпонковими фрезами (рис. 25, к) на вертикально-фрезерних верстатах.

Фасонні поверхні фрезерують на горизонтально- або вертикально-фрезерних верстатах фасонними фрезами (рис. 25, л).

6.5 Ділильні головки

Важливим приладдям фрезерних верстатів є ділильні головки, які використовуються під час виконання багатьох фрезерних робіт, пов'язаних з періодичним поворотом заготовки на потрібний кут – нарізання зубців зубчастих коліс, розверток, фрез, а також для неперервного обертання заготовки в процесі фрезерування спіральних канавок, кулачків тощо.

Найпоширенішими серед ділильних головок є універсальні лімбові ділильні головки.

На рис. 26 показано таку головку. Вона складається з корпусу 1, поворотного барабана 2, шпинделя 4 з центром (або патроном), ділильного диска (лімба) 5. На лімбі з обох його боків є по вісім концентричних кіл з різним числом глухих отворів, розташованих по цих колах.

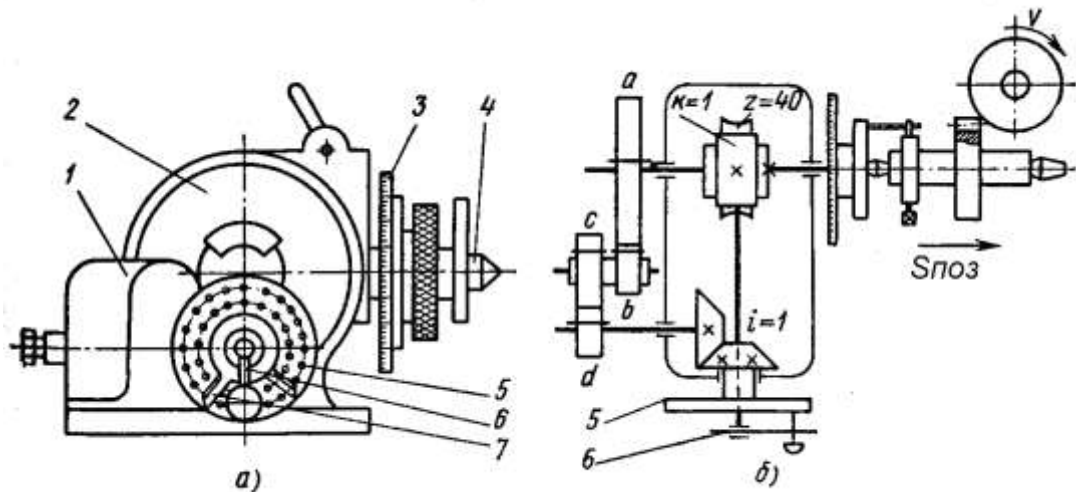


Рисунок 26 – Універсальна ділильна головка

Так, з одного боку лімба числа отворів 16, 17, 19, 21, 23, 29, 30, 31 і з другого – 33, 37, 39, 41, 43, 47, 49, 54. В корпусі на шпинделі жорстко закріплене зубчасте черв'ячне колесо (зазвичай, з числом зубців 40), яке одержує обертання від однозаходного черв'яка. Черв'як може бути введеним в зачеплення з черв'ячним колесом або виведеним з нього поворотом спеціальної рукоятки (на схемі не показана). Обертання шпинделю надають рукояткою 6. На шпинделі 4 закріплено ділильний диск 3, поділений на 360° (в деяких конструкціях головок – на 24 частини). Цей диск використовують для безпосереднього ділення заготовки на певне число. В цьому випадку черв'як виводять із зачеплення з черв'ячним колесом і шпиндель вручну повертають на потрібне число поділок по диску 3. Безпосереднє ділення заготовки не має високої точності і використовують у тих випадках, коли більш точне ділення не потрібне.

У відповідальних же випадках, коли заготовку потрібно повернути з високою точністю на певний кут, наприклад, у випадку нарізання зубчастих коліс, розверток, зенкерів тощо використовують *простий і диференціальний* методи ділення.

1. Просте ділення. За використання цього способу лімб нерухомо з'єднують з корпусом головки. Змінні зубчасті колеса гітари *a, b, c, d* (рис. 26, б) не встановлюють. Шпиндель із заготовкою повертають обертанням рукоятки 6 через включену черв'ячну передачу.

Число обертів *n* рукоятки 5, потрібне для повороту шпинделя на $1/z$ частини кола. Визначається так:

$$n = \frac{N}{z} = A + \frac{a}{b} = A + \frac{am}{bm},$$

де N – характеристика ділильної головки – число, обернене передаточному відношенню черв'ячної пари. Якщо передаточне відношення для більшості ділильних головок дорівнює $1/40$, то $N = 40$;

z – число частин, на яке потрібно поділити заготовку;

A – число цілих обертів рукоятки;

a і b – чисельник і знаменник правильного простого нескоротного дроби;

m – спільний множник для a і b , вибраний таким чином, щоб добуток mb дорівнював одному з чисел отворів, що є на лімбі 5; тоді добуток am буде дорівнювати числу кроків, на яке треба повернути рукоятку по колу, що має bm отворів.

Просте ділення застосовують тоді, коли можна на лімбі підібрати число отворів.

Приклад 1. Настроїти ділильну головку для поділу заготовки на 56 частин ($z=56$), якщо характеристика головки $N = 40$.

Число обертів рукоятки $n = \frac{N}{z} = \frac{40}{56} = \frac{5}{7} = \frac{15}{21}$. На лімбі знаходимо коло з 21 отвором, встановлюємо вістря рукоятки в перший-ліпший отвір, відраховуємо від нього 15 проміжків і для ділильного повороту заготовки на $1/56$ повертаємо рукоятку на 16-й отвір. Так робимо 56 разів. Для зручності відрахунків використовують розсувний сектор 7.

Якщо на лімбі підібрати число отворів неможливо, то застосовують диференціальний метод настройки.

2. Диференціальний метод ділення

Суть цього методу полягає в тому, що потрібний поворот заготовки здійснюється як результат двох рухів:

- обертання рукоятки відносно лімба;
- додаткового обертання самого лімба.

Отже, поворот рукоятки здійснюється відносно лімба, який обертається.

Обертання лімбу надається від шпинделя через змінні зубчасті колеса гітари a , b , c , d і конічну передачу з передаточним відношенням 1 (рис. 26, б). Лімб у цьому разі вивільняється від стопора, що з'єднує його з корпусом головки.

Під час диференціального ділення потрібно настроювати два елементи ділильної головки – рукоятку на певний поворот і гітару.

Число обертів рукоятки n , необхідне для повороту заготовки на $\frac{1}{Z}$ частини кола, визначається за такою самою формулою, що і за простого ділення:

$$n = \frac{N}{Zнаб},$$

де $Zнаб$ – наближене до потрібного числа ділень заготовки. Вибирається таким, щоб задовольняло умови простого ділення. У цьому випадку помилка в ділильному повороті шпинделя, яка дорівнює $1/Z - 1/Zнаб$, ком-

пенсується поворотом самого лімба, який і має повернутися саме на цю частину кола через гітару.

Передаточне відношення змінних коліс гітари визначається за формулою:

$$i_2 = \frac{N}{Z_{наб}(Z_{наб} - Z)}$$

Якщо $Z_{наб} < Z$, то i_2 має від'ємне значення. У цьому разі лімб має обертатися в бік, протилежний обертанню рукоятки, що досягається встановленням проміжного (паразитного) колеса між колесами a і b або c і d .

Для настроювання гітари, тобто для визначення числа зубців коліс a, b, c і d до ділільних головок зазвичай надається п'ятковий набір коліс з числами зубців від 20 до 100.

Приклад 2. Настроїти ділільну головку для фрезерування зубчастого колеса з 67 зубцями ($Z=67$). Характеристика головки $N = 40$. В цьому випадку просте ділення неможливе тому, що у формулі $n = \frac{40}{67}$ дріб нескоротний, а на лімбі немає 67 отворів. Застосовуємо диференціальний метод ділення. Вибираємо $Z_{наб} = 68$. Тоді

$$i_2 = \frac{a c}{b d} = \frac{N}{Z_{наб}(Z_{наб} - Z)} = \frac{40}{68(68 - 67)} = \frac{40}{68}$$

Цей дріб потрібно перетворити так, щоб із «п'яткового» набору можна було підібрати зубчасті колеса a, b, c і d , маючи на увазі, що в наборі є тільки по одному колесу з певним числом зубців.

$$i_2 = \frac{a c}{b d} = \frac{40}{68} = \frac{5 \cdot 8}{4 \cdot 17} = \frac{25 \cdot 40}{20 \cdot 85}$$

За підбору зубчастих коліс потрібно також враховувати умову зчеплюваності коліс в гітарі: $a + b > c$ на 10...15 зубців і $c + d > b$ на 10...15 зубців. У нашому прикладі $a = 25, b = 20, c = 40, d = 85$. $a + b >$, але всього на 5 зубців, що не задовольняє умову зчеплюваності коліс. Тому беремо $a = 75, b = 60$. Передаточне відношення від такої заміни не зміниться, а умова зчеплюваності буде виконана.

Число обертів рукоятки для здійснення ділільного повороту заготовки на $1/67$ має бути таким:

$$n = \frac{N}{Z_{наб}} = \frac{40}{68} = \frac{5}{17}$$

Тобто рукоятку потрібно повернути на 5 поділок кола, що має 17 отворів.

Налагодження ділільних головок для фрезерування спіральних канавок

В металообробці на фрезерних верстатах нерідко доводиться фрезерувати спіральні канавки (виготовлення свердел, косозубих зубчастих коліс тощо). Для цих робіт використовують універсальні горизонтально- чи вертикально-фрезерні верстати і ділільні головки. Ділільну головку встановлюють на столі верстата, а заготовку – в центрах ділільної головки і задньої бабки.

Гвинтові канавки фрезерують під час поздовжнього переміщення стола фрезерного верстата й одночасного обертання заготовки. Для цього шпindel ділильної головки з'єднують змінними зубчастими колесами a , b , c , d гітари з ходовим гвинтом поздовжньої подачі стола верстата (рис. 27).

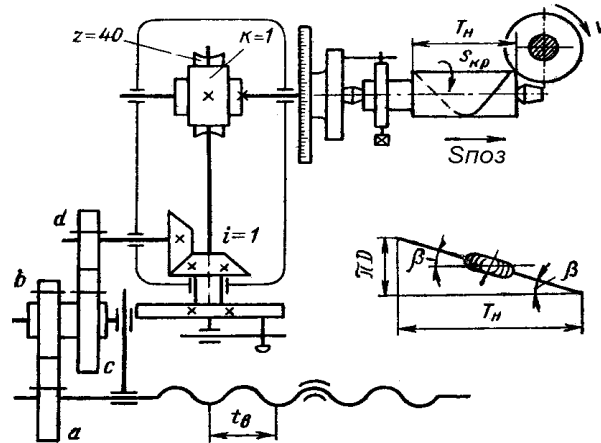


Рисунок 27 – Схема налагодження ділильної головки на фрезерування спіральних канавок

Обидва рухи – обертання заготовки і її поздовжнє переміщення – узгоджені так, що під час переміщення заготовки на крок спіральної канавки, яка нарізається, заготовка робить один повний оберт. Рівняння кінематичного балансу ланцюга має вигляд

$$T_k = 1 \text{ об.заг.} \cdot \frac{40}{1} \frac{1}{1} \frac{d}{c} \frac{b}{a} t_\theta,$$

де t_θ – крок ходового гвинта поздовжньої подачі стола;

T_k – крок гвинтової канавки.

З цього рівняння отримуємо формулу передаточного відношення гітари:

$$\frac{a}{b} \frac{c}{d} = \frac{40 t_\theta}{T_k}$$

Стіл верстата повертають на кут нахилу гвинтової канавки β для отримання гвинтової канавки потрібного профілю.

Контрольні питання

1. Які поверхні обробляють на фрезерних верстатах?
2. Основні типи фрез.
3. Типи фрезерних верстатів.
4. Методи поділу на універсальних ділильних головках.
5. Налаштування ділильної головки на фрезерування спіральних канавок.
6. Основні роботи, які виконують на фрезерних верстатах. Схеми обробки.

7 ОБРОБКА ЗАГОТОВОК НА ПРОТЯЖНИХ ВЕРСТАТАХ

7.1 Характеристика методу обробки протяганням

Протягання – високопродуктивний метод обробки внутрішніх і зовнішніх поверхонь різного профілю, який забезпечує високу точність форми і розмірів оброблюваної поверхні. Протягають багатозубим різальним інструментом – протяжкою під час його поступального руху відносно нерухомої заготовки. Це головний рух в процесі протягання. Його швидкість і є швидкістю різання v . Подача під час протягання як самостійний рух інструмента чи заготовки відсутня. За величину подачі s_z , що визначається товщиною зрізуваного шару металу окремих зубом протяжки, вибирають різницю розмірів по висоті двох сусідніх зубців протяжки; s_z є одночасно і глибиною різання. Ця величина становить 0,01...0,2 мм/зуб.

