

О. П. Шиліна

ТЕХНОЛОГІЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Частина друга. Заготівельне виробництво

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

О. П. Шиліна

ТЕХНОЛОГІЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Частина друга. Заготівельне виробництво

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

Л. Г. Козлов, доктор технічних наук, професор

В. І. Савуляк, доктор технічних наук, професор

Шиліна, О. П.

Ш57 Технологія конструкційних матеріалів. Частина друга. Заготівельне виробництво : навчальний посібник [Електронний ресурс] / Шиліна О. П. – [Вид. 2-е, перероб. та доп.]. – Вінниця : ВНТУ, 2025. – (PDF, 154 с.)

ISBN 978-617-8163-40-2 (PDF)

В посібнику (другій частині) стисло розглянуто основні технологічні методи і способи виробництва з конструкційних матеріалів заготовок для деталей машин. Зокрема розглядаються ливарне виробництво, обробка тиском, зварювання, основи порошкової металургії. Посібник розроблено згідно з планом кафедри та програмами дисциплін «Фізико-хімічні та металургійні основи сучасного виробництва металів», «Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство».

УДК 669.01

ISBN 978-617-8163-40-2 (PDF)

© ВНТУ, 2025

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
Розділ 1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЗАГОТІВЕЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА	7
1.1 ПОКАЗНИКИ ТОЧНОСТІ ЗАГОТОВОК.....	7
1.2 ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА СПОСІБ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАГОТОВКИ	8
1.2.1 Матеріали та вимоги до якості деталі	8
1.2.2 Розміри, маса та конфігурація деталі	8
1.2.3 Характер виробництва	8
1.2.4 Можливості існуючого обладнання	9
Розділ 2 ТЕХНОЛОГІЯ ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА	10
2.1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА ..	10
2.1.1 Місце та значення ливарного виробництва в машинобудуванні ..	10
2.1.2 Загальна технологічна схема виготовлення виливків	10
2.2 ЛИВАРНІ СПЛАВИ	11
2.2.1 Властивості ливарних сплавів.....	11
2.2.2 Класифікація ливарних сплавів	13
2.3 ЛИВАРНІ ФОРМИ	17
2.3.1 Лиття в піщано-глинисті форми	18
2.3.2 Лиття в оболонкові форми.....	24
2.3.3 Лиття у форми, виготовлені за моделями, що витоплюються.....	26
2.3.4 Лиття в кокіль	29
2.3.5 Відцентрове лиття	31
2.3.6 Лиття під тиском.....	33
2.4 ПЛАВКА МЕТАЛУ В ЛИВАРНИХ ЦЕХАХ.....	35
2.4.1 Плавка сталі.....	35
2.4.2 Плавка чавуну	35
2.4.3 Плавка мідних сплавів	37
2.4.4 Плавка алюмінієвих сплавів.....	38
2.4.5 Плавка магнієвих сплавів	38
Розділ 3 ОБРОБКА МЕТАЛІВ ТИСКОМ	39
3.1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДУ	39
3.1.1 Суть і особливості обробки металів тиском	39
3.1.2 Основні види обробки металів тиском.....	39
3.1.3 Вплив обробки тиском і умов її здійснення на властивості та структуру вихідного матеріалу	40
3.2 НАГРІВАННЯ МЕТАЛУ ПІД ЧАС ОБРОБКИ ТИСКОМ.....	43
3.2.1 Термічний режим.....	43
3.2.2 Нагрівальні пристрої	43
3.3 ПРОКАТНЕ ВИРОБНИЦТВО	45

3.3.1 Суть процесу прокатування.....	45
3.3.2 Основні види прокатування.....	45
3.3.3 Сортамент прокату	46
3.3.4 Інструмент і обладнання для прокатування	47
3.4 ПРЕСУВАННЯ	53
3.4.1 Суть процесу пресування.....	53
3.4.2 Методи пресування	54
3.5 ВОЛОЧІННЯ	55
3.5.1 Суть процесу волочіння.....	55
3.5.2 Інструмент та обладнання для волочіння	55
3.5.3 Схеми волочіння.....	56
3.6 КУВАННЯ	56
3.6.1 Суть процесу і технологічні операції кування	56
3.6.2 Устаткування для кування.....	58
3.7 ГАРЯЧЕ ОБ'ЄМНЕ ШТАМПУВАННЯ	60
3.7.1 Суть процесу	60
3.7.2 Способи штампування	61
3.7.3 Устаткування для об'ємного штампування	62
3.7.4 Обробка поковок.....	66
3.8 ХОЛОДНЕ ШТАМПУВАННЯ.....	66
3.8.1 Холодне об'ємне штампування.....	67
3.8.2 Листове штампування	68
Розділ 4 ОСНОВИ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА.....	73
4.1 ФІЗИЧНА СУТЬ І КЛАСИФІКАЦІЯ СПОСОБІВ ЗВАРЮВАННЯ ...	73
4.2 ДУГОВЕ ЗВАРЮВАННЯ	74
4.2.1 Зварювальна дуга та її властивості.....	74
4.2.2 Джерела струму для дугового зварювання	77
4.3 РУЧНЕ ДУГОВЕ ЗВАРЮВАННЯ.....	81
4.3.1 Суть процесу	81
4.3.2 Електроди для ручного дугового зварювання.....	82
4.3.3 Види зварних з'єднань	85
4.3.4 Технологія ручного дугового зварювання	87
4.4 ЗВАРЮВАННЯ ПІД ФЛЮСОМ.....	90
4.4.1 Суть процесу	90
4.4.2 Зварювальні флюси й дроти	92
4.4.3 Технологія зварювання під флюсом.....	93
4.4.4 Обладнання для зварювання під флюсом	93
4.5 ЕЛЕКТРОШЛАКОВЕ ЗВАРЮВАННЯ	95
4.6 ЗВАРЮВАННЯ В ЗАХИСНИХ ГАЗАХ.....	97
4.6.1. Загальні відомості.....	97
4.6.2 Аргонодугове зварювання	99
4.6.3 Зварювання у вуглекислому газі.....	101
4.7 ПЛАЗМОВЕ ЗВАРЮВАННЯ.....	102

4.8 ГАЗОВЕ ЗВАРЮВАННЯ ТА РІЗАННЯ МЕТАЛІВ	104
4.8.1 Загальні відомості.....	104
4.8.2 Технологія газового зварювання.....	105
4.8.3 Технологія кисневого різання	107
4.8.4 Обладнання та апаратура для газового зварювання й різання	110
4.9 ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЇ КОНТАКТНОГО ЗВАРЮВАННЯ.....	115
4.9.1 Фізичні основи та види контактного зварювання.....	115
4.9.2 Технологія стикового контактного зварювання.....	117
4.9.3 Технологія точкового контактного зварювання.....	121
4.9.4 Технологія шовного контактного зварювання	124
4.9.5 Конденсаторне зварювання	125
4.9.6 Дифузійне зварювання	126
4.9.7 Ультразвукове зварювання.....	127
4.9.8 Зварювання тертям	128
4.9.9 Холодне зварювання	130
4.9.10 Зварювання вибухом	131
4.9.11 Зварюваність металів і сплавів.....	133
Розділ 5 КОНСТРУКЦІЙНІ ПОРОШКОВІ МАТЕРІАЛИ	136
5.1 ЗАГАЛЬНА СХЕМА ВИРОБНИЦТВА ПОРОШКОВИХ ВИРОБІВ	136
5.2 ВИРОБНИЦТВО ПОРОШКІВ.....	137
5.2.1 Здрібнювання вихідних матеріалів механічними способами	137
5.2.2 Здрібнювання вихідних матеріалів у рідкій фазі	140
5.2.3 Фізико-хімічні способи одержання порошкових матеріалів	142
5.3 ПІДГОТОВКА ПОРОШКІВ ДО ФОРМУВАННЯ	143
5.4 ФОРМУВАННЯ ЗАГОТОВОК	144
5.4.1 Пресування порошків.....	144
5.4.2 Екструзія.....	146
5.4.3 Прокатування порошків.....	146
5.4.4 Шлікерне лиття	147
5.5 СПІКАННЯ ЗАГОТОВОК	147
5.6 ДОДАТКОВА ОБРОБКА ПРЕСОВАНИХ ЗАГОТОВОК	148
5.7 КЛАСИФІКАЦІЯ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ.....	150
5.7.1 Конструкційні порошкові матеріали	150
5.7.2 Порошкові зносостійкі матеріали	152
ЛІТЕРАТУРА.....	153

ВСТУП

Навчальний посібник написаний для здобувачів вищої освіти галузь знань «Механічна інженерія», відповідає навчальній програмі дисципліни «Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство». Він також частково відповідає навчальним програмам дисциплін «Основи обробки матеріалів» для здобувачів вищої освіти спеціальності «Матеріалознавство». В першій частині посібника ми познайомили читачів із властивостями конструкційних матеріалів, їх класифікацією, способами виробництва.

В другій частині знайомимо з основними технологічними методами і способами виробництва з конструкційних матеріалів заготовок для деталей машин, зокрема такими як ливарне виробництво, обробка тиском, зварювання, основами порошкової металургії. Заготівельне виробництво є невід'ємною частиною загального технологічного процесу виробництва машин в будь-якій галузі промисловості і його вивчення здобувачами передбачено вищезазначеними навчальними програмами. В посібнику також наводяться рекомендації щодо вибору оптимального технологічного способу виготовлення заготовок залежно від таких факторів, як тип конструкційного матеріалу, характер виробництва, вимоги до точності заготовки тощо.

Цей посібник може стати в нагоді також і здобувачам інших спеціальностей.

Розділ 1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЗАГОТІВЕЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

Заготовкою в машинобудуванні прийнято називати напівфабрикат, якому подальшою механічною обробкою надаються остаточні форма, розміри та якість поверхні. В машинобудуванні основними технологічними методами виготовлення заготовок є ливарне виробництво та обробка матеріалів тиском. В кожному з цих методів є значна кількість технологічних способів, які застосовуються залежно від багатьох факторів – типу конструкційного матеріалу, маси та розмірів деталі, характеру виробництва, можливостей підприємства тощо.

Під терміном «метод» потрібно розуміти групу технологічних процесів, в основі яких лежить єдиний принцип формоутворення, наприклад, лиття металу у ливарну форму для ливарного виробництва як технологічного методу або пластична формозміна металу для методу обробки металу тиском.

1.1 Показники точності заготовок

- **Точність розмірів.** Цей показник характеризується відхиленням дійсних розмірів заготовки від заданих на кресленні і визначається *квалітетом*. В машинобудуванні встановлено 19 квалітетів: 01, 0, 1, 2,..., 17. Чим більший номер квалітету, тим нижча точність, тобто більші відхилення реальних розмірів від заданих.
- **Шорсткість поверхні.** Цей показник передбачає 14 класів горсткості – від першого до чотирнадцятого. Точність вважається тим вищою, чим більший клас шорсткості.
- **Припуски на обробку.** Припуском називається шар металу, який знімається з поверхні заготовки в процесі її механічної обробки. Чим менший припуск, тим вища точність заготовки.
- **Напуски.** Напусками називаються дрібні елементи конструкції деталі, які неможливо виконати на заготовці, наприклад, невеликі отвори, канавки тощо. Їх створюють під час наступної механічної обробки.
- **Коефіцієнт вагової точності.** Цей показник визначають як відношення маси готової деталі M_0 до маси заготовки M_3 : $K_{в.т.} = M_0 / M_3$.
- **Коефіцієнт використання металу.** Його оцінюють як відношення маси готової деталі M_0 до маси металу, що був витрачений на виготовлення заготовки з урахуванням усіх технологічних відходів M_m : $M_{в.м.} = M_0 / M_m$

1.2 Фактори, що впливають на спосіб виготовлення заготовки

1.2.1 Матеріали та вимоги до якості деталі

Основна тенденція сучасного машинобудування – застосування матеріалів, які забезпечували б необхідні конструктивні та експлуатаційні властивості й мали підвищену оброблюваність на всіх стадіях переробки. Іншими словами, потрібно, щоб матеріали мали необхідний запас певних технологічних властивостей – *ковкість, рідкоплинність, зварюваність, оброблюваність різанням* тощо. В багатьох випадках уже заданий конструктором матеріал деталі є визначальним під час вибору технологічного методу виготовлення заготовки. Так, якщо це чавун або сталь з літерою «Л» в кінці марки, то деталь може бути виготовлена тільки литтям, а технологічний спосіб лиття буде вже залежати від ливарних властивостей цього матеріалу – рідкоплинності, схильності до усадки тощо. Якщо в технічних умовах для відповідальних, важко навантажених деталей вказуються певні вимоги щодо якості матеріалу, його фізико-механічних властивостей, то для таких деталей доцільно використовувати ковані або штамповані поковки, оскільки в процесі деформування створюється дрібнозерниста, направлена волокниста структура зі значно кращими фізико-механічними властивостями, ніж лита.

1.2.2 Розміри, маса та конфігурація деталі

Ці фактори в багатьох випадках під час вибору способу виготовлення заготовки мають визначальне значення. Так, для багатьох способів лиття розміри виливків обмежені технічними можливостями або економічною доцільністю застосування цих способів. Точно так само гарячим об'ємним штампуванням неможливо отримувати поковки масою більше 1000 кг. Складні за своєю формою деталі можна отримувати тільки литтям.

1.2.3 Характер виробництва

Для дрібносерійного та одиничного виробництва характерне використання заготовок, виготовлених методами лиття в піщано-глинисті форми, кування, різання з гарячекатаного прокату. Це зумовлено тим, що для цих умов виробництва економічно недоцільно виготовляти складну та дорогу технологічну оснастку. В умовах великосерійного та масового виробництва рентабельними є такі способи виготовлення заготовок, як гаряче об'ємне штампування, спеціальні способи лиття (в оболонкові форми, за моделями, що виплавляються, під тиском, в кокіль).

1.2.4 Можливості існуючого обладнання

Цю обставину потрібно враховувати в процесі вибору способу виготовлення заготовки на діючому підприємстві, можливості якого часто обмежені щодо застосування прогресивних методів, але можуть бути основними, визначальними, особливо в дрібносерійному, одиничному або ремонтному виробництвах.

Розділ 2 ТЕХНОЛОГІЯ ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА

2.1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА

2.1.1 Місце та значення ливарного виробництва в машинобудуванні

Лиття є одним з найбільш поширених методів виготовлення заготовок для деталей машин. Приблизно близько 70% (за масою) заготовок отримують литтям, а в деяких галузях машинобудування, наприклад у верстатобудуванні, 90...95%. Значне поширення ливарного виробництва пояснюється суттєвими його перевагами відносно інших способів виготовлення заготовок (кування, штампування). Литтям можна виготовляти заготовки практично будь-якої складності, ваги та розмірів з мінімальними припусками на механічну обробку. Крім того, виготовлення литих заготовок (виливків) значно дешевше, ніж заготовок, виготовлених обробкою тиском (поковок). До того ж, в деяких галузях, наприклад хімічному машинобудуванні, багато деталей з жароміцних і корозієстійких сталей і сплавів можна виготовляти тільки литтям. В сучасному ливарному виробництві приблизно 80% виливків за масою одержують із чавуну, 15% – із сталі і 5% – із сплавів кольорових металів.

2.1.2 Загальна технологічна схема виготовлення виливків

Суть ливарного виробництва полягає в тому, що фасонну заготовку виготовляють заливанням рідкого металу в ливарну форму, порожнина якої за розмірами і конфігурацією відповідає потрібній деталі. Виготовлення виливків – це досить складний комплекс технологічних процесів. Технологія виготовлення виливків починається з виготовлення моделей деталі та елементів ливникової системи, стрижневих ящиків, опок, модельних плит, шаблонів для перевірки розмірів форми та стрижнів. Усе це називається модельним комплектом і виготовляється в модельному цеху заводу.

На складі формових матеріалів їх (матеріали) висушують, просівають і відправляють у відділення для приготування формових та стрижневих сумішей.

Ливарні форми та стрижні виготовляють у формовому й стрижнево-му відділеннях цеху. Там само і складають форми. Весь цей процес називають формуванням.

Важливою ланкою технологічного процесу є приготування рідкого металу – плавка, яка починається з підготовки шихтових матеріалів на складі цих матеріалів. Тут їх сортують і після перевірки хімічного складу подають у плавильне відділення. Розплавлений метал з печей зливається в

розливальні ковші і подається на заливання форм. Після заливання охолоджені виливки виймають (вибивають) з форми і направляють у відділення для очищення від пригару та обрубкування залишків ливникової системи. Потім очищені виливки направляються у відділ технічного контролю. Придатні виливки в разі необхідності піддають термічній обробці для зняття внутрішніх напружень: відпалу, нормалізації, штучному старінню. Потім (за необхідності) виливки знову контролюють і подають на механічну обробку. Відпрацьована формова суміш після охолодження та регенерації повторно використовується для виготовлення ливарних форм.

2.2 ЛИВАРНІ СПЛАВИ

2.2.1 Властивості ливарних сплавів

Ливарні сплави як конструкційні матеріали потрібно, щоб мали певний комплекс властивостей, які прийнято поділяти на фізичні, хімічні, технологічні та експлуатаційні. В цьому посібнику розглянемо тільки технологічні властивості, зокрема ливарні, як такі, що притаманні тільки ливарним сплавам. До таких властивостей відносяться рідкоплинність, схильність до усадки та схильність до ліквації.

Рідкоплинність – здатність металів і сплавів в рідкому стані заповнювати ливарну форму та відтворювати у вилівку її обриси. Природа рідкоплинності досить складна і залежить від багатьох факторів, які можна розділити на такі групи:

- *внутрішні фактори*, пов'язані з будовою та властивостями металів в рідкому стані (природа сплаву, його хімічний склад, в'язкість, теплоємність, теплопровідність, наявність в сплаві нерозчинених домішок тощо). Високу рідкоплинність мають силуміни, чавуни, безолов'яні бронзи. З цих сплавів можна отримувати дуже складні, тонкостінні виливки. Середню рідкоплинність мають сплави алюмінію з міддю і магнієм, олов'яні бронзи, вуглецеві та низьколеговані сталі. Знижена рідкоплинність спостерігається у магнієвих сплавах;

- *зовнішні фактори*, що визначаються способом отримання виливків. Так, за лиття під тиском і під час відцентрового лиття рідкоплинність підвищується за рахунок примусового заповнення форми. Вона підвищується і під час лиття за моделями, що виплавляються, оскільки метал заливається в гарячу форму. Рідкоплинність знижується у разі лиття в металеві форми (кокілі) внаслідок більш інтенсивного теплообміну між рідким металом і холодною формою.

Рідкоплинність сплаву визначають технологічною пробою – заливанням рідкого металу у спіральну канавку в сухій піщано-глинястій формі (рис. 1). Канавка має трапеціїдний переріз площею 0.56 см^2 . За міру рідкоплинності сплаву беруть довжину заповненої частини спіралі в сантиметрах. Існують й інші технологічні проби для визначення рідкоплинності.

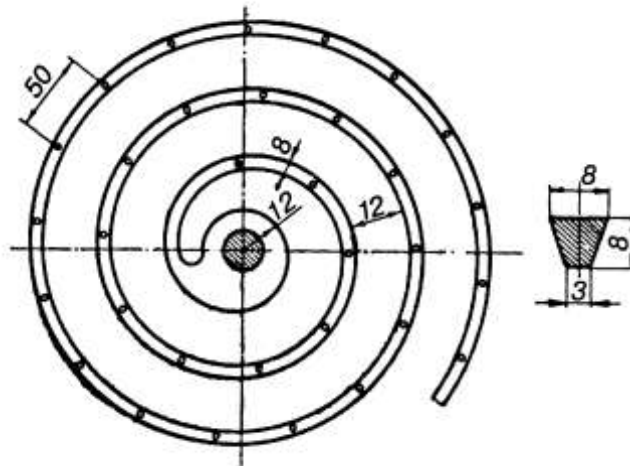


Рисунок 1 – Технологічна проба для визначення рідкоплинності сплавів

Схильність до усадки – це схильність сплаву до зменшення об'єму та лінійних розмірів вилівка в процесі його охолодження після заливання у форму. Усадка поділяється на об'ємну та лінійну і характеризується відповідно до коефіцієнтів об'ємної та лінійної усадки. Коефіцієнт об'ємної усадки визначається за формулою:

$$\eta = 100(V_1 - V_2)/V_1, \%$$

де V_1 і V_2 – відповідно об'єми форми та вилівка після його охолодження.

Оскільки кристалізація поширюється від стінки форми до її центра, то внаслідок об'ємної усадки під час кристалізації в центрі масивних частин вилівка утворюються порожнини, незаповнені металом, які називаються усадочними раковинами (рис. 2, а). Чим більший коефіцієнт об'ємної усадки, тим більший розмір усадочної раковини. Для попередження утворення усадочних раковин у виливках із сплавів з великою об'ємною усадкою (сталь, ковкий та високоміцний чавуни) над масивним перерізом вилівка створюють порожнину більшого перерізу (*додаток*) і усадочну раковину переводять у додаток, який потім відрізають від вилівка (рис. 2, б).

Внаслідок лінійної усадки відбувається скорочення лінійних розмірів вилівка. Коефіцієнт лінійної усадки визначається за формулою:

$$\eta = 100(L_1 - L_2)/L_1, \%$$

де L_1 і L_2 – відповідно лінійні розміри форми та вилівка після його повного охолодження.

Скорочення розмірів окремих частин вилівка, якщо на них є виступи, затримують лінійну усадку, внаслідок чого у виливку виникають внутрішні напруження, які можуть призвести до викривлення виливків або навіть до утворення в них тріщин. Особливо це явище стає небезпечним тоді, коли лінійна усадка частин вилівка зазнає значного опору ще і з боку ливарної форми, тобто форма є неподатливою. Таким чином, правильна конструкція вилівка, податлива ливарна форма можуть суттєво зменшити або

навіть повністю усунути негативні наслідки, пов'язані з лінійною усадкою сплаву.