7.2 Протяжки

За характером оброблюваних поверхонь розрізняють протяжки для внутрішнього і зовнішнього протягання.

За формою розрізняють круглі, шліцові, шпонкові, багатогранні та плоскі протяжки.

За конструкцією зубці протяжки бувають з різальними кромками та скругленими, тобто працюючими за методом пластичного деформування.

На рис. 28 зображено круглу протяжку.

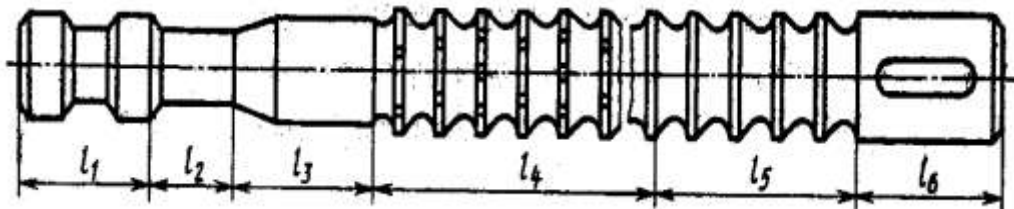


Рисунок 28 – Елементи круглої протяжки

Основні її частини: 1) *хвостовик (замкова частина) l_1* , призначений для закріплення протяжки в патроні верстата; 2) *шийка l_2* – для з'єднання хвостовика з передньою прямою частиною; 3) *передня пряма частина l_3* з прямим конусом призначена для центрування заготовки відносно протяжки в початковий момент різання; 4) *різальна частина l_4* знімає різальними зубцями, висота яких послідовно збільшується, припуск на обробку; 5) *калібрувальна частина l_5* призначена для надання обробленій поверхні остаточних розмірів, необхідної точності і шорсткості; форма і розміри зубців калібрувальної частини однакові і відповідають формі і розмірам останнього різального зубця; 6) *задня пряма частина l_6* призначена для спрямування протяжки і підтримання її від прогинання до виходу останніх калібрувальних зубців з отвору.

Різновидом протяжки є *прошивка*, яка під час обробки проштовхується крізь отвір заготовки. В прошивці відсутні хвостовик і шийка. Вона працює на стискання, а протяжка – на розтягання.

На рис. 29 показано приклади робіт, які виконують на протяжних верстатах.

Отвір під протягання (рис. 29, а) свердлять або розточують, залишаючи припуск 0,4...0,6 мм для чорнового протягання та 0,2...1,0 мм – для чистового. Довжина протягуваного отвору не має перевищувати трикратної довжини його діаметра.

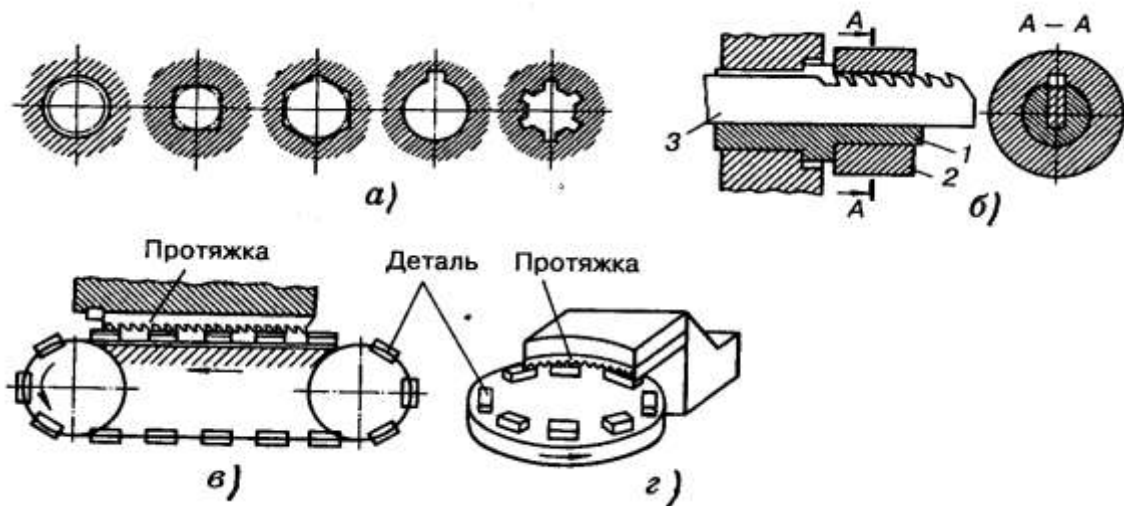


Рисунок 29 – Роботи, які виконують на протяжних верстатах

Шпонковий паз в деталі 2 (рис. 29, б) протягають плоскою шпонковою протяжкою 3 через напрямну втулку 2 з пазом для напрямлення протяжки.

У разі зовнішнього протягання (рис. 29, в), г) широко використовують верстати ланцюгового або карусельного типу.

Контрольні питання

1. Особливості обробки протяганням.
2. Конструкція круглої протяжки.
3. Схеми обробки за протягання.

8 ОБРОБКА ЗАГОТОВОК НА СТРУГАЛЬНИХ І ДОВБАЛЬНИХ ВЕРСТАТАХ

8.1 Характеристика процесу обробки струганням і довбанням

Стругальні і довбальні верстати призначені, переважно, для обробки плоских і фасонних поверхонь з прямолінійною твірною, розташованих у горизонтальних, вертикальних, похилих площинах, а також для обробки пазів, таких як, наприклад, ластівчин хвіст, верстатних Т-подібних, прямокутних тощо.

Під час *стругання* інструмент (в поперечно-стругальних верстатах) або заготовка (в поздовжньо-стругальних верстатах) здійснюють зворотно-поступальний головний рух в горизонтальній площині.

У випадку *довбання* головний рух – зворотно-поступальне переміщення інструмента – здійснюється у вертикальній площині.

Інструментом для обробки струганням чи довбанням є різці. За своєю формою стругальні різці подібні до токарних, але оскільки вони працюють у більш важких умовах (в момент врізання різця відбувається удар), державки їх роблять більш масивними. Стругальні різці, як і токарні, за розташуванням різальної кромки поділяються на праві 1 і ліві 2; за призначенням – на прохідні 1 і 2, підрізні 3, відрізні 4, фасонні 5; за характером обробки – на чорнові 1 та чистові 6 (рис. 30, а).

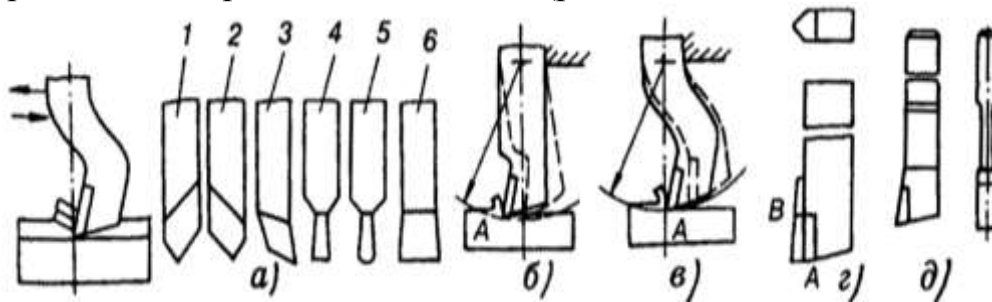


Рисунок 30 – Стругальні і довбальні різці

Під час обробки стругальний різець згинається і вершина прямого різця, описуючи дугу навколо точки А (рис. 30, б), заглиблюється в тіло заготовки, що призводить до пошкодження обробленої поверхні. Тому стругальні різці зазвичай роблять відігнутими так, щоб вісь державки різця проходила через його вершину (рис. 30, в).

Довбальні прохідний і прорізний різці показано на рис. 30, г) і д). Поверхня А цих різців є передньою, по якій сходить стружка, а поверхня Б – задньою поверхнею.

8.2 Роботи, які виконують на стругальних верстатах

Струганням отримують точність обробки 8...13 квалітетів за шорсткості поверхні $R_z = 80...20$, а за чистового стругання – $R_a = 2,5...1,5$.

На рис. 31 наведено приклади робіт, виконуваних на стругальних верстатах. Горизонтальні площини обробляють прохідними різцями (рис. 31, а), б), вертикальні площини (рис. 31, в) – прохідними або підрізними різцями, закріпленими в різцетримачі, який можна повертати на деякий кут до оброблюваної поверхні. Похилі площини обробляють прохідними або підрізними різцями (рис. 31, г), д). Пази і канавки обробляють відігнутими і прорізними різцями. Наприклад, для обробки верстатних Т-подібних пазів послідовно застосовують прорізний (рис. 31, е), правий і лівий відігнуті різці (рис. 31, є), і фасковий різець (рис. 31, ж).

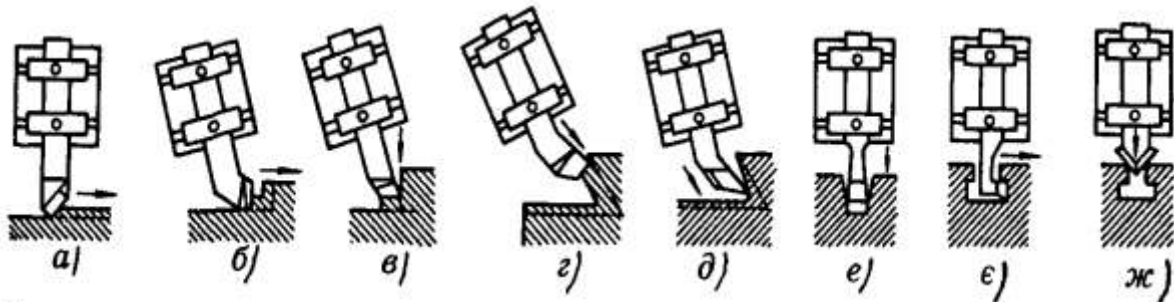


Рисунок 31 – Приклади стругальних робіт

Для чистового стругання напрямних станин, плит, столів використовують широкі різці б (див. рис. 30). Глибина різання у цьому випадку становить 0,05...0,1 мм і таке стругання може бути остаточною обробкою.

Потрібно зазначити, що всі такі поверхні можуть бути оброблені і фрезеруванням, яке є більш продуктивним процесом, але в тих випадках, коли остаточною обробкою є шабрування, наприклад за обробки напрямних станин металорізальних верстатів, перевагу потрібно надавати струганню, після якого процес шабрування здійснювати набагато легше, ніж після фрезерування.

Контрольні питання

1. Який рух є головним під час стругання та довбання?
2. Який інструмент застосовується для стругання та довбання?
3. Які роботи можна виконувати на стругальних і довбальних верстатах?

9 НАРІЗАННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС

9.1 Методи нарізання зубчастих коліс

В машинобудуванні є два основних методи нарізання зубців зубчастих коліс: *метод копіювання* і *метод обкатки (огинання)*.

Метод *копіювання* полягає в тому, що профілювання зубців зубчастого колеса здійснюється фасонним інструментом, профіль різальної частини якого відповідає профілю впадини зубчастого колеса. Інструментом може бути модульна дискова фреза 1 (рис. 32, а) або модульна кінцева фреза (рис. 32, б). В першому випадку процес нарізання зубчастих коліс здійснюється на горизонтально- або універсально-фрезерних верстатах, у другому – на вертикально-фрезерних послідовно по одній впадині з застосуванням ділильної головки.

Теоретично для кожного числа зубців зубчастого колеса певного модуля потрібна окрема дискова чи кінцева модульна фреза. Практично ж користуються наборами з восьми, п'ятнадцяти чи двадцяти шести модульних фрез, кожна з яких призначена для нарізання кількох зубчастих коліс з різним числом зубців. Тому профілі зубців таких коліс будуть дещо відрізнятися від теоретичних і, таким чином, метод копіювання не забезпечує високої точності, має порівняно низьку продуктивність і застосовується переважно в ремонтному виробництві.