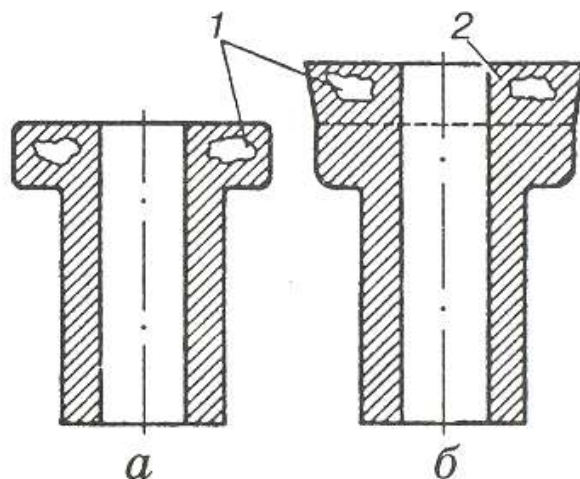


Рисунок 2 – Усадочні раковини та додатки у виливках

Схильність до ліквації. Ліквация – це неоднорідність хімічного складу сплаву в різних частинах виливка, що негативно впливає на його механічні властивості. Розрізняють ліквацию зональну, коли різні частини виливка мають різний хімічний склад, і дендритну (внутрішньокристалітну), коли неоднорідність хімічного складу спостерігається в кожному зерні. Дендритна ліквация може бути усунена наступною термічною обробкою – дифузійним відпалом. Зональну ж ліквацию термічною обробкою усунути неможливо, тому вона найбільш небезпечна. Зональна ліквация виникає в тих сплавах, де компоненти не розчиняються один в одному і не утворюють ні хімічних сполук, ні евтектичних сумішей (свинцева бронза, мідно-алюмінієві сплави). У виливках із сталі та чавуну ліквують сірка, фосфор та вуглець, особливо всередині товстих стінок внаслідок їх повільного охолодження.

Необхідно, щоб крім перерахованих властивостей ливарні сплави мали добру зварність, оскільки багато ливарних дефектів можуть бути усунені шляхом заварювання.

Таким чином, під час конструювання литої деталі, вибору способу лиття особливу увагу потрібно приділяти ливарним властивостям сплаву, без врахування котрих навіть за найдосконалішого технологічного процесу отримати виливок без ливарних дефектів неможливо. В усіх випадках, за інших рівних умов, потрібно надавати перевагу сплавам з кращими ливарними властивостями.

2.2.2 Класифікація ливарних сплавів

Чавуни. Чавун є найбільш поширеним матеріалом для виготовлення фасонних виливків. Чавунні виливки за масою становлять близько 75% від загальної кількості виливків. Таке значне поширення чавун отримав завдяки гарним технологічним властивостям і відносній дешевизні порівняно з іншими ливарними сплавами. Сфера використання чавуну постійно роз-

ширюється внаслідок безперервного підвищення його механічних і технологічних характеристик, а також розробки чавунів нових марок із спеціальними фізичними та механічними властивостями.

Ливарні чавуни поділяються на сірі, ковкі, високоміцні та чавуни з вермикулярним графітом залежно від форми графітних включень.

Сірий чавун – найбільш дешевий ливарний сплав. Має порівняно високі механічні властивості, відносно низьку температуру плавлення і дуже гарні ливарні властивості: високу рідкоплинність, низькі лінійну та об'ємну усадку (0.9...1.3%), завдяки чому із сірого чавуну можна отримувати якісні виливки без усадочних раковин, тріщин, жолоблення та інших дефектів.

Сірий чавун малочутливий до надрізів та інших концентраторів напружень, що пояснюється наявністю графітних включень, які, власне, вже є внутрішніми надрізами і додавання до них нових зовнішніх надрізів не викликає зниження міцності. Сірий чавун має здатність розсіювати вібраційні коливання за змінних навантажень, тому станини металорізальних верстатів, деталі дизелів, компресорів, корпуси редукторів тощо виготовляють із сірого чавуну. Використовувати ж сірий чавун для деталей машин, що зазнають ударних навантажень, не можна, оскільки він досить крихкий і має низьку пластичність (відносне видовження менше 0.5%).

Споживачами чавунного литва є такі галузі промисловості як автомобільна, тракторна, сільськогосподарська, верстатобудування та ін.

Ковкий чавун – це конструкційний матеріал, що використовується головним чином для виготовлення дрібних тонкостінних виливків (товщина стінки не більше 40...50 мм) для сільськогосподарських машин, автомобілів, тракторів, запірної арматури та інших деталей масового виробництва. Завдяки пластівчастій формі графітних включень ковкий чавун має досить високі міцність і пластичність, займаючи проміжне положення між сірим чавуном та сталлю. Однак, ковкий чавун має гірші ливарні властивості, ніж сірий, зокрема знижену рідкоплинність, більшу усадку, і як наслідок – підвищену схильність до утворення тріщин і усадочних раковин. Це викликає необхідність у податливій ливарній формі та масивних додатках в ливниковій системі.

Високоміцний чавун з кулястою формою графітних включень має знижені ливарні властивості, зокрема гіршу, ніж сірий чавун, рідкоплинність, підвищену усадку і, як наслідок, підвищену схильність до утворення дефектів ливарного походження, наприклад, усадочних раковин. Крім того, у виливках з високоміцного чавуну часто спостерігається зональна ліквідація включень сірчистого магнію MgS_2 , які утворюються в чавуні під час модифікування його магнієм. Незважаючи на це, високоміцний чавун широко використовується як конструкційний матеріал в сучасному машинобудуванні. З нього відливають важко навантажені і товстостінні деталі відповідального призначення: колінчасті вали для легкових і вантажних автомобілів, суден, прокатні валки, шестерні та інші деталі, що працюють в

умовах ударних навантажень. В сучасному машинобудуванні доведено можливість і економічну доцільність заміни сталевих виливків і поковок виливками з високоміцного чавуну.

Чавун з вермикулярним графітом має ливарні властивості на рівні сірого чавуну, а механічні – ковкого; і як конструкційний матеріал знаходить останнім часом широке використання в різних галузях машинобудування для виготовлення деталей, які зазнають значних статичних, динамічних і циклічних навантажень: головок блоків циліндрів, випускних колекторів, гальмівних дисків, колінчастих і розподільчих валів, зубчастих коліс тощо.

Сталь як ливарний матеріал застосовують для отримання виливків деталей, які разом з високою міцністю необхідно, щоб мали гарні пластичні властивості, були надійними та довговічними в експлуатації. На частку сталевих литва припадає близько 20% (за масою) від усіх виливків. Ливарні властивості сталей набагато гірші, ніж чавунів. Так, рідкоплинність вуглецевої сталі в середньому в два рази нижча рідкоплинності сірих чавунів (рідкоплинність підвищується із збільшенням вмісту вуглецю в сталі). Висока лінійна усадка (1.5...2.5%) сталі робить її дуже схильною до утворення тріщин, а висока об'ємна усадка, що може досягати 5...6% – до утворення усадочних раковин і усадочної пористості. Для попередження утворення дефектів усадочного походження необхідні великі добавки, об'єм яких може досягати 60% об'єму вилівки, що призводить до значного збільшення витрат металу. Це знижує коефіцієнт використання металу та підвищує собівартість деталей.

Сплави кольорових металів в структурі ливарного виробництва займають близько 5%. Цим сплавам притаманні деякі особливі фізико-хімічні, механічні та експлуатаційні властивості, що робить їх більш привабливими для використання в ряді галузей промисловості. Це, зокрема, такі властивості як висока корозійна стійкість (мідні сплави), висока питома міцність, яка визначається як відношення границі міцності матеріалу до його густини (алюмінієві, магнієві, титанові сплави).

Алюмінієві сплави серед ливарних сплавів кольорових металів знайшли найбільш широке застосування ($\approx 70\%$ від загального випуску кольорового литва) завдяки високій питомій міцності, технологічності та досить високим фізико-механічним та експлуатаційним властивостям.

Найкращі ливарні властивості мають сплави системи алюміній-кремній, так звані силуміни. Вони широко використовуються в автомобільній, авіаційній, приладо-, машино-, суднобудівній та електротехнічній промисловості. З них отримують виливки деталей складної конфігурації, що працюють за умов середніх та високих навантажень.

Сплави системи алюміній-мідь мають знижені ливарні властивості, низьку пластичність і корозійну стійкість, але добре оброблюються різанням. Схильні до утворення усадочних раковин і усадочної пористості. Мо-

жуть витримувати значні навантаження, зокрема за підвищених температур. Основна галузь використання – літакобудування.

Складні алюмінієві сплави, що містять мідь і кремній, мають високу рідкоплинність, корозійну стійкість, добре зварюються. Їх застосовують для виготовлення корпусів різних приладів, поршнів для автомобільних і тракторних двигунів, деталей авіаційних двигунів.

Алюмінієво-магнієві сплави серед усіх ливарних алюмінієвих сплавів мають найвищі механічні властивості, знижену щільність, високу корозійну стійкість. Їх використовують для виготовлення виливків, що зазнають значних вібраційних навантажень або впливу морської води. Однак, ці сплави мають знижені ливарні властивості, тому виготовлення виливків з них викликає суттєві технологічні труднощі.

Мідні сплави після алюмінієвих займають друге місце в структурі виливків із сплавів кольорових металів ($\approx 25\%$). Переважно використовують латуні, олов'яні та безолов'яні бронзи.

Латуні – найбільш поширені мідні сплави, що відзначаються відносною дешевизною, високими механічними та технологічними властивостями. Для фасонного литва використовують, головним чином, багатокомпонентні латуні, які крім цинку можуть містити марганець, залізо, алюміній, свинець, кремній. Це латуні таких марок: ЛЦ40С, ЛЦ40Мц1,5, ЛЦ38Мц2С2, ЛЦ16К4 та ін. Більшість з них мають високу рідкоплинність, оброблюваність різанням, зварність, корозійну стійкість, добрі антифрикційні властивості. Вони знаходять широке використання в суднобудуванні, для виготовлення деталей запірної арматури, що працює в прісній воді, деталей вузлів тертя тощо.

Олов'яні бронзи широко застосовують для виготовлення литої запірної арматури, підшипників, зубчастих коліс, втулок, що працюють в умовах інтенсивного зношування, підвищеного тиску води та пари. Вони мають гарні ливарні властивості, що дозволяє отримувати складні за конфігурацією виливки. Це такі бронзи як Бр08Ц4, БрО10Ф1, БрОЗЦ12С5, БрО10С10, БрО5С25 та інші.

Безолов'яні бронзи за деякими властивостями перевершують олов'яні і з успіхом можуть бути використані як замітники останніх. Вони мають більш високі механічні, корозійні та антифрикційні властивості. Однак їх ливарні властивості гірші: нижча рідкоплинність, вища схильність до окислення, значна лінійна усадка ($2.0...3.0\%$). З них виготовляють арматуру, зокрема для морської води, антифрикційні деталі, деталі для хімічної та харчової промисловості тощо. Це бронзи марок БрА9Мц2Л, БрА10Ж4Н4Л, БрА10Ж3Мц, БрС30, БрА9Ж4Н4МЦ та інші.

Магнієві сплави для фасонного лиття розроблено на базі систем $Mg - Al - Zn$, $Mg - Zn - Zr$, $Mg - Nd$. Характерною особливістю цих сплавів є їх висока питома міцність, що і визначає основну галузь застосування – аерокосмічна промисловість. Із ливарних магнієвих сплавів виготовляють

колеса, шасі літаків, корпуси насосів і приладів. Недоліком цих сплавів є легка окислюваність в процесі виробництва виливків. Для запобігання за-палювання магнієвого сплаву під час стикання з повітрям у процесі зали-вання струмінь металу опиляють порошком сірки.

Титанові сплави відзначаються малою густиною, високими пито-мою міцністю, фізико-механічними властивостями та корозійною стійкіс-тю. Вони мають високу рідкоплинність, малосхильні до утворення гарячих тріщин і концентрованих усадочних раковин. Однак виготовлення вилив-ків з титанових сплавів викликає значні технологічні труднощі, зумовлені активною взаємодією рідкого розплаву зі всіма матеріалами, що викорис-товуються для виготовлення ливарних форм. Задовільним матеріалом у цьому відношенні є графіт і в сучасному ливарному виробництві форми виготовляють, як правило, з його використанням.

2.3 ЛИВАРНІ ФОРМИ

За терміном служби ливарні форми поділяються на разові та багато-разові.

Разові форми поділяються на піщано-глинисті, оболонкові та фор-ми, виготовлені за моделями, що витоплюються або газифікуються. Такі форми придатні для виготовлення тільки одного виливка, після чого форма руйнується і для отримання наступного виливка потрібне виготовлення нової форми.

Багаторазові форми придатні для виготовлення багатьох – до со-тень і навіть тисяч виливків. Їх після затверднення металу не руйнують, а розкривають для видалення готового виливка і використовують повторно після відповідної підготовки. До багаторазових форм відносяться, перева-жно, металеві форми а до способів лиття в такі форми – лиття в кокіль, відцентрове лиття та лиття під тиском.

Лиття в разові форми

Більшість фасонних виливків в машинобудуванні виготовляють в разових формах, до яких відносяться піщано-глинисті, оболонкові та фор-ми, що виготовляються за моделями, що витоплюються або газифікуються. Їх виготовляють з піщано-глинистих або піщано-смоляних формових су-мішей.

Формові суміші виготовляють з формових матеріалів, до яких відно-сяться: кварцовий пісок, вогнетривка глина та спеціальні домішки. Пісок, основним компонентом (90...98%) якого є кварц (двооксид кремнію або кремнезем SiO_2) є основною складовою формових та стрижневих сумішей і забезпечує їм вогнетривкість і газопроникність. Глина є скріплювальним матеріалом і надає сумішам необхідну міцність та одночасно пластичність, але знижує газопроникність і податливість, а також утруднює вибивання стрижнів з виливка. Тому під час виготовлення стрижнів використовують суміші, до складу яких додають як скріплювачі замість глини різні орга-нічні та неорганічні матеріали: штучні смоли (формальдегідні, фенолфор-

мальдегідні та інші), декстрин (хімічно оброблений крохмаль), сульфітно-спиртову барду (виробляють із відходів паперово-целюлозної промисловості), патоку (мелясу), рідке скло (хімічна формула $R_2O \cdot SiO_2$, де R – натрій або калій) та ін.

До складу формових та стрижневих сумішей додають й інші матеріали, що забезпечують цим сумішам комплекс необхідних властивостей.

Вимоги до формових та стрижневих сумішей. Потрібно, щоб формові та стрижневі суміші мали такі властивості: вогнетривкість, пластичність, міцність, податливість, газопроникність, непригарність.

Вогнетривкість – здатність суміші тривалий час витримувати дію високих температур, не плавлячись і не розм'якаючи. Недостатня вогнетривкість викликає пригар на виливках. Забезпечує вогнетривкість кварцовий пісок.

Пластичність – здатність суміші точно відтворювати відбиток моделі або стрижневого ящика. Пластичність забезпечується наявністю в суміші глини.

Міцність – здатність ущільненої суміші протидіяти зовнішнім навантаженням (дії рідкого металу, який заповнює форму, транспортування форми тощо). Надають міцності скріплювачі.

Податливість – властивість суміші не чинити значного опору лінійній усадці металу в процесі охолодження виливка. Для підвищення податливості до формових та стрижневих сумішей додають тирсу, торф.

Газопроникність – властивість суміші пропускати гази, які утворюються під час заливання форми металом. Вона залежить від складу суміші.

Непригарність – властивість суміші не вступати в хімічну взаємодію з рідким металом і не утворювати на поверхні виливка пригар, який псує зовнішній вигляд виливка та затрудняє його механічну обробку. Для підвищення непригарності використовують графіт, пилоподібний кварц (маршаліт), кам'яновугільний порошок, деревновугільний пил, які додають до складу формових сумішей під час виготовлення сирих форм або на їх основі виготовляють фарби, до складу яких крім указаних домішок входять вода та рідке скло. Ними фарбують робочі поверхні сухих форм і стержнів.

2.3.1 Лиття в піщано-глинисті форми

Виготовлення форм

В загальному виробництві литих заготовок лиття в піщано-глинисті форми є найпоширенішим способом внаслідок його технологічної універсальності. Цей спосіб лиття економічно доцільний за будь-якого характеру виробництва, для деталей будь-яких мас, конфігурації, габаритів, для отримання виливків практично зі всіх ливарних сплавів. Собівартість виливків, отриманих цим способом, найнижча порівняно з іншими способами. Проте він має і низку недоліків: низьку точність (14...17 квалітети), ви-

соку шорсткість поверхні (1...3 клас), високі припуски на обробку, великі напуски, значні витрати формових матеріалів (5...7 т на тонну литва), незадовільні умови праці в ливарних цехах.

Для виготовлення піщано-глинистих форм потрібно мати формувальний інструмент (рис. 3) та модельно-опочний комплект, який складається з опок – рамок, в яких виконують формування (рис. 4, поз. 8 та 14) , штирів для центрування опок (рис. 4, поз. 6), моделей деталі та елементів ливникової системи, стрижневих ящиків, шаблонів для контролю розмірів форми та стрижнів.

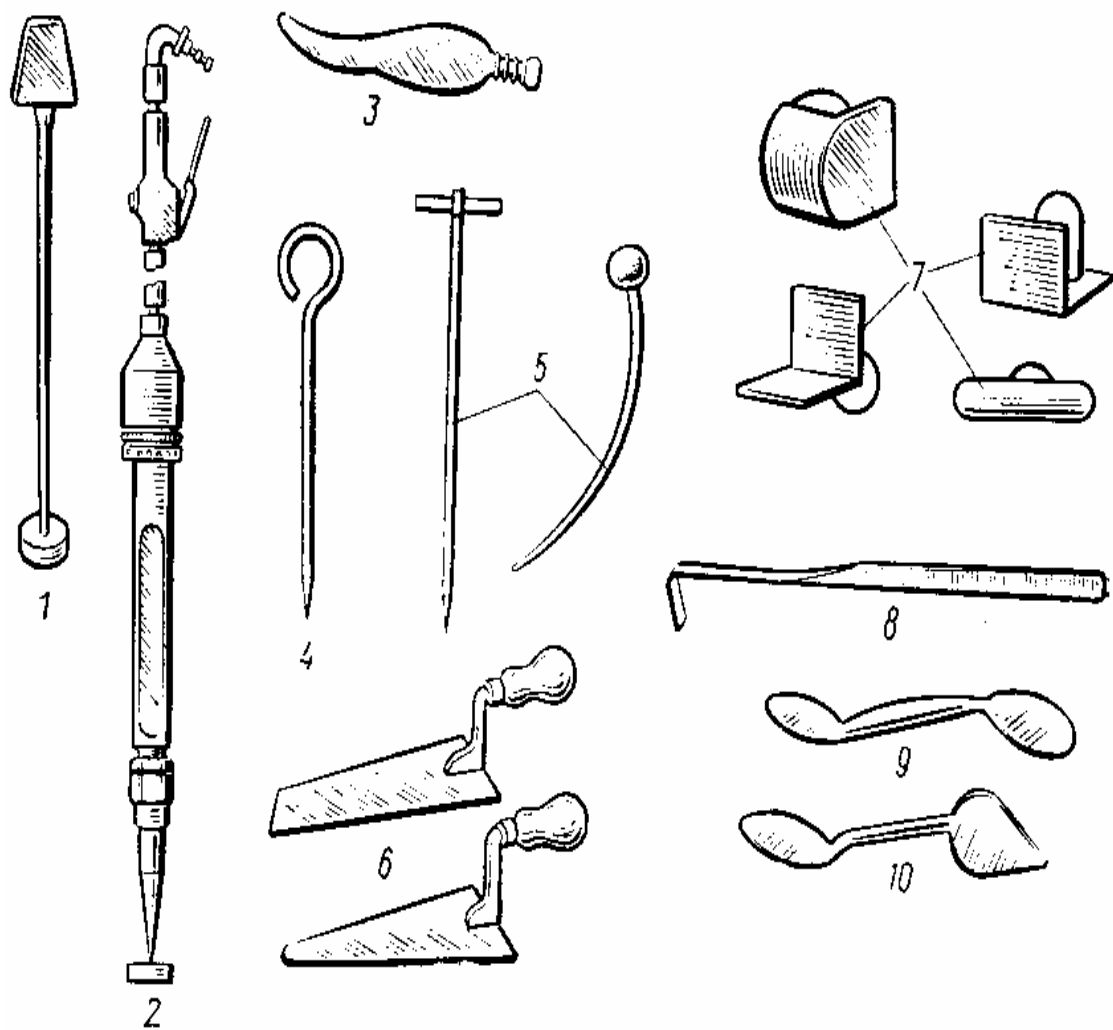


Рисунок 3 – Формувальний інструмент:

1, 2 – ручна та пневматичні трамбівки, 3 – квач для фарбування форми, 4 – підіймач для видалення моделі з форми, 5 – голки для вентиляції форми, 6, 7 – плоскі та фасонні гладилки, 8 – гачок, 9 – ложка, 10 – ланцет

Ливниковою системою називається система каналів для підведення рідкого металу до порожнини форми. До її складу входять ливникова чаша

або воронка, стояк, шлаковловлювач, живильники, випор (рис. 4). Стрижневі ящики потрібні для виготовлення стрижнів – елементів ливарної форми, за допомогою яких у деталі створюються отвори, порожнини. Модель має конфігурацію виливка, але розміри її більші на величину усадки металу. Модель може бути суцільною або рознімною залежно від зручності виймання її з форми і виготовлятися з дерева у разі одиничного або дрібно-серійного виробництва чи з металу (алюмінієвих сплавів, сірого чавуну) за великосерійного або масового виробництва.

Як приклад розглянемо виготовлення разової ливарної форми для виливання трійника (рис. 4, а). Модельний комплект у цьому випадку виготовлено з дерева і він складається з моделей деталі та елементів ливникової системи і одного стрижневого ящика.

Рознімна модель (рис. 4, б) складається з двох частин 2, що з'єднуються між собою по площині рознімання за допомогою шипів. Контур моделі точно відтворює зовнішній контур виливка.

Внутрішній контур (порожнина виливка) виконується стрижнем, який виготовляють із стрижневої суміші в стрижневому ящику (рис. 4, в). Після ущільнення суміші ящик розбирають, стрижень виймають, висушують і встановлюють у форму.

Виступаючі частини стрижня 1 називають *знаками*, які потрібні для встановлення стрижня у форму. Частини 2 (рис. 4, б) моделі, за допомогою яких у формі отримують відбитки стрижневих знаків, називають *знаковими*.