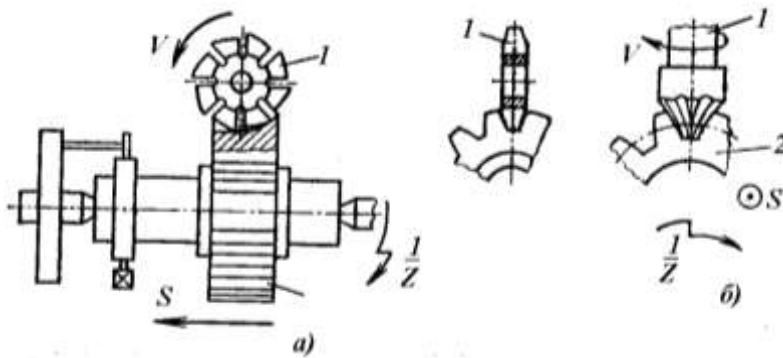


Рисунок 32 – Схеми фрезерування зубців за методом копіювання
1 – фреза; 2 – оброблюване колесо

Метод *обкатки* ґрунтується на відтворенні зачеплення зубчастої, черв'ячної або рейкової передачі, одним з елементів якої є різальний інструмент, виконаний у вигляді відповідно зубчастого колеса (*довб'яка*), черв'яка (*черв'ячної фрези*), рейки (*інструментальної рейки*).

Другим елементом такої передачі є заготовка. Різальні кромки інструмента в процесі взаємного обкатування з заготовкою займають у просторі ряд послідовних положень, вирізаючи метал у тих місцях, де мають бути впадини на заготовці.

Різні положення різальних кромки інструмента відносно формованого профілю зубців на заготовці отримують внаслідок кінематично узгоджених обертальних рухів інструмента і заготовки на зуборізному верстаті.

Метод обкатки забезпечує безперервне формоутворення зубців колеса. Нарізання зубчастих коліс цим методом знайшло переважне поширення завдяки високій продуктивності та значній точності обробки.

Найпоширенішими способами в машинобудуванні є зубофрезерування на зубофрезерних верстатах, зубодовбання на зубодовбальних верстатах та зубостругання на зубостругальних верстатах під час обробки конічних коліс.

9.2 Нарізання зубчастих коліс на зубофрезерних верстатах

На зубофрезерних верстатах нарізають зубчасті колеса зовнішнього зачеплення з прямими та гвинтовими зубцями, а також черв'ячні колеса черв'ячними модульними фрезами методом обкатки.

В основі методу лежить принцип відтворення зачеплення черв'ячної передачі, в якій роль черв'яка виконує черв'ячна фреза, а роль черв'ячного колеса – заготовка.

На рис. 33, а) наведено схему формоутворення зубців циліндричного колеса черв'ячною фрезою, а на рис. 33, б) показано, що бічна поверхня зубця на заготовці утворюється як крива огинання послідовних положень різальних кромки зубців черв'ячної фрези в їх відносному узгодженому русі.

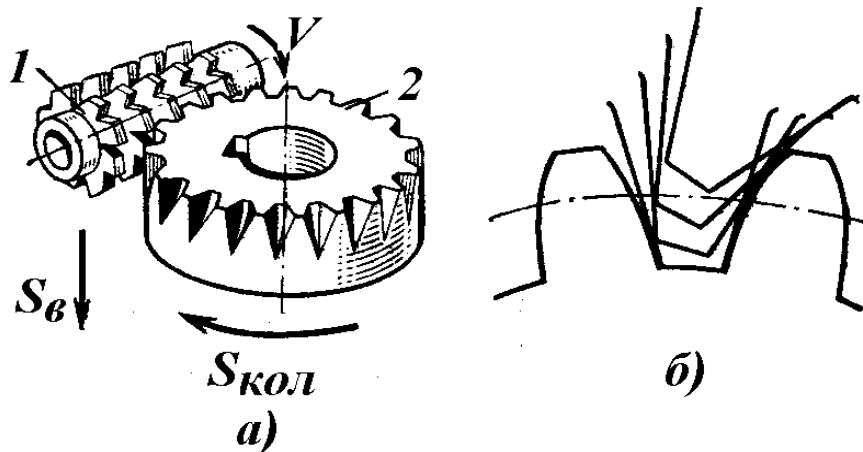


Рисунок 33 - Схема формоутворення зубців циліндричного колеса черв'ячною фрезою:

1 – черв'ячна фреза; 2 – заготовка

Узгодження рухів черв'ячної фрези і заготовки здійснюється за допомогою гідари обкатки зубофрезерного верстата, яка настроюється так, щоб за один оберт фрези заготовка повернулась на стільки зубців, скільки заходів має черв'ячна фреза, тобто зробила $\frac{k}{z}$ обертів, де k – число заходів фрези, а z – число зубців на колесі, що нарізається.

Головним рухом процесу зубофрезерування є обертання фрези.
Швидкість різання, м/хв,

$$v = \pi D_{\phi} n_{\phi} / 1000,$$

де D_{ϕ} – діаметр фрези, мм;

n_{ϕ} – частота обертання фрези, об/хв.

Рухом подачі є вертикальне переміщення фрези. Подачу S_v вимірюють в мм за один оберт заготовки.

9.3 Нарізання зубчастих коліс на зубодовбальних верстатах

На зубодовбальних верстатах нарізають циліндричні зубчасті колеса зовнішнього та внутрішнього зачеплення з прямими та гвинтовими зубцями. На цих самих верстатах можна нарізати блоки зубчастих коліс з невеликими відстанями між вінцями коліс, а також шевронні колеса. Інструментом є довб'як – загартоване і шліфоване зубчасте колесо, кожен зуб якого має різальні кромки.

Зубчасті колеса на зубодовбальних верстатах нарізають за методом обкатки, в основі якого лежить відтворення зачеплення двох циліндричних зубчастих коліс (рис. 34). Бічна поверхня зубця на заготовці утворюється як крива огинання послідовних положень різальних кромки інструмента під час відносних рухів заготовки та інструмента (рис. 34, б). Ці рухи узгоджені так, щоб у разі повороту довб'яка на один зуб заготовка також повернулася на один зуб, тобто, довб'як і заготовка, перебуваючи у зачепленні, обертаються зі швидкістю, обернено пропорційною числу їх зубців:

$$n_{заг} / n_{дов} = z_{дов} / z_{заг},$$

де $n_{заг}$ – частота обертання заготовки, об/хв;

$n_{дов}$ – частота обертання довб'яка, об/хв;

$z_{дов}$ – число зубців довб'яка;

$z_{заг}$ – число зубців заготовки.

Це досягається налагодженням гітари обкатки зубодовбального верстата. Головним рухом під час зубодовбання є зворотно-поступальний рух довб'яка, який складається з його робочого руху донизу і холостого ходу доверху. Обидва ці рухи становлять один подвійний хід довб'яка.

Швидкість різання під час зубодовбання, м/хв,

$$v = 2Ln / 1000,$$

де L – довжина ходу довб'яка, мм;

n – число подвійних ходів довб'яка за хвилину.

Рухами подачі є обертання довб'яка (колова подача, яка вимірюється довжиною дуги ділильного кола довб'яка, на яку він повертається за один подвійний хід, мм/подв. хід) і радіальна подача – врізання довб'яка в заготовку (s_p , мм/об.заг). Радіальна подача надається довб'яку до досягнення повної глибини впадини між зубцями. В подальшому процес нарізання відбувається за постійної міжцентрової відстані протягом одного повного оберту заготовки.

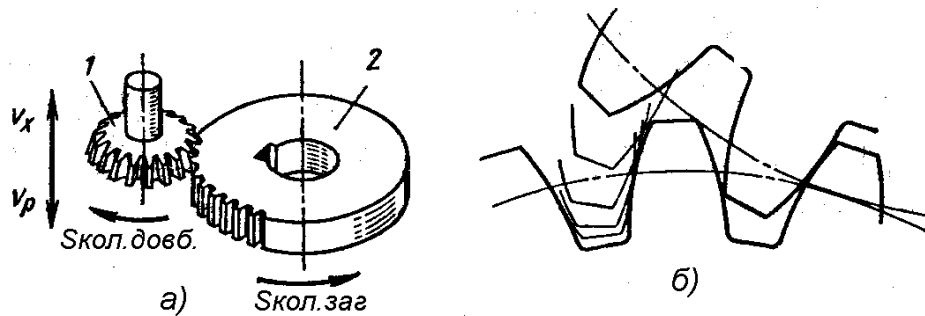


Рисунок 34 – Схема формоутворення зубців циліндричного колеса
 1 – довб'як; 2 – заготовка

9.4 Нарізання конічних зубчастих коліс

Конічні зубчасті колеса нарізають методом обкатки на зубостругальних верстатах. Цей метод ґрунтується на відтворенні зачеплення двох конічних коліс, одним з яких є заготовка, а другим – конічне плоске колесо, в якого половина кута при вершині початкового конуса дорівнює 90° , а профіль зуба прямолінійний, тобто плоске конічне колесо являє собою кільцеву рейку (рис. 35, а).

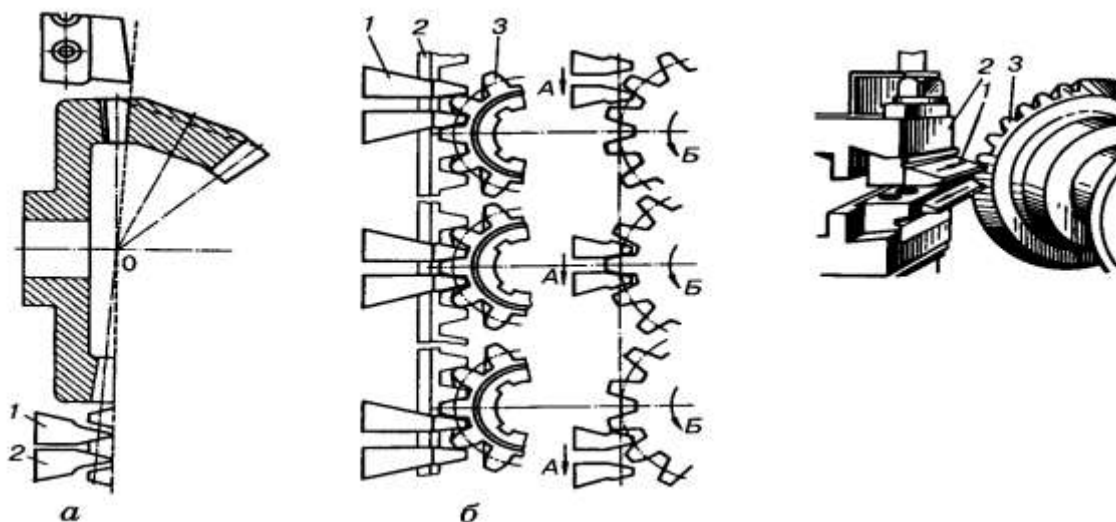


Рисунок 35 – Схема нарізання зубців конічних коліс

Реального плоского колеса не існує, воно відтворюється на верстаті під час обертання планшайби, на торці якої змонтовано два різцевих супорта з різцями 1 і 2. Бічні поверхні цих різців, обернені одна до одної, виконують роль впадини зубця плоского колеса 2 (рис. 35, б), яке прийнято називати виробним колесом. Зубець нарізуваного колеса 3 обробляється з обох боків двома різцями 1, які здійснюють рух різання – зворотно-

поступальний рух в протилежних напрямках. Узгоджене обертання планшайби з різцями (рух за стрілкою А) і заготовки (за стрілкою Б) є рухом обкатки та забезпечує формування потрібного профілю зубця на заготовці. Нарізання зубців відбувається послідовно, кожен наступний зубець обробляється після повної обробки попереднього.

Під час нарізання конічних зубчастих коліс з круговими зубцями роль зубця плоского колеса виконує різцева головка, що обертається на торці планшайби верстата і послідовно прорізує впадину за впадиною на заготовці.

Контрольні питання

1. Методи нарізання зубчастих коліс.
2. Суть і схеми нарізання коліс методом копіювання.
3. Суть методу обкатки нарізання зубчастих коліс.
4. Способи нарізання коліс методом обкатки.

10 ОБРОБКА ЗАГОТОВОК НА ШЛІФУВАЛЬНИХ ВЕРСТАТАХ

10.1 Загальні відомості

Шліфуванням називається процес обробки поверхонь деталей машин абразивним (шліфувальним) інструментом – головним чином шліфувальними кругами. Для шліфування використовуються також бруски, шкурки, пасти.

Під час обертання шліфувального круга в зоні його контакту з заготовкою абразивні зерна зрізують матеріал у вигляді величезної кількості тонких стружок (до 10^8 за хвилину). Процес різання здійснюється на дуже великих швидкостях – більше ніж 30 м/с. Оброблена поверхня являє собою сукупність мікрослідів абразивних зерен і має низьку шорсткість. Частина абразивних зерен гострих кромek, здатних різати, не має, тому такі зерна виконують роботу тертя по поверхні різання, внаслідок чого оброблювана поверхня заготовки сильно нагрівається з утворенням дефектного поверхневого шару деталі. Для зменшення теплової дії процес шліфування виконують зі значною подачею в зону різання змащувально-охолодних рідин.