Для виготовлення форми нижню половину моделі деталі та моделі живильників 6 і 10 (рис. 4, з), призначених для подачі металу до порожнини форми, встановлюють на модельну плиту 7, потім ставлять опоку 8 (рис. 4, з).

Щоб формова суміш не прилипала до поверхонь моделі та плити, їх посипають сухим роздільним матеріалом – графітом або лікоподієм (лікоподій – це спори рослини плаун). В опоку спочатку насипають облицювальну формову суміш шаром 20...40 мм, потім – наповнювальну суміш, яка за міцністю поступається облицювальній, але має кращу газопроникність. В більшості випадків наповнювальна суміш – це відпрацьована суміш, тобто така, що була вже у використанні, без додавання до неї свіжих матеріалів.

Облицювальна ж суміш складається з 80...40% відпрацьованої суміші, решта – свіжі матеріали (пісок, глина, додаткові скріплювачі тощо).

В умовах масового виробництва, коли автоматизувати роздільну подачу двох сумішей важко, застосовують єдину формувальну суміш, яка за складом і властивостями наближається до облицювальної.

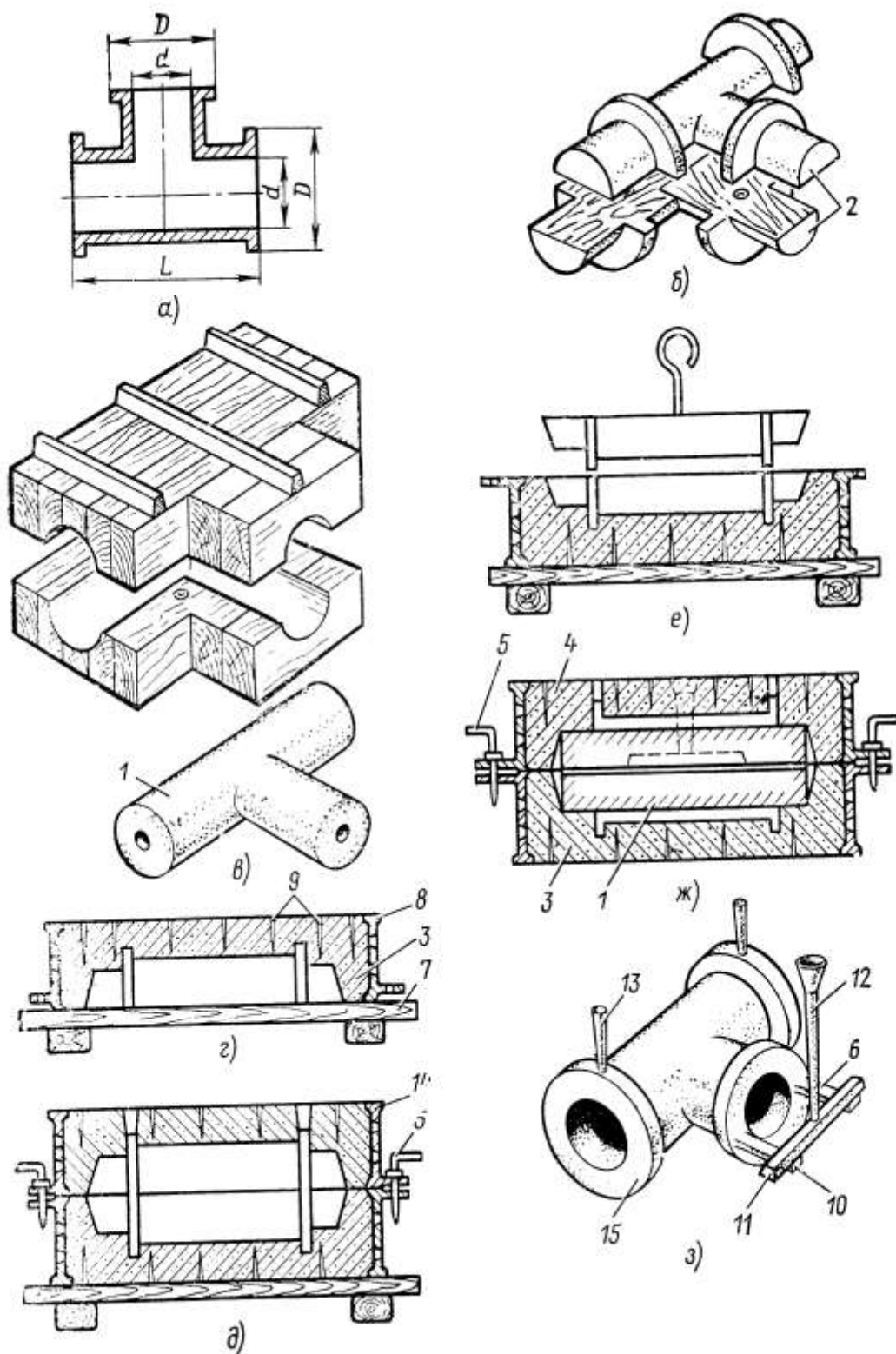


Рисунок 4 – Послідовність виготовлення разової піщано-глинистої форми

В опоці формувальну суміш ущільнюють, наколюють голкою вентиляційні канали 9 для виходу газів з форми під час заливання розплаву.

Потім нижню півформу 3 перевертають на 180° і на неї встановлюють верхню половину моделі деталі та моделі ливникової системи (рис. 4, з): шлакоуловлювача 11, стояка 12, випорів 13 (випори встановлюються на найвищому місці моделі для виходу газів з форми під час заливання її розплавом). Поверхню розніму форми та моделі посипають роздільним матеріалом, ставлять верхню опоку 14 по центрувальних штирях 5 (рис. 4, д). В опоку засипають формову суміш, ущільнюють, зайву суміш зчищають з поверхні опоки, наколюють вентиляційні канали і виймають моделі стояка та випорів. Потім опоки рознімають і виймають моделі деталі з півформ (рис. 4, е). Робочі порожнини півформ продувають для видалення частинок суміші, що випадково туди могли потрапити.

В нижню півформу встановлюють стрижень 1 (рис. 4, ж), верхню півформу ставлять на нижню, centruючи їх штирями 5. Півформи скріплюють скобами для запобігання витіканню металу по розтині форми.

Форму заливають розплавом через канали ливникової системи, витримують певний час для охолодження виливка. Потім форму руйнують, виливок 15 виймають, очищують від пригорівшої формувальної суміші, відокремлюють від нього ливникову систему, вибивають стрижень і піддають контролю: перевіряють геометричні розміри, наявність зовнішніх дефектів, якщо потрібно – герметичність, твердість тощо. В разі необхідності виливок піддають термічній обробці і направляють на обробку різанням.

Перераховані операції виготовлення ливарної форми можуть здійснюватись або вручну – в одиничному, дрібносерійному виробництві за дерев'яними моделями, або механізовано з використанням формувальних машин за металевими моделями. Формувальні машини механізують такі операції: наповнення опок формовою сумішшю, ущільнення суміші, видалення моделей із форми, складання і транспортування форм до місця заливання.

Машинне виготовлення форм полегшує працю формувальників, підвищує продуктивність праці й точність виливків на 2...3 квалітети порівняно з ручним формуванням, зменшує припуски на обробку, що економить 10...15% металу, забезпечує виготовлення взаємозамінних деталей.

Заливання форм

Після виготовлення форми заливають розплавом певної температури: сталлю - $1390...1550^\circ\text{C}$, чавуном - $1220...1400$, бронзою - $1050...1200$, силуміном - $690...730^\circ\text{C}$ (нижня границя для великих товстостінних виливків, верхня - для дрібних тонкостінних). Заливання здійснюється розливними ковшами, футерованими зсередини вогнетривом, так, щоб струмінь металу не переривався а ливникова чаша весь час була заповнена металом.

Вибивання виливків із форми і стрижнів із виливка

Після повного затверднення металу і достатнього охолодження виливка форми руйнують і виливки разом з ливниковою системою виймають із форми. Ця операція називається вибиванням виливків. Вона досить трудомістка, супроводжується значним виділенням пилу, газів і теплоти. Зазвичай вибивання виливків здійснюється на вібраційних решітках, які роблять близько 1500 коливань за хвилину з амплітудою 5...10 мм. Суміш крізь решітку сиплеться на конвеєр, а виливок залишається на решітці. Конвеєром суміш подається у відділення для її регенерації і повторного використання.

Стрижні з виливків вибивають вручну або використовують пневматичні вібраційні машини, в яких виливок струшується і стрижнева суміш з нього видаляється. Великі стрижні вимивають з виливка струменем води, використовуючи гідравлічні установки. Водночас значно підвищується продуктивність праці та покращуються умови роботи.

Обрубкування й очищення виливків

Операція відокремлення ливникової системи від виливків називається обрубкуванням. Обрубкують ливникову систему у дрібних чавунних виливках вручну молотком або ковадлом. В сталевих виливках і виливках з кольорових металів, а також у разі додатків великих чавунних виливків відрізання виконують дисковими або стрічковими пилами. Від сталевих виливків ливникову систему і додатки відокремлюють також газокисневим різанням. Заливи, задирки, нерівності поверхні обрубкують пневматичним зубилом або зачищають абразивним кругом.

Після обрубкування виливки очищають від пригару. В одиничному виробництві це роблять сталевими щітками, ручними або пневматичними зубилами, у серійному – в обертових барабанах із зірочками з білого чавуну (дрібні виливки з чорних металів), у дробоструминних і дробометальних апаратах – сильним струменем води з піском. Пригар із поверхні виливків кольорових металів видаляють хімічним травленням.

Контроль якості виливків

Контроль виливків здійснюється з метою визначення наявності на них дефектів, які свідчили б про неможливість подальшого використання виливків, тобто дефектів, які є не виправними. Основними дефектами виливків є такі:

- *газові раковини* – бульбашки газів у тілі виливка. Утворюються за недостатньої газопроникності формової суміші або у разі дуже щільного заповнення форми;
- *піщані та шлакові раковини* – порожнини, заповнені формовою сумішшю або шлаком. Це наслідок слабкого набивання форми або поганої конструкції шлакоуловлювача;

- *усадовні раковини* – відкриті або закриті пустоти в тілі виливка. Утворюються у разі неправильної конструкції виливка або незадовільної ливникової системи;

- *холодні тріщини* – розриви тіла виливка значної довжини. Утворюються внаслідок неоднакової швидкості охолодження різних частин виливка;

- *гарячі тріщини* – розриви тіла виливка незначної довжини. Причина – недостатня податливість форми та стрижнів або недостатня витримка виливків у формі.

Газові та піщані раковини, а також відкриті усадовні раковини можуть бути виправлені заварюванням, якщо виливок буде працювати за великих навантажень, або забиванням замазками чи мастиками на невідповідальних виливках.

2.3.2 Лиття в оболонкові форми

Суть цього способу лиття полягає у використанні піщано-смоляних сумішей на основі високоміцних скріплювачів для створення міцних тонкостінних форм – оболонок. Як скріплювач піску використовується термоактивна фенолформальдегідна смола – *пульвербакеліт* в суміші з *уротропіном*, який додається для прискорення тверднення. Особливістю цієї смоли є те, що за її нагрівання, починаючи з температури 160...180 °C вона розплавляється і під час подальшої витримки за високої температури полімеризується та необоротно твердіє. Формова суміш складається з дрібнозернистого кварцового піску та 4...6% пульвербакеліту. Моделі та модельні плити виготовляють переважно з перлітного сірого чавуну. Моделі рознімні, складаються з двох частин, які закріплюються на окремих модельних плитах.