Застосовується шліфування переважно для остаточної чистової обробки і є основним методом одержання високої точності (5...6 квалітетів) і незначної шорсткості оброблюваних поверхонь ($R_z = 0,63...0,16$). Шліфуванням можна обробляти різні, як дуже м'які, так і найбільш тверді матеріали, включно загартовані сталі і тверді сплави, для яких шліфування є переважним методом обробки. Шліфувати можна поверхні різної форми: плоскі, циліндричні, конічні, фасонні. Згідно з цим застосовують різні способи шліфування, найбільш поширеними з яких є кругле і плоске шліфування.

10.2 Абразивний інструмент

Абразивним називається інструмент, що складається із зерен абразивного (шліфувального) матеріалу, скріпленого між собою спеціальною зв'язкою.

Найчастіше використовуються для шліфування шліфувальні круги.

За формою шліфувальні круги бувають плоскі прямі (для круглого зовнішнього, внутрішнього та плоского шліфування), чашкові циліндричні та конічні (для плоского шліфування).

Для виготовлення шліфувальних кругів переважно застосовують електрокорунд (кристалічний оксид алюмінію Al_2O_3), карбід кремнію SiC (карборунд) та кубічний нітрид бору (ельбор).

Зерна абразивних матеріалів з'єднують в одне ціле за допомогою різних неорганічних та органічних зв'язок. У практиці широко використовують з неорганічних – керамічну (К), а з органічних – бакелітову (Б) та вулканітову (В) зв'язки.

Керамічна складається з вогнетривкої глини, польового шпату, тальку, крейди, кварцу і рідкого скла. Завдяки значній міцності, водостійкості,

що дозволяє працювати з застосуванням охолодної рідини, і жаростійкості абразивний інструмент на керамічній зв'язці набув переважного поширення. На цій зв'язці виготовляють до 90% шліфувальних кругів.

Абразивний інструмент на бакелітовій зв'язці, що являє собою синтетичну смолу, має велику міцність і пружність, але порівняно низьку теплостійкість (до 180 °С). Шліфувальні круги на цій зв'язці використовують для чистових обробних робіт.

Абразивний інструмент на вулканітовій зв'язці, яка складається з каучуку, сірки та інших речовин, має велику міцність і пружність, але низьку теплостійкість. Круги на цій зв'язці можуть бути дуже тонкими і використовуватись переважно для відрізних робіт.

Міцність зв'язки визначає гранично допустиму швидкість різання (до 50 м/с), а також іншу характеристику шліфувального круга – твердість. Під твердістю абразивного інструменту розуміють опір зв'язки вириванню абразивних зерен зовнішньою силою. За встановленою шкалою є 7 класів твердості: м'який – М, середньом'який – СМ, середній – С, середньотвердий – СТ, твердий – Т, дуже твердий ДТ, надзвичайно твердий – НТ.

Твердість круга вибирають за правилом: чим твердіший оброблюваний матеріал, тим м'якшим має бути круг, і навпаки.

10.3 Схеми круглого і плоского шліфування

Кругле зовнішнє шліфування може здійснюватись з поздовжньою подачею (рис. 36, а) або тільки з поперечною (врізне шліфування, рис. 36, б). В першому випадку поперечна подача S_{non} на глибину різання t здійснюється шліфувальним кругом в кінці поздовжнього ходу заготовки в напрямі, перпендикулярному до її осі. За другою схемою шліфують циліндричні, конічні, фасонні поверхні, довжина яких менше ширини шліфувального круга. В обох випадках, як і за інших видів шліфування, головний рух зі швидкістю $V = 20...40$ м/с здійснює шліфувальний круг. Обертання заготовки називається коловою подачею.

Схему зовнішнього безцентрового шліфування з поздовжньою подачею заготовки показано на рис. 36, в. Принцип цього способу шліфування полягає в тому, що заготовку 2 не закріплюють у затискному пристрої верстата, а кладуть на упор (ніж) 1 і пропускають між двома встановленими на певній відстані один від одного шліфувальними кругами. Один з них – круг 3 – є шліфувальним. Він обертається з великою швидкістю ($V = 30...60$ м/с). Другий круг 4, що називається ведучим, обертається з набагато меншою швидкістю ($V_{в.кр.} = 0,2...1,0$ м/с). Завдяки зрізу ножа 1 заготовка притискається до ведучого круга і внаслідок більшого коефіцієнта тертя між цим кругом і заготовкою вона обертається зі швидкістю, близькою до швидкості ведучого круга.

Оскільки ведучий круг повернутий відносно шліфувального круга на кут α ($1,5...6^\circ$ за чорнового і $0,5...1,5^\circ$ за чистового шліфування), швид-

кість його обертання $V_{в.кр.}$ розкладається на дві складові – V_z і V_s . Складова V_z забезпечує поздовжню подачу заготовки зі швидкістю $V_z = V_{в.кр.} \sin \alpha$.

Друга складова $V_s = V_{в.кр.} \cos \alpha$ є швидкістю обертання заготовки (колова подача). На рис. 36, з), д) показано схеми внутрішнього шліфування. В першому випадку колову подачу отримує заготовка, в другому – шліфувальний круг.

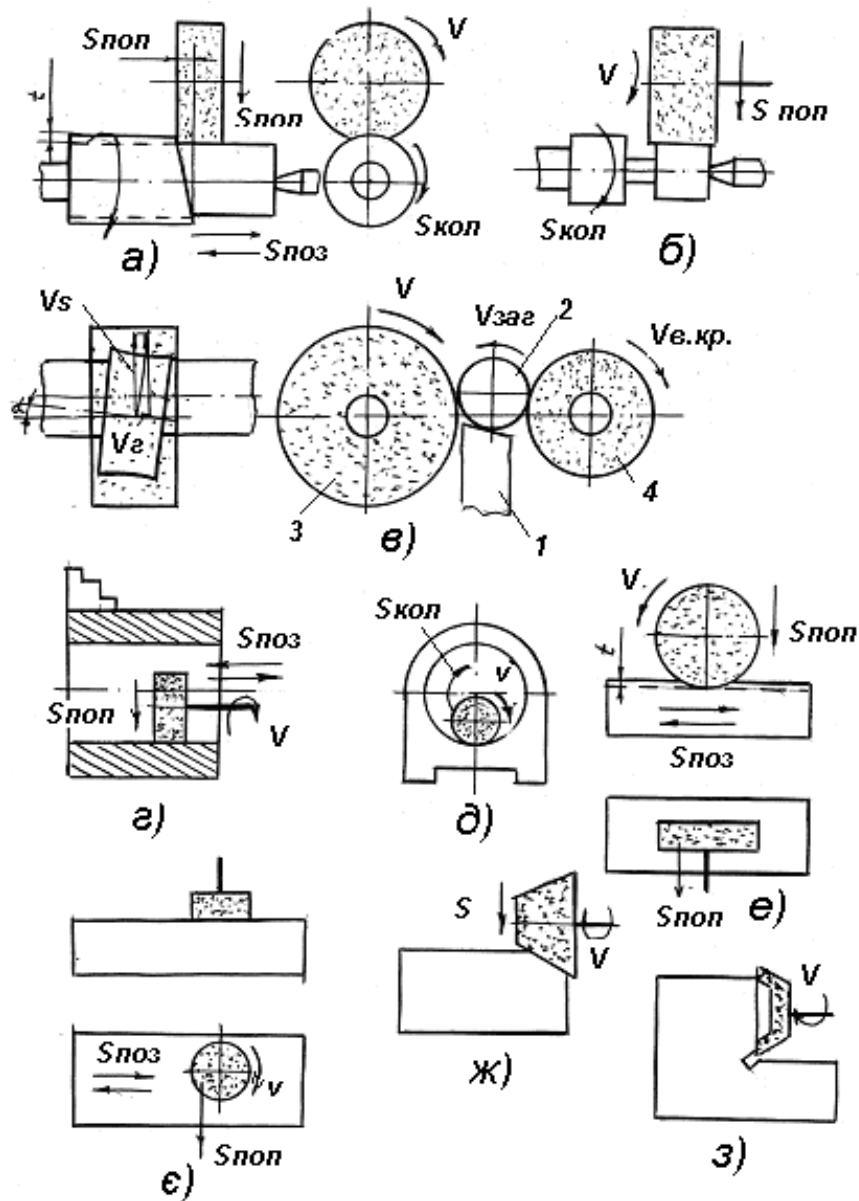


Рисунок 36 – Схеми круглого і плоского шліфування

Внутрішнє шліфування за схемою рис. 36, д) застосовують у тих випадках, коли заготовці неможливо (або технічно надто складно) надавати обертового руху.

Плоске шліфування залежно від методу роботи розрізняють периферією плоского (рис. 36, е) або торцем чашкового круга (рис. 36, є). Закріп-

лена на столі верстата деталь виконує зворотно-поступальний рух (поздовжня подача S_{noz}), шліфувальний круг крім головного руху зі швидкістю V здійснює в кінці поздовжнього ходу поперечну подачу S_{nop} , а після шліфування всієї площі – вертикальне переміщення на глибину різання t .

Під час обробки плоских похилих і вертикальних поверхонь використовують конічні чашкові круги (рис. 3б, ж), з).

10.4 Режими різання процесу шліфування

Основними елементами режиму різання під час шліфування є швидкість різання, подача і глибина різання. Швидкістю різання за всіх видів шліфування є колова швидкість шліфувального круга. За круглого шліфування елементами режиму різання є також колова швидкість заготовки, поздовжня і поперечна подачі (див. рис. 3б, а), в). Колова швидкість заготовки – це колова подача $S_{кол}$, м/хв. Поздовжня подача S_{noz} – величина переміщення заготовки відносно шліфувального круга за один її оберт (мм/об.заг). Поперечна подача S_{nop} (мм/подв. хід або мм/хід) – величина переміщення шліфувального круга в напрямі, перпендикулярному до осі заготовки, що здійснюється в крайніх її положеннях. Вона чисельно дорівнює глибині різання t .

Контрольні питання

1. Особливості обробки деталей шліфуванням.
2. Інструмент для шліфування.
3. Схеми круглого зовнішнього шліфування.
4. Схеми внутрішнього шліфування.
5. Схеми плоского шліфування.
6. Режими різання під час шліфування.

11 МЕТОДИ ЧИСТОВОЇ ОБРОБКИ ПОВЕРХОНЬ

11.1 Загальні відомості

Розвиток сучасного машинобудування, пов'язаний з підвищенням навантажень на деталі машин, збільшенням швидкостей руху, зниженням маси конструкцій, висуває особливо високі вимоги щодо якості обробки поверхневих шарів деталей. Ці вимоги часто не можуть бути виконані описаними методами обробки. Тому потрібна додаткова обробка, яка забезпечувала б більш високу точність і меншу шорсткість поверхонь.

Чистові методи обробки відзначаються малими силами різання, невеликими глибинами різання, незначним тепловиділенням. Тому заготовки деформуються дуже мало.

Найпоширенішими методами чистової обробки поверхонь деталей машин є хонінгування, суперфініш, притирання і полірування. Усі ці методи супроводжуються зніманням стружки з оброблюваної поверхні.

11.2 Хонінгування

Хонінгування застосовують для отримання поверхонь високої точності і малої шорсткості, а також для створення специфічного мікропрофіля обробленої поверхні. Такий профіль потрібен для утримання мастила під час роботи пари тертя, наприклад, циліндр – поршень в двигуні внутрішнього згорання.

Внутрішня поверхня нерухокої заготовки оброблюється дрібнозернистими абразивними брусками, закріпленими в хонінгувальній головці (*хоні*). Хон обертається (головний рух) і одночасно здійснює зворотно-поступальний рух подачі вздовж осі оброблюваного отвору (рис. 37, а).