Оболонкові форми виготовляють у такій послідовності: на нагріту до 200...300 °C модельну плиту з закріпленими на ній половинами моделей деталі та елементів ливникової системи наносять роздільну речовину для попередження спікання формової суміші з модельною плитою після затверднення оболонки. Роздільною речовиною найчастіше є 3...4%-ний розчин каучуку СКТ в уайт-спириті. Наносять його пульверизатором одноразово на 25...50 оболонок. Модельну плиту закріплюють моделлю вниз над бункером з формовою сумішшю (рис. 5, а). Бункер разом з модельною плитою повертають на 180° (рис. 5, б) і витримують у такому положенні 15...20 с. За цей час від тепла металевої плити смола суміші в суміжному з плитою шарі розплавляється, внаслідок чого на модельній плиті утворюється напівтверда піщано-смоляна оболонка товщиною 5...8 мм. Потім бункер повертається у вихідне положення, формова суміш, що не прореагувала, падає на дно бункера (рис. 5, в), а плиту разом з оболонкою на кілька хвилин подають у піч з температурою 300...350 °C для остаточного тверднення оболонки. Тверду й міцну оболонку (півформу) знімають з модельної плити за допомогою виштовхувачів (рис. 5, г) і з'єднують з анало-

гічною другою половиною форми, вставивши між ними попередньо стрижень (рис. 5, а), який виготовляють за такою ж самою технологією в металевих стрижневих ящиках. Готові півформи склеюють і скріплюють механічно скобами або струбцинами. Скріплені форми встановлюють в металеві ящики, засипають навколо піском або чавунним дробом (рис. 5, б) і заливають металом. Під дією високої температури розплаву смола з формової і стрижневої суміші вигоряє, оболонка втрачає міцність і легко руйнується під час вибивання виливка, не залишаючи на його поверхні пригару.

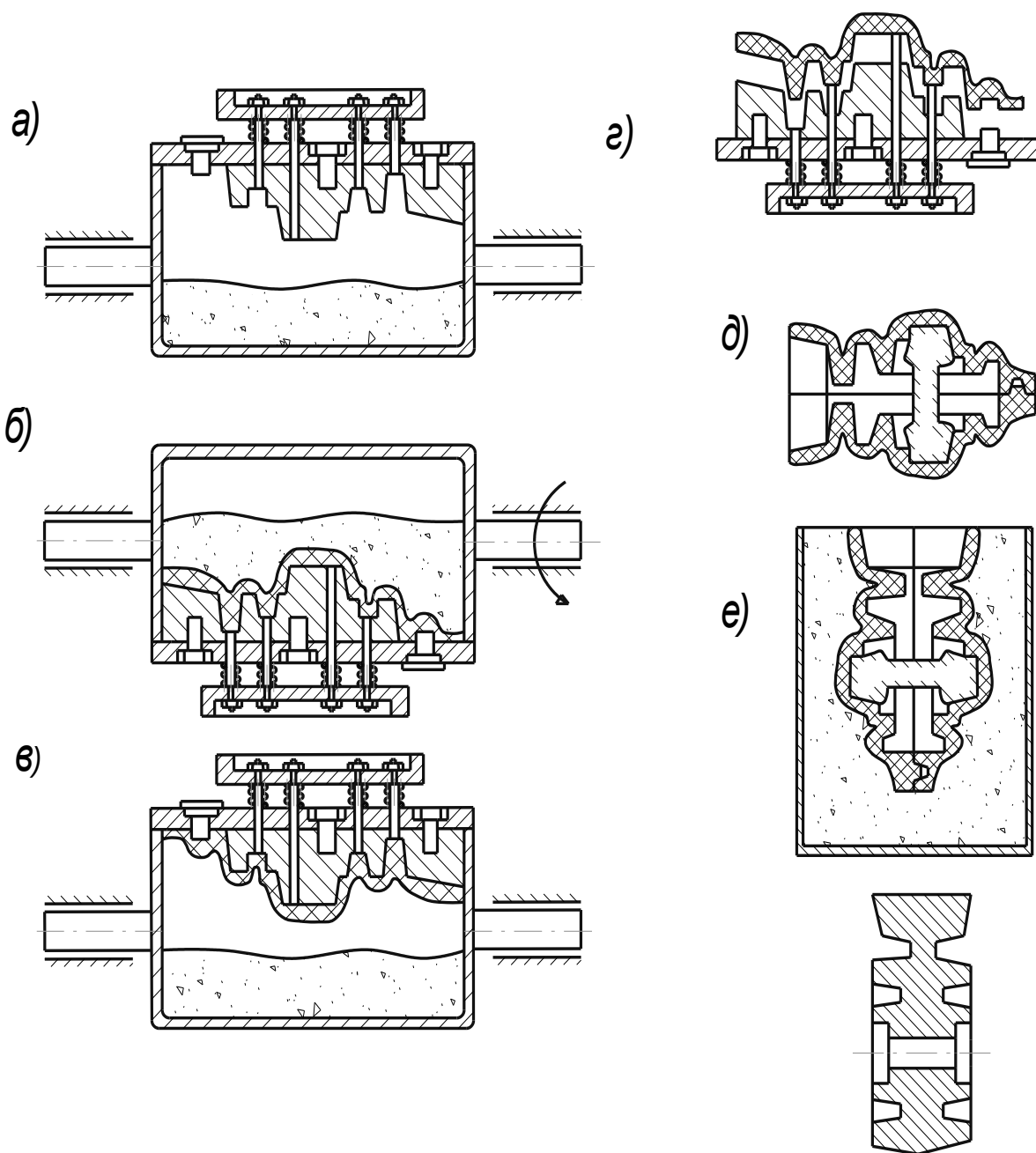


Рисунок 5 – Схема виготовлення виливків в оболонкових формах

Литтям в оболонкові форми отримують виливки підвищеної точності (12...14 квалітет), зі зниженою шорсткістю поверхні (3...5 клас), низькими припусками на обробку (на 50...60% нижчими, ніж за лиття в піщано-глинисті форми). Литтям в оболонкові форми виготовляють деталі відповідального призначення, наприклад ребристі циліндри для двигунів внутрішнього згорання з повітряним охолодженням, колінчасті вали для автомобілів, гільзи, зірочки ланцюгових передач, зубчасті колеса, деталі компресорів, тепловозів, суднових двигунів тощо з чавуну, сталі, кольорових металів і спеціальних сплавів.

Технологічний процес лиття в оболонкові форми механізований, а в багатьох випадках і автоматизований. Створено спеціальні машини для виготовлення оболонок, стрижнів, склеювання півформ, приготування формових сумішей. Незважаючи на безперечні позитивні якості оболонкових форм, застосування цього способу обмежене внаслідок складності технології, високої вартості оснастки, обладнання та матеріалів, зокрема, пульвербакеліту.

Лиття в оболонкові форми застосовують тільки в масовому та великосерійному виробництвах виливків масою до 120...150 кг. За більшої маси витрати пульвербакеліту зростають внаслідок необхідності більшої товщини оболонок, що робить цей процес економічно недоцільним.

2.2.3 Лиття у форми, виготовлені за моделями, що витоплюються

Суть цього способу лиття полягає в тому, що з модельної маси, до складу якої входять різні легкоплавкі матеріали (парафін, стеарин, церезин, торф'яний бітум, жирні кислоти, озокерит та ін.), виготовляють точні моделі виливків з ливниковою системою. Моделі покривають в декілька шарів (3...5) вогнетривкою керамічною суспензією, до складу якої входить вогнетривкий пилоподібний наповнювач – маршаліт (60...70%) і скріплювач – гідролізований розчин етилсилікату $[(C_2H_5O)_4Si]$ – 30...40%. Кожен такий шар обсипають кварцовим піском і підсушують. Потім з отриманої оболонки товщиною 4...6 мм модельну суміш витоплюють. Утворюється точна нерознімна форма. Відсутність розтину форми та стрижнів дозволяє підвищити точність виливків до 11...12 квалітетів, а застосування дрібнозернистого матеріалу у вогнетривкому покритті підвищує клас шорсткості до 5...6.

Оболонки встановлюють в металеві ящики, обсипають навколо сухим кварцовим піском, прожарюють їх за температури 900 °C 2...3 години і в гарячому стані заливають розплавом. Це дозволяє підвищити рідкоплинність металу і отримувати точні, тонкостінні, складної форми виливки з низькими припусками на обробку з будь-якого сплаву.

Технологічний процес виготовлення виливків за моделями, що витоплюються, складається з кількох етапів (рис. 6).