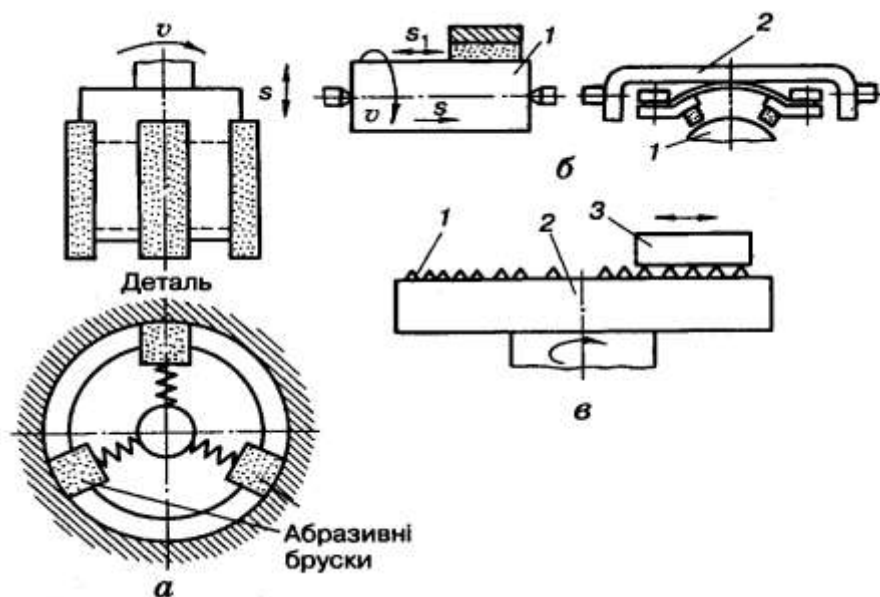


Рисунок 37 – Схеми чистової обробки поверхонь деталей машин

Хонінгувальна головка розсувна. В її конструкції передбачено механізм радіального переміщення державок з брусками. Під дією пружин бруски в процесі роботи притискаються до оброблюваної поверхні.

Хонінгуванням виправляють похибки форми від попередньої обробки у вигляді відхилень від круглості, циліндричності тощо. Точність хонінгованих отворів досягає IT7...IT6, а шорсткість – до $R_a = 0,04$.

Хонінгування здійснюють з активним охолодженням зони різання мастильно-охолодними рідинами – гасом, сумішшю гасу з веретенним мастилом, водно-мільними емульсіями.

Вібраційне хонінгування, яке застосовується останнім часом і полягає в тому, що хон під час свого зворотно-поступального руху здійснює ще й коливальний рух (осциляцію) з частотою 300...400 коливань за хвилину та амплітудою 2...6 мм чим забезпечує ще більшу точність обробки і меншу шорсткість.

11.3 Суперфініш

Суперфінішем зменшують шорсткість поверхні, що залишилась від попередньої обробки. Деталь 1 (рис. 37, б) обробляють абразивними брусками, встановленими в спеціальній головці 2. Внаслідок поєднання трьох рухів: обертального і поздовжнього заготовки (відповідно v і s) і коливального (осцилювального) головки з брусками (s_1) поверхня стає надзвичайно гладенькою ($R_a = 0,02$), на ній утворюється щільна сітка мікронерівностей, що забезпечує більш сприятливі умови взаємодії поверхонь тертя.

Процес суперфінішування супроводжується інтенсивним застосуванням мастильно-охолодної рідини і ведеться до тих пір, поки мастило на оброблюваній поверхні не утворить суцільну плівку, яку не можуть прорвати абразивні зерна брусків.

Зазвичай суперфінішування не усуває похибок форми, отриманих від попередньої обробки (хвилястість, конусність, овальність тощо), але удосконалення цього процесу дозволяє знімати більш значні шари металу і зменшувати похибки попередніх робіт.

11.4 Притирання

Поверхні деталей машин, оброблених на металорізальних верстатах, завжди мають відхилення від правильних геометричних форм і заданих розмірів. Ці відхилення можуть бути усунені притиранням (доведенням).

Процес здійснюється за допомогою притирів відповідної геометричної форми. На притир 2 (рис. 37, в) наносять абразивну пасту 1 або дрібний абразивний порошок, змішаний з мастилом. Матеріал притирів має бути м'якшим за оброблюваний матеріал (чавун, мідь, тверді породи дерева). Паста чи порошок вкорінюються в поверхню притиру і утримуються нею так, щоб під час відносного руху кожне абразивне зерно могло знімати дуже малу стружку.

Притир 2 із заготовкою 3 мають здійснювати різнонаправлені рухи, з тим, щоб траєкторії руху кожного зерна не повторювались. Мікронерівності зглажуються за рахунок хіміко-механічної дії на поверхню заготовки.

11.5 Чистова обробка зубців зубчастих коліс

В процесі нарізання зубчастих коліс на поверхнях зубців виникають похибки профілю, кроку зубців тощо. Для зменшення або усунення похибок зубці додатково обробляють. Чистову обробку зубців незагартованих коліс здійснюють *шевінгуванням*. Інструментом для цього є *шевер* – косо-зубе колесо, на бічних поверхнях якого нанесено вузькі канавки, що утворюють різальні кромки (рис. 38, а, б). Колесо 2 і шевер 1 зачіплюються між собою так, щоб їх осі перехрещувались під кутом $10...15^\circ$ (рис. 38, а). Під час взаємного обкочування такої зубчастої пари бічні поверхні зубців проковзують і різальні кромки канавок шевера зрізають (зішкрібають) з поверхні зубців дуже тонкі волосовидні стружки, завдяки чому похибки виправляються, зубчасті колеса стають більш точними, значно зменшується шум під час їх роботи.

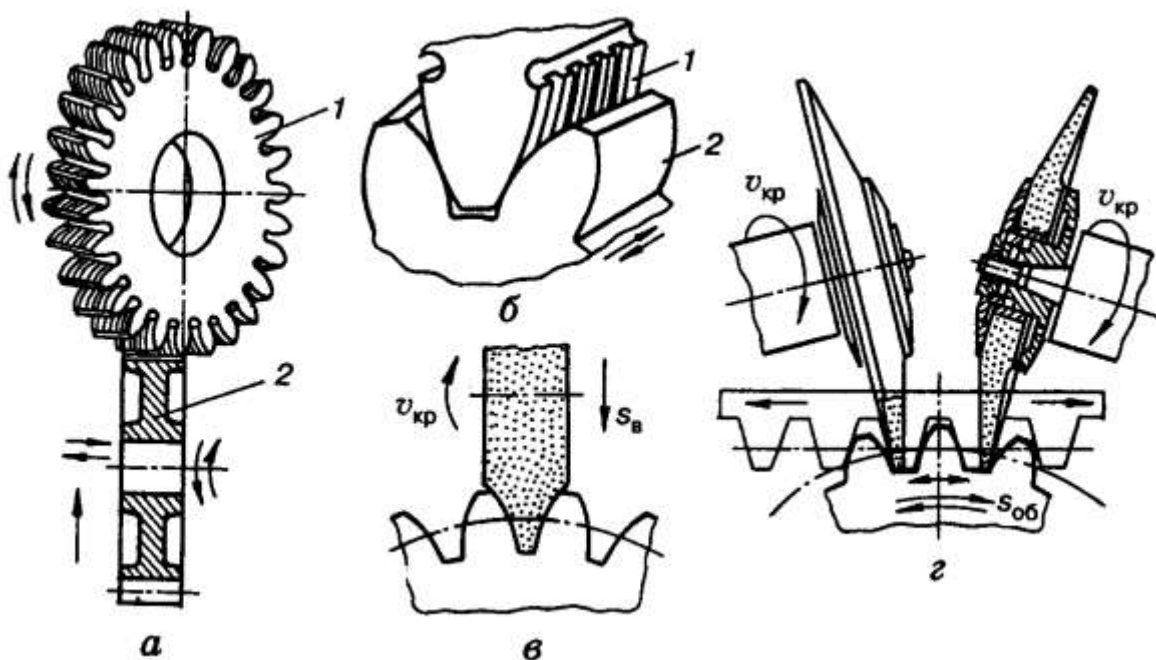


Рисунок 38 – Схеми чистової обробки зубців зубчастих коліс

Під час шевінгування обертальний рух надається шеверу. Заготовка крім обертання здійснює зворотно-поступальний рух вздовж осі для зняття стружки з усієї довжини зубця, а після кожного подвійного ходу подається в радіальному напрямі. Для рівномірної обробки обох боків зубців напрям обертання шевера, а, отже, і заготовки періодично змінюється.

На загартованих зубчастих колесах значні похибки бічних поверхонь зубців, які виникли після термічної обробки усуваються *зубошліфуванням*. Цей метод забезпечує високу точність і низьку шорсткість поверхонь зубців і може бути використаним під час обробки як циліндричних, так і конічних зубчастих коліс.

Шліфування зубців циліндричних коліс здійснюють методом копіювання і обкатки. Метод копіювання за своєю суттю аналогічний зубонарізанню дисковою модульною фрезою. Евольвентний профіль зубця відтворюється абразивними кругами, що мають профіль впадин оброблюваного колеса (рис. 38, в). Шліфувальний круг здійснює головний рух $v_{кр}$, зворотно-поступальний рух вздовж зубця і періодичну вертикальну подачу s_g . Шліфування кожного зубця здійснюється за кілька проходів, після чого заготовка повертається на один зубець і процес повторюється.

Шліфування зубців методом обкатки ґрунтується на принципі зачеплення оброблюваного колеса з зубчастою рейкою. У цьому випадку елементи уявної рейки утворені абразивними інструментами. Так, рейкою можуть слугувати два абразивні тарілчасті круги (рис. 38, г), шліфувальні торці яких розташовані вздовж сторін зубців рейки. Шліфувальні круги обертаються і рухаються зворотно-поступально вздовж осі колеса. Колесо, яке шліфується, робить обертальний рух обкатки і прямолінійне переміщення в поперечному напрямі, що відповідає перекочуванню колеса по нерухомій рейці. Після шліфування одного зубця заготовка робить ділильний поворот, шліфується другий зубець і т. д.

Контрольні питання

1. Які методи чистової обробки ви знаєте?
2. Дайте характеристику хонінгування.
3. В чому полягає притирання?
4. Які методи чистової обробки зубчастих коліс ви знаєте?
5. Що таке шевінгування?
6. Які методи зубошліфування ви знаєте?

12 ОБРОБКА ЗАГОТОВОК ПОВЕРХНЕВИМ ПЛАСТИЧНИМ ДЕФОРМУВАННЯМ

12.1 Загальні відомості

Методи обробки без зняття стружки застосовують під час виготовлення деталей машин з огляду на їхню високу продуктивність, здатність створювати поверхні з малою шорсткістю та необхідними фізико-механічними властивостями поверхневого шару. Методами обробки без зняття стружки отримують тільки ті поверхні, які будуть працювати в спряженні з поверхнями інших деталей.

Методи обробки ґрунтуються на використанні пластичних властивостей металів, тобто властивості металевих заготовок приймати залишкови деформації без порушення суцільності металу. Обробка методами пластичного деформування супроводжується зміцненням поверхневого шару, що є дуже важливим для підвищення надійності роботи деталей. Деталі стають менш чутливими до втомлювального руйнування, підвищується їх корозійна стійкість і зносостійкість спряжень, видаляються ризики та мікро тріщини, що залишилися від попередньої обробки.

Методи обробки поверхневим пластичним деформуванням поділяють на дві групи: формоутворювальні (накатування різьб, шліцьових валів, зубчастих коліс) і зміцнювально-калібрувальні (обкатування і розкачування поверхонь, калібрування, ультразвукове деформаційне зміцнення, дробострумінне зміцнення тощо).

12.2 Формоутворювальні методи

Формоутворення фасонних поверхонь у холодному стані методом накатування має низку суттєвих переваг.

Головні з них – висока продуктивність, невелика вартість обробки, висока якість оброблених деталей. Профіль накатуваних деталей утворюється не вирізуванням, а вдавлюванням інструмента в матеріал заготовки і видавлюванням частини його у впадини інструмента.

Такі методи використовують для утворення різьб, валів з дрібними шліцами, зубчастих дрібномодульних коліс (рис. 39).

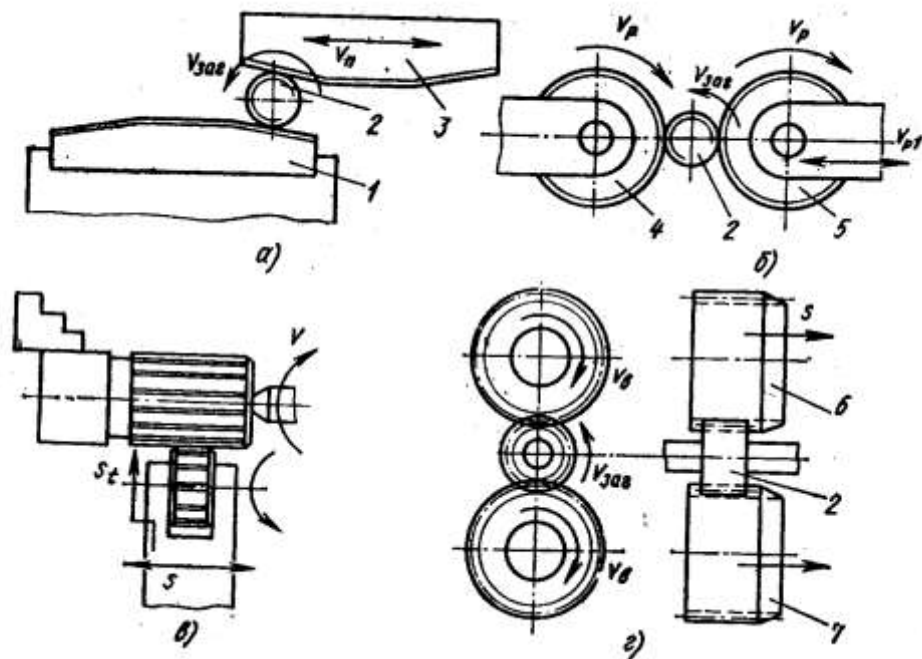


Рисунок 39 – Схеми формуювальних методів обробки пластичним деформуванням

У випадку формування різьби плашками (рис. 39, а) заготовка 2 встановлюється між нерухомою 1 і рухомою 3 плашками, що мають на робочих поверхнях рифлення, профіль і розташування яких відповідає профілю та кроку накатуваної різьби. Під час переміщення рухомої плашки заготовка котиться між інструментами, а на її поверхні утворюється різьба.