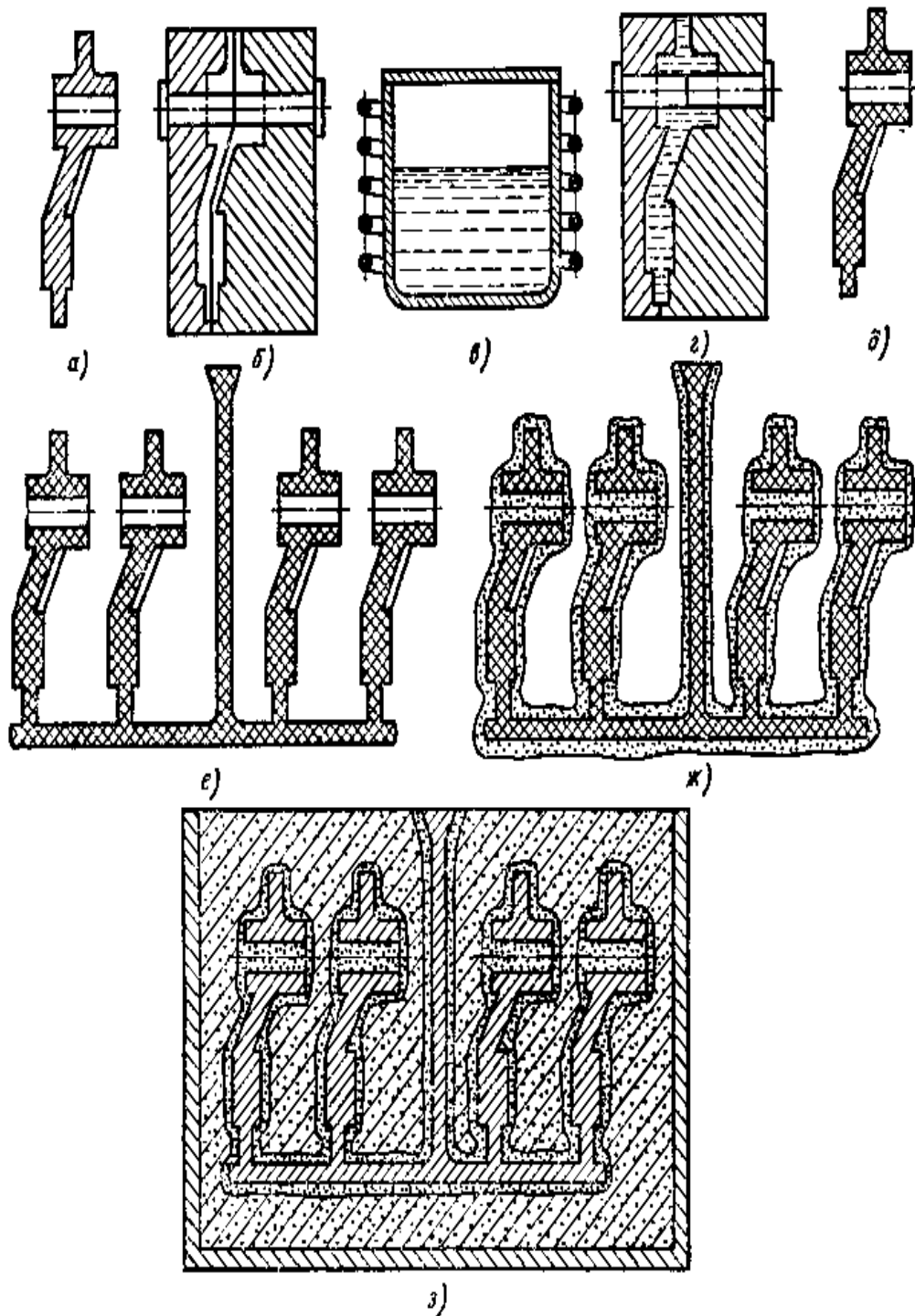


Рисунок 6 – Послідовність виготовлення виливків за моделями, що витоплюються

1. Виготовлення прес-форми. Для отримання легкоплавкої моделі прес-форму (рис. 6, б) виготовляють обробкою різанням або литтям з наступною доводкою із сталі, алюмінієвих сплавів, епоксидних смол, гуми тощо.

2. Виготовлення моделей. Легкоплавкі моделі виготовляють із модельної маси, що знаходиться в розплавленому стані в посудині, яка безпе-

первно підігрівається (рис.6, в). З неї модельну масу запресовують у прес-форму, яка охолоджується водою для прискорення тверднення моделей (рис. 6, г). З прес-форми моделі виймаються (рис. 6, д) і складаються в модельні блоки: кілька моделей приєднують до однієї ливникової системи з утворенням блока моделей (рис. 6, е).

3. Покриття моделей вогнетривкою оболонкою. Вогнетривка оболонка має бути міцною, податливою, газопроникною, хімічно інертною відносно рідкого металу та легко руйнуватися після затверднення виливка. Вогнетривку масу готують з гідролізованого розчину етилсилікату та пилувидного кварцу – маршаліту у вигляді суспензії. Дорогий та дефіцитний етилсилікат у деяких випадках може бути замінений на рідке скло. Покриття на модельний блок наносять зануренням блока у суспензію з наступним обсипанням його прожареним піском. Покриття виконують у 3...5 шарів. Кожний шар підсушують на повітрі 2...2.5 год або 20 хв в середовищі аміаку (NH_3), що скорочує цикл виготовлення виливків. Модельний блок, покритий вогнетривкою оболонкою, показано на (рис. 6, ж).

4. Видалення модельної суміші з оболонки найчастіше здійснюють у ванні з гарячою водою (80...90 °С) протягом кількох хвилин. Розплавлена модельна суміш спливає на поверхню ванни і періодично зчищається для повторного використання після регенерації. Оболонки після виймання їх з ванни промивають чистою водою і висушують на повітрі протягом 8...10 год або в сушильних шафах за температури 200 °С протягом 1.5...2 год.

5. Формування оболонок (рис. 6, з). Висушені оболонки заформовують у металеві коробки-контейнери. Оболонку ставлять вертикально, отвір стояка закривають кришкою і засипають навколо сухим піском.

Підготовлені таким чином форми прожарюють за температури 900 °С протягом 2...3 год.

6. Заливання форм здійснюють відразу ж після виймання їх з печі. Після охолодження форм оболонка легко відокремлюється від поверхні виливка. Остаточне очищення виливка в отворах, щілинах тощо здійснюється хімічною обробкою в розчинах лугів ($NaOH$, KOH).

Лиття за моделями, що витоплюються, доцільно застосовувати в великосерійному та масовому виробництвах дрібних (переважно до 10 кг), але складних деталей з високими вимогами до точності розмірів і чистоти поверхні, особливо в тих випадках, коли механічна обробка потрібна тільки для спряжених поверхонь. Використання литих таким способом деталей замість штампованих дозволяє знизити витрати металу на 55...75%, трудомісткість механічної обробки – на 50...60% і собівартість деталей – на 20%.

Останнім часом використовують моделі, що випалюються (газифікуються). Їх виготовляють разом з ливниковою системою з пінополістиролу і покривають вогнетривкою оболонкою за такою самою технологією, як і у разі витоплювання. Рідкий метал під час заливання форми випалює ці моделі і одночасно заповнює порожнину форми.

Лиття в багаторазові форми

Багаторазові форми переважно виготовляють металевими і до цього способу лиття відноситься лиття в кокіль, відцентрове лиття та лиття під тиском.

2.3.4 Лиття в кокіль

Кокілем називається металева форма, в яку рідкий метал заливається вільним струменем під атмосферним тиском. Порівняно з разовими піщано-глинистими формами кокілі мають ряд переваг: значно скорочуються, а в багатьох випадках і зовсім виключаються формові суміші (вони потрібні тільки для виготовлення складних стержнів і для облицювання та футерування кокілів під час лиття чавуну та сталі); підвищується точність і чистота поверхні виливків; підвищується продуктивність праці; покращуються умови роботи працівників ливарного цеху; ливарні форми використовуються багато разів (у разі лиття сталі 300...500 разів, чавуну – до 5000, мідних сплавів – до 10000, алюмінієвих та магнієвих сплавів – до 100000, цинкових сплавів – до 500000 разів); підвищується можливість комплексної механізації і автоматизації технологічного процесу виготовлення виливків.

Разом з тим виготовлення виливків в кокілях має і свої труднощі: зниження рідкоплинності сплавів, внаслідок чого ускладнюється процес отримання тонкостінних, великих розмірів виливків; кокіль – форма неподатлива, і це викликає небезпеку появи ливарних дефектів у виливках (жолоблення, тріщини), особливо під час лиття металів з високою лінійною усадкою, наприклад сталі; висока вартість кокілів, складність і тривалість їх виготовлення; висока швидкість охолодження чавунних виливків викликає виникнення на їх поверхні вибілу, для усунення якого потрібна додаткова операція – відпал виливків, що подовжує виробничий цикл виготовлення виливків та підвищує їх собівартість; низька стійкість кокілів під час лиття чорних металів – чавуну та сталі внаслідок високої температури заливання цих розплавів.

Кокілі застосовують переважно для виготовлення дрібних і середніх за розмірами виливків з кольорових металів.

За конструкцією кокілі бувають нерознімними або витрушуваними (рис. 7, а) та рознімними з вертикальним (рис. 7, г), горизонтальним (рис. 7, в) або складним розняттям (рис. 7, б).

Нерознімні суцільні кокілі застосовуються для простих виливків. На рис. 7, а) показано такий кокіль 2. Порожнина виливка виконуються піщаним стрижнем 1. Складний кокіль може мати кілька поверхонь рознімання. Кокіль, показаний на рис. 7, б), складається з основи 1 та двох бічних частин 2 і 3. Ливникову систему виконують разом із стрижнем 4.

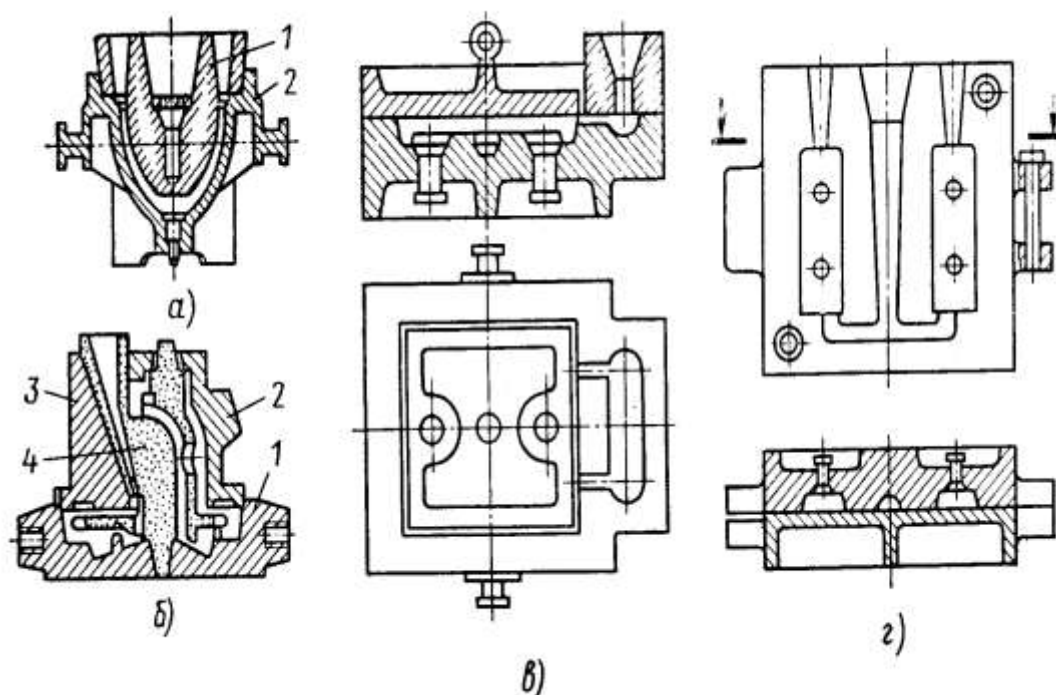


Рисунок 7 – Схеми різних конструкцій коків

Піщані стрижні застосовують для утворення складних порожнин у виливках і там, де потрібна більш висока податливість. В багатьох випадках стрижні також роблять металевими. Вони забезпечують отримання чистої поверхні та точних розмірів. Складні металеві стрижні для зручності виймання їх з виливка зазвичай роблять складеними. Наприклад до таких відноситься внутрішній стрижень для поршня автомобільного двигуна (рис. 8). Цей стрижень складається з трьох частин: однієї внутрішньої 1 (клиноподібної) та двох бічних 2.

Для захисту поверхні кокілю від дії розплаву, регулювання швидкості охолодження виливка та покращання заповнюваності форми на робочу поверхню кокілю, металевих стрижнів і ливникової системи наносять захисні покриття. Їх складають із кількох компонентів, кожний з яких має певне призначення: є розчинником (зазвичай вода), скріплювачем (рідке скло), наповнювачем (пилоподібний кварц, графіт, тальк, азбест). Змінюючи теплопровідність покриття внесенням до його складу речовин з різною теплопровідністю і змінюючи товщину його шару, можна регулювати швидкість охолодження розплаву, залитого у форму, тобто керувати, до певної міри, швидкістю кристалізації і наступним охолодженням виливка. Це має велике значення під час виготовлення виливків з чавуну, схильного до вибілу у разі збільшення швидкості охолодження. На товщину вибіленого шару впливає також і температура форми. Чим вона вища перед заливанням, тим менша глибина вибіленого шару. Зазвичай температура нагрівання коків перед заливанням чавуну має бути в межах 150...350 °C. Практично така сама температура нагрівання коків застосовується і під час лиття сталі.