Під час формування різьби роликками (рис. 39, б) ролики 4 і 5 отримують примусове обертання, заготовка 2 вільно обертається між ними. Ролику 5 надається радіальний рух для вдавлення в метал заготовки на необхідну глибину. Накаткування роликками застосовують для отримання різьб з більшими кроками.

В процесі накатування дрібних шліців на валах (рис. 39, в) накатний ролик має профіль шліців. Він заглиблюється в заготовку під час обертання і переміщення вздовж вала.

Накатування циліндричних (рис. 39, г) і конічних дрібномодульних коліс в 15...20 разів більш продуктивне, ніж зубонарізання. Процес здійснюється накатниками 6 і 7, які мають конічну передню частину для поступового утворення зубців на заготовці 2.

Після гарячого накатування точність зубців можна підвищити наступним холодним калібруванням, що дає можливість замінити чистове зубофрезерування і навіть шевінгування.

12.3 Зміцнювально-калібрувальні методи

Зміцнювально-калібрувальні методи обробки деталей здійснюють для підвищення точності поверхонь і збільшення опору втомлюваності деталей. До таких методів обробки відносяться обкатування і розкатування циліндричних, конічних, плоских і фасонних зовнішніх та внутрішніх поверхонь, а також калібрування отворів.

Обкатування зовнішніх і внутрішніх поверхонь роликми. Процес обробки полягає в тому, що поверхню деталі, яка обертається, обкатують притиснутими до неї одним, двома або трьома гладенькими роликми, виготовленими з загартованої сталі. В процесі обробки мікронерівності обробленої поверхні згладжуються, а поверхня наклепується, внаслідок чого твердість поверхневого шару збільшується на 40...50%.

На рис. 40 показано поширені методи обкатування (рис. 40, а), б) і розкатування (рис. 40, в), г) поверхонь.

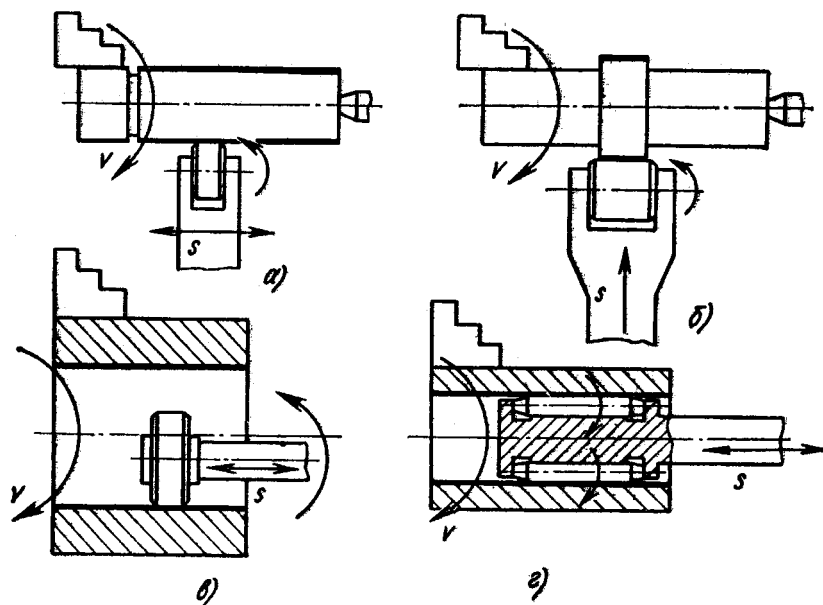


Рисунок 40 – Схеми накатування і розкатування поверхонь

Ці операції можна виконувати на токарних, револьверних, карусельних верстатах, використовуючи замість різального інструмента обкатки і розкатки. Супорти верстатів забезпечують необхідну подачу.

Калібрування отворів підвищують точність отворів і отримують поверхні високої якості. Суть калібрування полягає в переміщенні в отворі жорсткого інструмента, розміри поперечного перерізу якого дещо більші за розміри поперечного перерізу отвору. У цьому випадку інструмент згладжує нерівності, виправляє дефекти поверхні і зміцнює її.

Найпростішим інструментом є сталеві загартовані кульки, яка проштовхується крізь попередньо досить точно оброблений отвір (рис. 41, а). Роль інструмента може виконувати також оправка – **дорн**, який проштовхується (рис. 41, б) або протягається (рис. 41, в) через отвір.

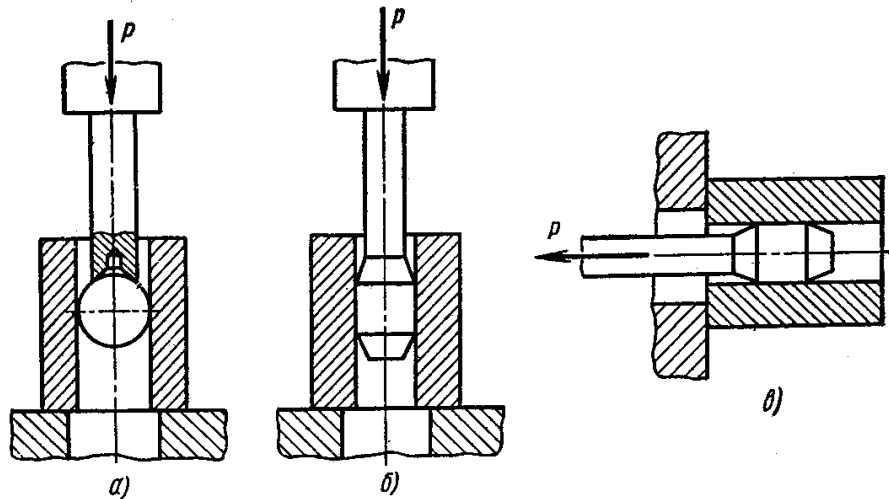


Рисунок 41 – Схеми калібрування отворів

Заготовки обробляють за один чи кілька проходів на пресах (рис. 41, а, б) або горизонтально-протяжних верстатах (рис. 41, в).

Контрольні питання

1. Основні методи обробки поверхневим пластичним деформуванням.
2. Наведіть основні схеми накатування різьб, зубців зубчастих коліс.
3. Наведіть схеми обкатування і розкатування поверхонь.
4. Наведіть схеми калібрування отворів.

13 ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ТА ЕЛЕКТРОХІМІЧНІ

МЕТОДИ ОБРОБКИ

В машинобудуванні часто виникають технологічні проблеми, пов'язані з обробкою матеріалів і деталей, форма та стан поверхневого шару яких важко отримати механічними методами. До таких проблем відноситься обробка надто твердих, дуже в'язких, крихких і неметалевих матеріалів, тонкостінних нежорстких деталей, пазів і отворів, які мають розміри в кілька мікрометрів, поверхонь деталей з малою шорсткістю або малою товщиною дефектного поверхневого шару. Такі проблеми вирішуються застосуванням електрофізичних і електрохімічних (ЕФЕХ) методів обробки.

ЕФЕХ методи обробки з успіхом доповнюють обробку різанням, а в деяких випадках мають переваги перед нею. Так, за ЕФЕХ методів обробки силові навантаження або відсутні, або настільки незначні, що практично не впливають на точність обробки. Вони дозволяють не тільки змінювати форму оброблюваної поверхні заготовки, а й впливати на стан поверхневого шару. Так, наприклад, оброблена поверхня не зміцнюється, дефектний шар незначний, видаляються припали поверхні, отримані під час шліфування тощо. Водночас підвищуються зносостійкі, корозійні, міцнісні та інші експлуатаційні властивості деталей.

ЕФЕХ методи обробки поділяють на такі групи:

1. *Електроерозійні методи обробки.*
2. *Електрохімічна обробка.*
3. *Анодно-механічна обробка.*
4. *Ультразвукова обробка.*
5. *Променеві способи обробки.*

13.1 ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНІ МЕТОДИ ОБРОБКИ

Електроерозійні методи обробки ґрунтуються на законах ерозії (руйнування) електродів із струмопровідних матеріалів за пропускання через них імпульсного електричного струму. До цих методів відносять електроіскрову, електроімпульсну, високочастотні електроіскрову та електроімпульсну і електроконтактну обробки.

Якщо на електродах є різниця потенціалів, то відбувається іонізація міжелектродного простору. Коли напруга досягає певного значення, в середовищі між електродами утворюється канал провідності, по якому проходить електрична енергія у вигляді імпульсного іскрового чи дугового розряду. За високої концентрації енергії, що витрачається за $10^{-5} \dots 10^{-8}$ с, миттєва густина струму в каналі провідності досягає $8000 \dots 10000$ А/мм², внаслідок чого температура на поверхні оброблюваної заготовки-електрода зростає до $10000 \dots 12000$ °С. За такої температури миттєво оплавляється і випаровується елементарний об'єм металу і на оброблюваній поверхні

утворюється лунка. Видалений метал твердне в газовому середовищі або в діелектричній рідині (гас, мінеральне масло у вигляді гранул діаметром 0,01...0,005 мм).

Наступний імпульс струму пробиває міжелектродний простір там, де відстань між електродами найменша. За безперервного підведення до електродів імпульсного струму процес ерозії продовжується до тих пір, поки не видалиться увесь метал, що знаходиться між електродами на відстані, на якій можливий електричний пробій (0,01...0,05 мм).

Для продовження процесу необхідно зближувати електроди до вказаного значення. Це зближення здійснюється на верстатах для електроерозійної обробки автоматично.

13.1.1 Електроіскрова обробка

Під час електроіскрової обробки використовують імпульсні іскрові розряди між електродами, одним з яких є заготовка (анод), а другим – інструмент (катод).

Схему електроіскрового верстата з генератором імпульсів RC показано на рис. 42. Конденсатор C , увімкнений в зарядний контур, заряджається через резистор R від джерела постійного струму напругою 100...200 В. Коли напруга на електродах, що утворюють розрядний контур, досягне пробійного значення, відбувається розряд енергії, накопиченої конденсатором. Тривалість імпульсу становить 20...200 мкс.

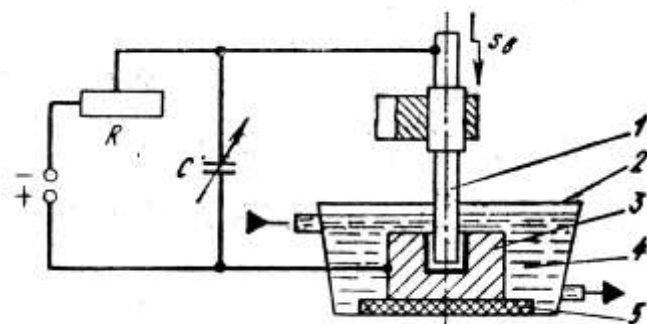


Рисунок 42 – Схема електроіскрового верстата

- 1 – електрод-інструмент;
- 2 – ванна; 3 – електрод-заготовка;
- 4 – діелектрична рідина;
- 5 – ізолятор

Регулюючи ємність конденсатора, можна регулювати режим обробки, тобто продуктивність процесу. М'які режими дозволяють отримувати розміри з точністю до 0,002 мм за шорсткості поверхні 0,63...0,16 мкм. Інструменти-електроди виготовляють з мідно-графітових та інших матеріалів.

Електроіскровим методом обробляють практично будь-які струмопровідні матеріали, але ефект ерозії (*електроерозійна оброблюваність*) за однакових параметрів електричних імпульсів буде різним. Так, якщо взяти електроерозійну оброблюваність сталі за одиницю, то для інших металів її можна подати в таких відносних одиницях: тверді сплави – 0,5; титан – 0,6; нікель – 0,8; мідь – 1,1; латунь – 1,6; алюміній – 4; магній – 6.

На рис. 43 показано приклади електроіскрової обробки деталей. Це обробка наскрізних отворів будь-якого поперечного перерізу (а), глухих отворів і порожнин (б), фасонних отворів і порожнин за способом трепанації (в), отворів з криволінійними осями (г); вирізання заготовок з листового матеріалу з використанням інструмента-електрода з дроту або стрічки (д), плоске, кругле і внутрішнє (е) шліфування, розрізання заготовок, клеймування деталей.

Електроіскрову обробку застосовують для виготовлення штампів, прес-форм, волок, деталей паливної апаратури двигунів внутрішнього згорання, сіток, сит тощо.

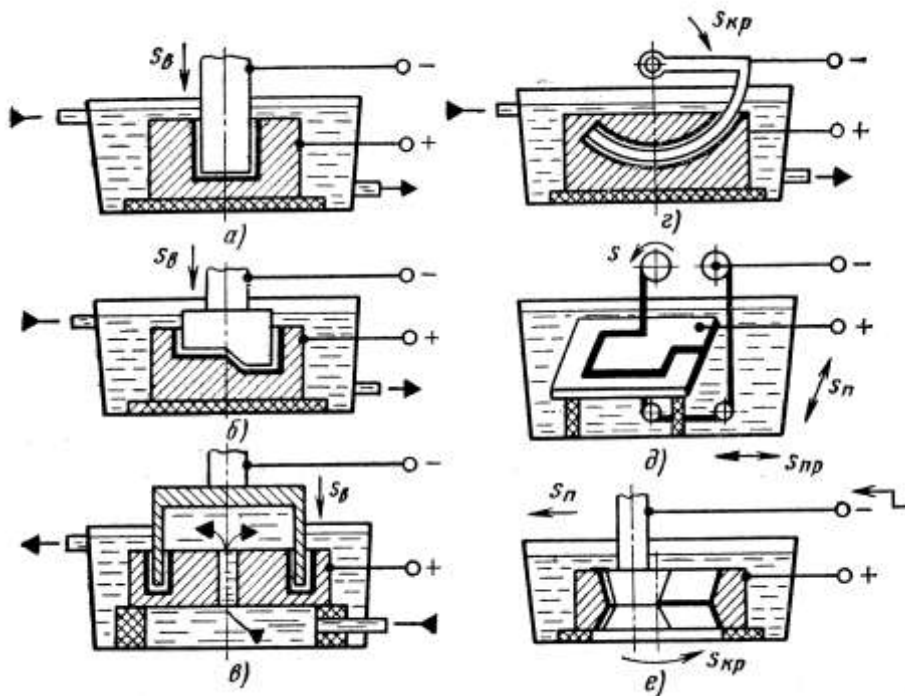


Рисунок 43 – Схеми електроіскрової обробки

- а – прошивання отвору; б – обробка фасонної порожнини штампа;
- в – прошивання отвору за способом трепанації;
- г – прошивання криволінійного отвору; д – вирізування заготовки з листа;
- е – шліфування внутрішньої поверхні фільера

13.1.2 Електроімпульсна обробка

За електроімпульсної обробки використовують електричні імпульси великої тривалості (500...10000 мкс), внаслідок чого відбувається дуговий розряд. Значні потужності імпульсів, отриманих від електронних чи машинних генераторів, забезпечують високу продуктивність процесу оброб-

ки. Застосування графітових електродів і обробку на зворотній полярності (заготовка – катод) дозволило зменшити руйнування електродів.

Електроімпульсну обробку доцільно застосовувати для попередньої обробки штампів, турбінних лопаток, фасонних отворів в деталях із жароміцних сплавів. Вона в 8...10 разів продуктивніша, ніж електроіскрова.

13.1.3 Високочастотна електроіскрова обробка

Цей спосіб обробки застосовують для підвищення точності і зменшення шорсткості поверхонь, оброблених електроерозійним методом. Спосіб ґрунтується на використанні електричних імпульсів малої потужності за частоти 100...150 кГц.

Продуктивність методу в 30...50 разів вища, ніж у електроіскрового методу, за значного збільшення точності і зменшення шорсткості. Спрацювання інструмента незначне.

Високочастотний електроіскровий метод застосовують для обробки деталей з твердих сплавів, оскільки він виключає структурні зміни і утворення мікротріщин у поверхневому шарі матеріалу оброблюваної заготовки.

13.1.4 Електроконтактна обробка

Електроконтактна обробка ґрунтується на місцевому нагріванні заготовки в місці контакту з електродом-інструментом і видаленні розм'якшеного або навіть розплавленого металу із зони обробки механічним шляхом під час відносного руху заготовки та інструмента. Джерелом тепла в зоні обробки є імпульсні дугові розряди. Видалення металу з заготовки *1* (рис. 44) здійснюється у повітряному середовищі обертовим диском-електродом *2*. Під час обертання диска зі швидкістю до 30 м/с між ним і заготовкою, які з'єднані з джерелом живлення *3* (знижувальним трансформатором), виникають в місцях періодичного розриву контактів дугові розряди, під дією яких руйнується метал заготовки.

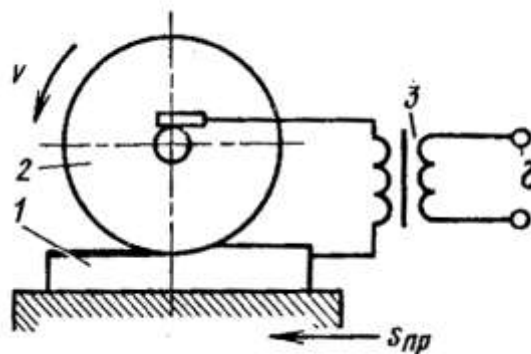


Рисунок 44 – Схема електроконтактної обробки плоскої поверхні

Електроконтактну обробку рекомендують для обробки крупних деталей з вуглецевих і легованих сталей, чавуну, кольорових, тугоплавких і спеціальних сплавів. Її застосовують під час зачищення виливків від задирок, відрізання ливників, зачищення прокату, чорнового зовнішнього, внутрішнього і плоского шліфування крупних деталей машин з важкооброблюваних сплавів, шліфування з одночасним поверхневим гартуванням деталей з вуглецевих сталей. Метод не забезпечує високої точності і якості поверхні, але дає високу продуктивність зняття металу з заготовки.

Контрольні питання

1. На яких явищах ґрунтуються електроерозійні методи обробки?
2. Суть, схема і застосування електроіскрової обробки.
3. Суть, схема і застосування електроконтактної обробки.

13.2 ЕЛЕКТРОХІМІЧНА ОБРОБКА

Електрохімічні методи обробки ґрунтуються на законах анодного розчинення в процесі електролізу. Під час пропускання постійного електричного струму через електроліт на поверхні заготовки, що є анодом, відбуваються хімічні реакції і поверхневий шар металу перетворюється на хімічну сполуку, яка переходить у розчин або видаляється механічним способом.

13.2.1 Електрохімічне полірування

Електрохімічне полірування виконують у ванні 1 з електролітом (рис. 45). Залежно від оброблюваного матеріалу електролітом є розчини кислот або лугів. Заготовку 2 підключають до анода; електродом-катодом 3 є свинцева, мідна або сталева пластина. Для більшої інтенсивності процесу електроліт підігрівають до температури 40...80 °С.

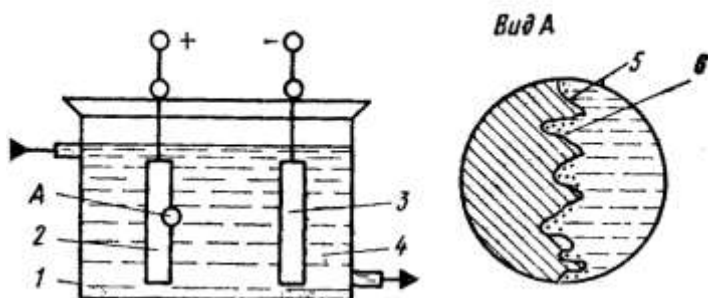


Рисунок 45 – Схема електрохімічного полірування

Під час подачі струму на електроди починається процес розчинення матеріалу заготовки-анода. Розчинення відбувається переважно на виступах 5 мікронерівностей поверхні внаслідок більш високої густини струму на їх вершинах. Впадини між мікровиступами заповнюються продуктами розчинення δ . Внаслідок більшої швидкості розчинення виступів, мікронерівності згладжуються і оброблювана поверхня набуває металічного блиску.

13.2.2 Електрохімічна розмірна обробка

Цей вид обробки виконують у струмені електроліту, який прокачується під тиском крізь простір, що утворюється між заготовкою-анодом 2 і інструментом-катодом 1 (рис. 46).

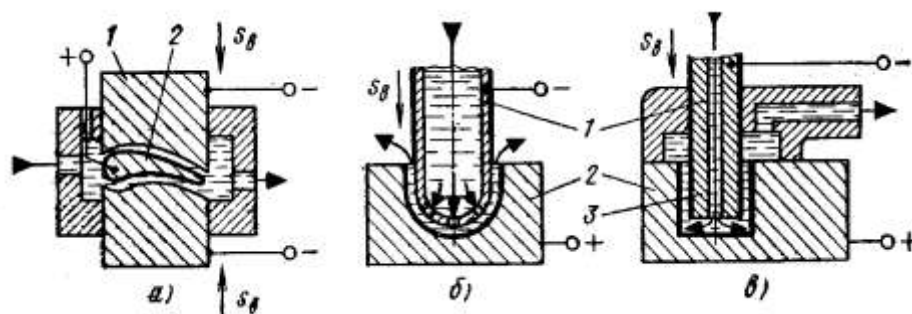


Рисунок 46 – Схеми електрохімічної розмірної обробки

Струміль електроліту, що безперервно подається в міжелектродний простір, розчиняє солі, які утворюються на заготовці, і видаляє їх із зони обробки.

За цього способу одночасно обробляється вся поверхня заготовки, яка знаходиться під активною дією катода, що забезпечує високу продуктивність процесу. Ділянки заготовки, які не потребують обробки, ізолюють. Інструменту надають форму, протилежну формі оброблюваної поверхні. Зношування інструмента відсутнє. Спосіб рекомендують для обробки заготовок з високоміцних і важко оброблюваних матеріалів. Відсутність тиску інструмента на заготовку дозволяє оброблювати нежорсткі тонкостінні деталі з високою точністю і якістю обробленої поверхні.

Для розмірної електрохімічної обробки використовують нейтральні електроліти. Найчастіше застосовують розчини солей NaCl , NaNO_3 і Na_2SO_4 .

На рис. 46 подано схеми обробки турбінної лопатки (а), штампа (б) і схему прошивання наскрізного циліндричного отвору (в). В останньому випадку для попередження збільшення діаметра отвору інструмент 1 ізолюється неелектропровідною речовиною 3.

13.2.3 Електроабразивна і електроалмазна обробки

За цих методів обробки інструментом-електродом є шліфувальний круг, виготовлений з абразивного матеріалу на електропровідній зв'язці (бакелітова зв'язка з графітовим наповнювачем). Між анодом-заготовкою 1

(рис. 47, а) і катодом-шліфувальним кругом є зазор, утворений зернами 2, які виступають із зв'язки 3. В цей зазор подається електроліт. Продукти анодного розчинення матеріалу заготовки видаляються абразивними зернами під час обертання шліфувального круга.

За електроабразивної обробки 85...90% припуску видаляється за рахунок анодного розчинення і 15...10% – за рахунок механічної дії абразивного круга. У випадку електроалмазної обробки ~ 75% припуску видаляється за рахунок анодного розчинення і ~ 25% – за рахунок механічної дії алмазних зерен.

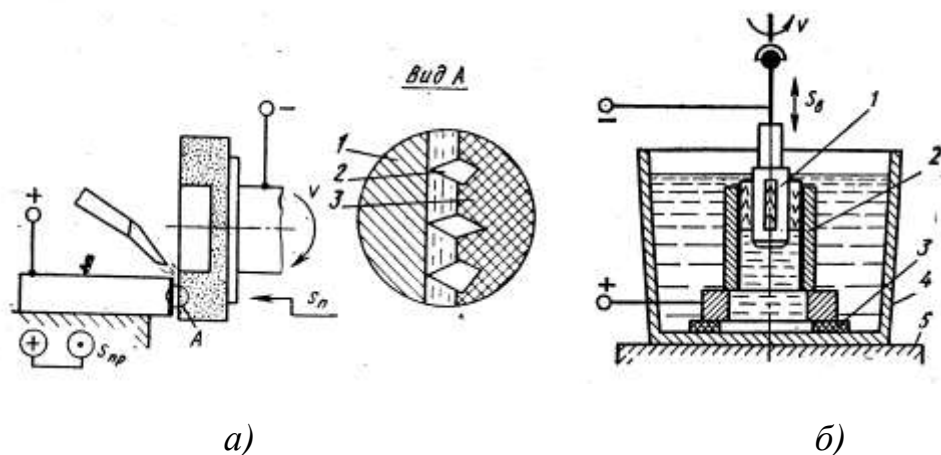


Рисунок 47 – Схема електроабразивного шліфування (а) і електрохімічного хонінгування (б)

Чистову обробку поверхонь можна проводити електрохімічним хонінгуванням (рис. 47, б). Відмінність його від хонінгування абразивними головками полягає в тому, що заготовку 2 встановлюють у ванну 4 з електролітом і підключають до анода. Хонінгувальну головку 1 підключають до катода. Замість абразивних брусків в головці встановлюють дерев'яні чи пластмасові. Заготовку від ванни, яка встановлена на столі хонінгувального верстата 5, ізолюють неелектропровідним матеріалом 3. Продукти анодного розчинення видаляються з оброблюваної поверхні брусками під час обертального і зворотно-поступального рухів хонінгувальної головки. Поверхня набуває дзеркального блиску. Продуктивність електрохімічного хонінгування в 4...5 разів вища за продуктивність механічного хонінгування.

Контрольні питання

1. На яких явищах ґрунтується електрохімічна обробка?
2. Суть і схема електрохімічного полірування.
3. Суть і схема розмірної електрохімічної обробки.
4. Суть і схема електроабразивної обробки.

13.3 АНОДНО-МЕХАНІЧНА ОБРОБКА

Анодно-механічна обробка ґрунтується на поєднанні електротермічних і електромеханічних процесів і займає проміжне положення між електроерозійними і електрохімічними методами. Оброблювану заготовку підключають до анода, а інструмент – до катода. Залежно від характеру обробки і виду оброблюваної поверхні як інструмент використовують металеві диски, циліндри, стрічку, дріт. Обробка проводиться в середовищі електроліту, котрим найчастіше є водний розчин рідкого натрієвого скла. Заготовці й інструменту задають такі самі рухи, як і за звичайних методів механічної обробки. Електроліт подають в зону обробки безперервно крізь сопло. Під час пропускання через розчин електроліту постійного електричного струму відбувається процес анодного розчинення, як за електрохімічної обробки. Під час стикання інструмента-катода з мікронерівностями оброблюваної поверхні заготовки-анода відбувається процес електроерозії, як у разі електроіскрової обробки. Крім того, під час пропускання електричного струму метал заготовки в точці контакту з інструментом розігрівається так, як за електроконтактної обробки і метал заготовки розм'якшується. Продукти електроерозії й анодного розчинення видаляються із зони обробки під час відносних рухів інструмента і заготовки.

Анодно-механічним способом обробляють заготовки зі всіх струмопровідних металів і сплавів, в'язких матеріалів.

На рис. 48 показано схеми прикладів анодно-механічної обробки: розрізання заготовки на частини, прорізання пазів, щілин (а), обточування поверхонь тіл обертання (б), круглого шліфування (в), обробка плоскої поверхні (г).

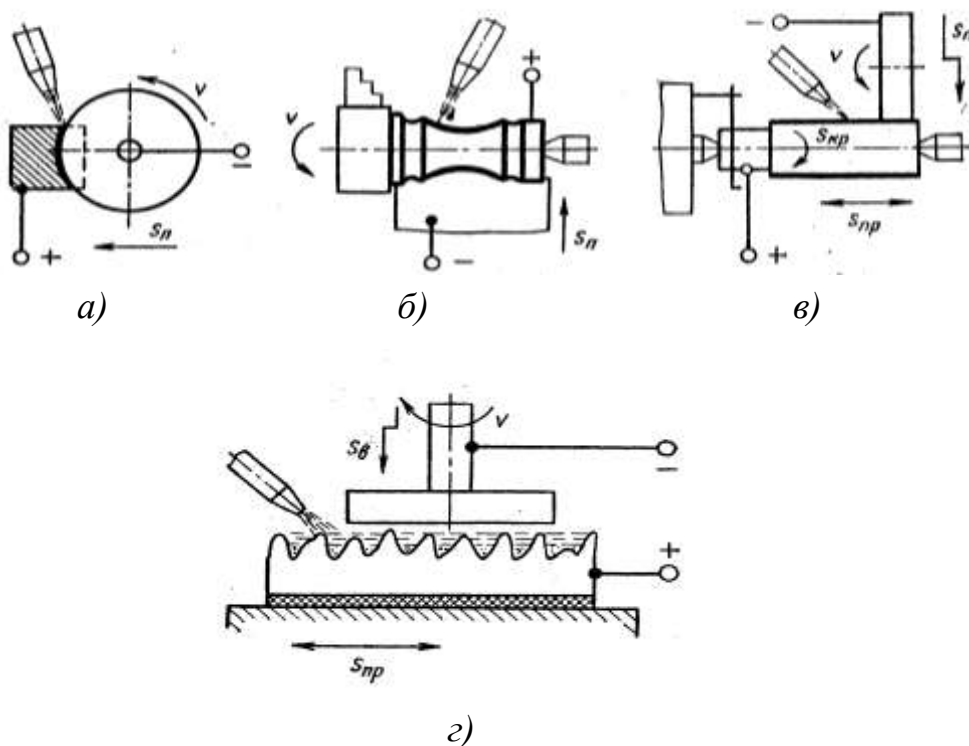


Рисунок 48 – Приклади анодно-механічної обробки

Анодно-механічним методом також полірують поверхні, заточують різальний інструмент.

Контрольні питання

1. В чому полягає суть анодно-механічної обробки?
2. Наведіть приклади та схеми анодно-механічної обробки.

13.4 УЛЬТРАЗВУКОВІ ТА ПРОМЕНЕВІ МЕТОДИ ОБРОБКИ

13.4.1 Ультразвукова обробка

Ультразвукова обробка матеріалів ґрунтується на руйнуванні оброблюваного матеріалу абразивними зернами під ударами інструмента, який коливається з ультразвуковою частотою. Джерелом енергії є ультразвукові генератори струму з частотою 16...30 кГц. На рис. 49 показано схему ультразвукової обробки. Основними елементами ультразвукового верстата є магнітострикційний вібратор 4, на обмотку якого подається струм високої частоти від ультразвукового генератора, і концентратор 3, що збільшує амплітуду коливань до 10...60 мкм. На концентраторі закріплюють робочий інструмент – пуансон 2. Під ним у ванну встановлюють заготовку 1 і в зону обробки подають суспензію з води і абразивного матеріалу (карбідів бору чи кремнію або електрокорунду). Інструмент притискують до заготовки силою 1...60 Н.

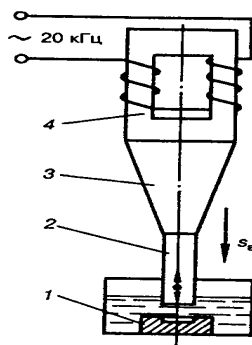


Рисунок 49 – Схема ультразвукової обробки

Ультразвуковим методом обробляють наскрізні і глухі отвори будь-якої форми поперечного перерізу, фасонні порожнини, розрізають заготовки на частини, прошивають отвори з криволінійними осями тощо. Цим методом можна обробляти крихкі тверді матеріали: скло, кераміку, тверді сплави, титан, вольфрам, дорогоцінні мінерали.

Робочі інструменти для обробки отворів діаметром 0,5...20 мм виконують суцільними; діаметром 20...100 мм – порожнистими. Внутрішні порожнини обробляють пуансонами, форма торців яких протилежна формі оброблюваної поверхні. Інструменти виготовляють із загартованих (HRC 35...40), але в'язких матеріалів.

Точність розмірів і шорсткість поверхонь, оброблених ультразвуковим методом, залежать від зернистості використовуваних абразивних матеріалів і відповідають точності і шорсткості поверхонь, оброблених шліфуванням.

13.4.2 Променеві методи обробки

До променевих методів формоутворення поверхонь деталей машин відносять електронно-променеву та світлопроменеву (лазерну) обробки.

Електронно-променева обробка ґрунтується на перетворенні кінетичної енергії спрямованого на оброблювану деталь пучка електронів в теплову. Висока густина енергії електронного променя, сфокусованого на дуже малих площах (до 10^{-7} см²), викликає практично миттєве нагрівання поверхні деталі до 6000 °С, внаслідок чого навіть найбільш важкоплавкий метал в цій зоні випаровується. А на відстані 1 мкм від кромки променя температура не перевищує 300 °С. Тривалість імпульсів та інтервали між ними підбирають так, щоб за один цикл встиг нагрітися і випаруватися метал тільки під променем. Тривалість імпульсів становить $10^{-4} \dots 10^{-6}$ с, а частота – 50...6000 Гц. Система керування переміщенням електронного променя забезпечує обробку заготовки потрібного профілю за наперед заданою програмою.

Електронно-променевим методом обробляють отвори діаметром 1 мм...10 мкм, прорізають пази, ріжуть заготовки, виготовляють тонкі плівки і сітки з фольги. Обробляють заготовки з важкооброблюваних металів і сплавів, з неметалевих матеріалів: рубіну, кераміки, кварцу, напівпровідникових матеріалів.

Недоліком електронно-променевої обробки є те, що вона можлива тільки у вакуумі.

Лазерна обробка ґрунтується на тепловій дії світлового променя високої енергії на поверхню оброблюваної заготовки. Джерелом світлового випромінювання є **лазер** – оптичний квантовий генератор. Енергія світлового імпульсу лазера зазвичай невелика (20...100 Дж), але вона виділяється в мільйонні частки секунди і концентрується у сфокусованому промені діаметром кілька мікрометрів, що забезпечує температуру 6000...8000 °С. Внаслідок цього поверхневий шар матеріалу заготовки, що знаходиться у фокусі променя, миттєво розплавляється і випаровується.

Лазерну обробку застосовують для прошивання отворів, розрізання заготовок на частини, вирізання заготовок з листових матеріалів, прорізання пазів. Обробляти можна заготовки з будь-яких матеріалів, незалежно від їх твердості, міцності та в'язкості. Переміщенням заготовки відносно світлового променя керують системи програмного керування, що дозволяє прорізати в заготовках складні криволінійні пази та вирізати із заготовок деталі складної геометричної форми.

Контрольні питання

1. На якому принципі ґрунтується ультразвукова обробка?
2. Наведіть схему ультразвукової обробки.
3. На яких принципах ґрунтуються променеві методи обробки?
4. Які методи променевої обробки Ви знаєте?
5. Для яких виробів доцільне застосування променевих методів обробки?

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Технологія конструкційних матеріалів / Сологуб М. А. та ін.; за ред. М. А. Сологуба. К. : Вища школа, 2002. 374 с.
2. Конструкційні та функціональні матеріали : навч. посіб. У 2 ч.; Ч. 1. Основи фізики твердого тіла. Конструкційні матеріали / Бабак В. П. та ін. К. : Техніка, 2004. 344 с.
3. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів : навч. посібник / Хільчевський В. В. та ін. К. : Либідь, 2002. 328 с.
4. Технологія конструкційних матеріалів. Організація самостійної та практичної роботи : навчальний посібник / Шиліна О. П. та ін. Вінниця : ВНТУ, 2020. 111 с. ISBN 978-966-641-801-5
5. Клименко В. М., Шиліна О. П., Осадчук А. Ю. Технологія конструкційних матеріалів. Частина третя. Основи механічної обробки матеріалів : навчальний посібник. Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. 90 с.
6. Шиліна О. П., Клименко В. М. Практикум з конструкційних матеріалів : навчальний посібник. Вінниця : ВДТУ, 2001. 109 с.
7. Бялік О. М. Металознавство. К. : Видавництво «Політехніка», 2002. 384 с.
8. Сушко О. В., Кюрчев С. В. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів : навч. посіб. Мелітополь : ТОВ «Видавничий будинок ММД», 2010. 232 с.
9. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавства. Практикум : навч. посіб. / В. В. Попович та ін. Л. : Світ 2009. 552 с.
10. Плєскач В. М., Волчок І. П. Технологія конструкційних матеріалів. Практикум : навч. посібник. Запоріжжя : Дике поле, 2007. 168 с.

Електронне навчальне видання

Олена Павлівна Шиліна

Технологія конструкційних матеріалів

Частина третя. Основи механічної обробки матеріалів

Навчальний посібник

Рукопис оформлено *О. Шиліною*

Редактор *Т. Старічек*

Оригінал-макет виготовлено *Т. Старічек*

Підписано до видання 18.04.2025 р.

Гарнітура Times New Roman.

Зам. № P2025-066.

Видавець та виготовлювач

Вінницький національний технічний університет,

Редакційно-видавничий відділ.

ВНТУ, ГНК, к. 114.

Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021.

press.vntu.edu.ua;

E-mail: irvc.vntu@gmail.com.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи серія

ДК № 3516 від 01.07.2009 р.