Через низьку стійкість кокілів під час лиття чорних металів застосовуються кокілі переважно для лиття сплавів з кольорових металів – мідних, алюмінієвих, магнієвих, цинкових.

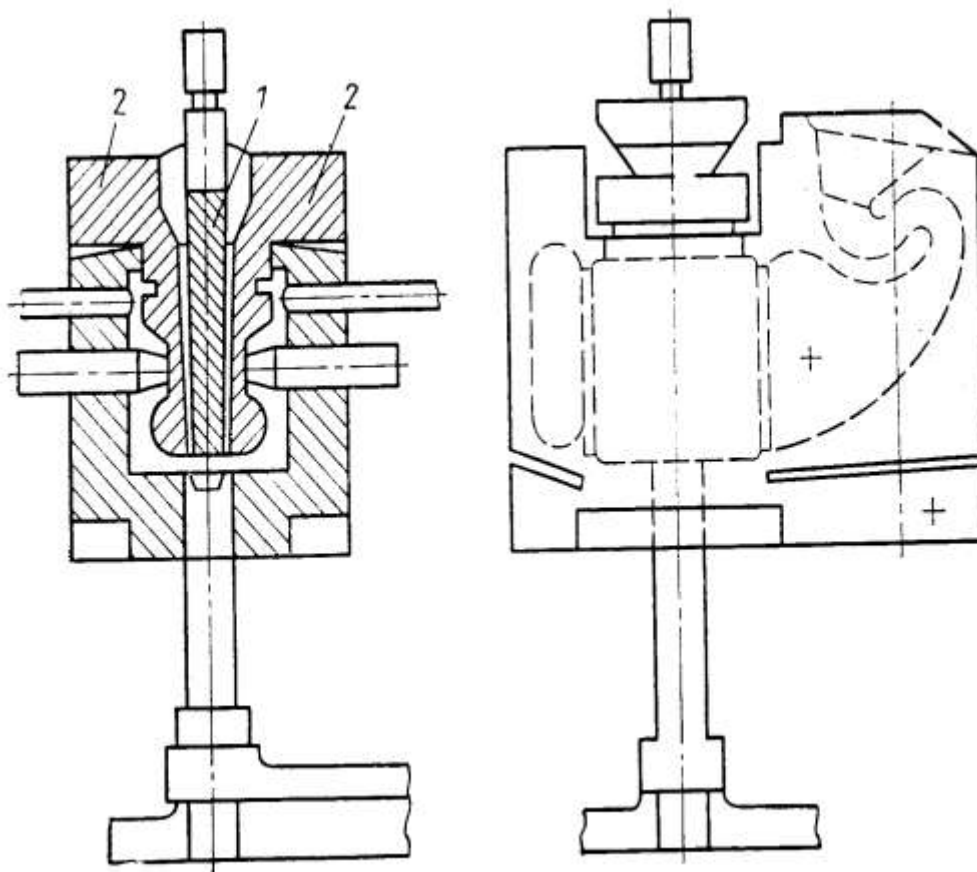


Рисунок 8 – Кокіль для алюмінієвих поршнів

2.3.5 Відцентрове лиття

Спосіб відцентрового лиття полягає в тому, що розплав заливається у форму, зазвичай металеву, яка обертається з певною швидкістю. Заповнення форми і кристалізація металу відбуваються під дією відцентрових сил, завдяки чому з розплаву видаляються гази та неметалеві домішки, які, через свою значно меншу густину порівняно з металом, зосереджуються на внутрішній поверхні виливка і потім видаляються під час обробки різанням.

Відцентровий спосіб лиття здійснюється за двома схемами. За першою відцентрову силу використовують для утворення порожнини виливка, який приймає форму циліндра. Вісь виливка збігається з віссю обертання форми. Таким чином, утворюються виливки циліндричної форми з отвором певного діаметра (втулки, труби). Вісь обертання форми може бути як горизонтальною (рис. 9, а, в), так і вертикальною (рис. 9, б).

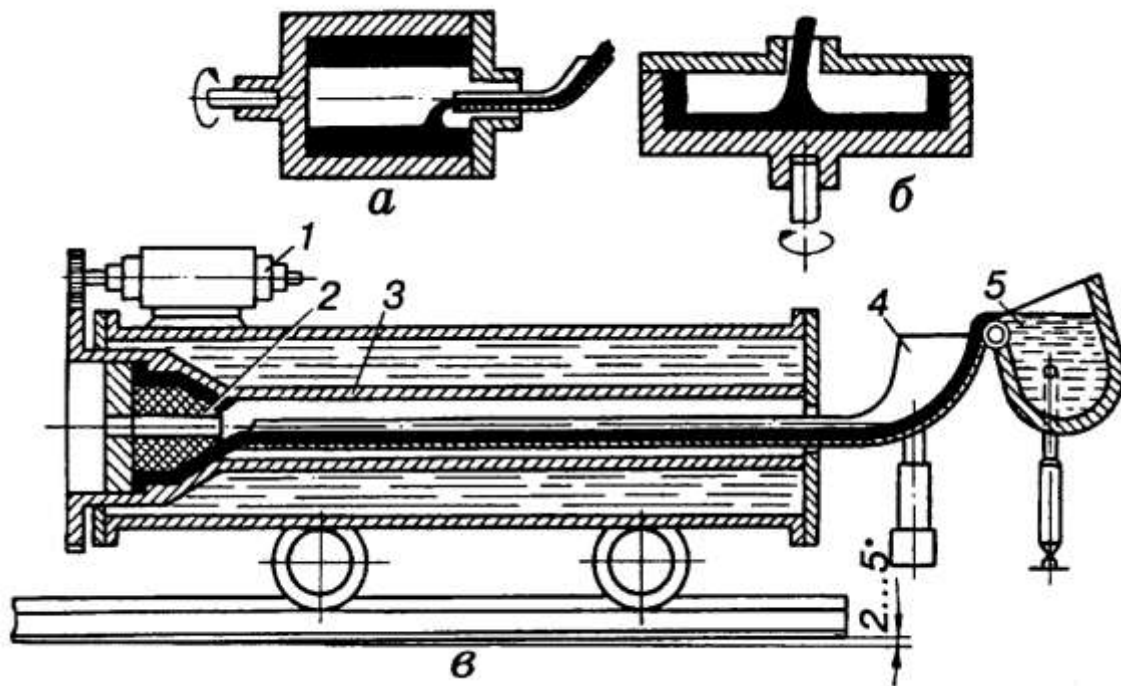


Рисунок 9 – Схеми відцентрового лиття

Другу схему – центрифугування – застосовують для лиття фасонних виливків. Відцентрову силу використовують тільки для заповнення форми розплавом і кристалізації металу. Ливарна форма виготовляється з формової суміші або є оболонковою. На рис. 10 показано схему такої машини з вертикальною віссю обертання.

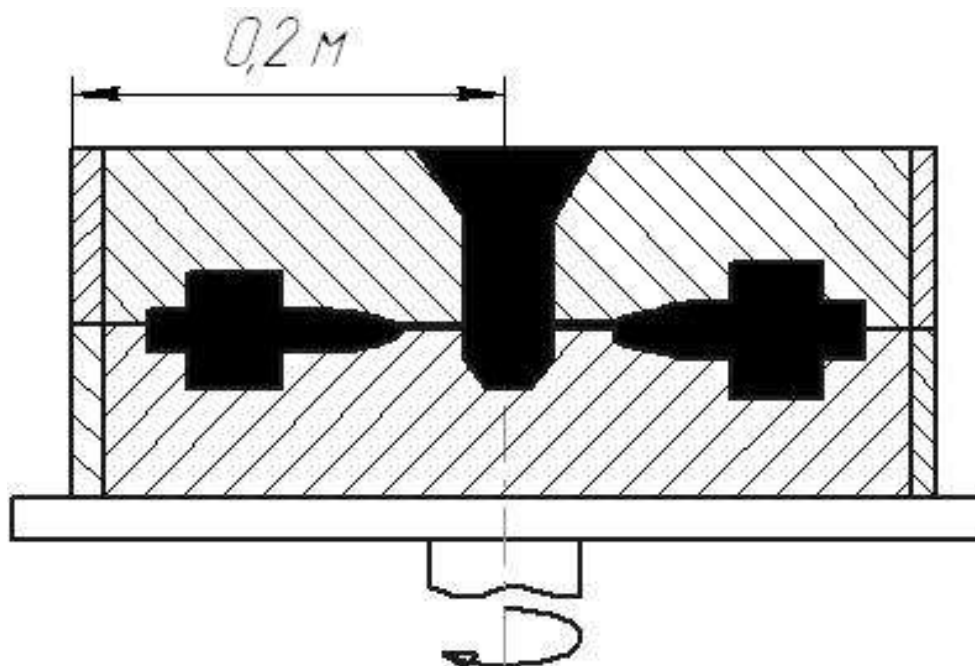


Рисунок 10 – Схема лиття центрифугуванням

Частоту обертання форми рекомендується визначати за формулою:

$$n = \frac{5520}{\sqrt{\rho \cdot r_2}},$$

де 5520 – коефіцієнт, постійний для всіх сплавів;

ρ – густина металу, $г/см^3$;

r_2 – внутрішній радіус циліндра, $м$.

Частоту обертання форм під час лиття фасонних виливків центрифугуванням можна визначити за формулою:

$$n = v \cdot 30 / (\pi r),$$

де v – колова швидкість точки вилівка, найбільш віддаленої від осі обертання, вважається такою, що дорівнює 3...5 $м/с$;

r – відстань від осі обертання до найбільш віддаленої точки вилівка, $м$.

2.3.6 Лиття під тиском

Суть цього способу лиття полягає в тому, що розплав вводиться в прес-форму, зазвичай металеву, під тиском. Заповнення форми під примусовим тиском підвищує рідкоплинність металу і виливок з такою точністю відтворює всі контури форми, що необхідність у обробці різанням заготовки повністю виключається або зводиться до мінімуму. До переваг лиття під тиском відноситься також висока якість поверхні вилівка, скорочення виробничого циклу, зниження трудомісткості і собівартості виливків, покращання умов праці, економія металу.

Поряд з перевагами лиття під тиском має і суттєві недоліки: висока вартість обладнання і прес-форм, що робить цей спосіб економічно доцільним тільки для дуже великих серій виливків; можливість отримання виливків тільки з легкоплавких сплавів – алюмінієвих, магнієвих, цинкових, обмежено – мідних, зокрема, латуней; підвищена небезпека утворення у виливках газової пористості внаслідок надто високої швидкості заповнення форми і неможливості виходу повітря з порожнини форми за цей короткий період.

Лиття під тиском здійснюється кількома способами:

1. Під тиском поршня 1 з «холодної» камери пресування 2 (рис. 11) розплав, який заливається в камеру мірною ложкою, подається в порожнину прес-форми 3 (рис. 11, б). Після витримки до повного затвердіння металу (кілька секунд) прес-форма розкривається (рис. 11, в) і виливок виштовхується з неї штовхачами 4 (рис. 11, г).

2. Під невеликим тиском повітря чи інертного газу (рис. 12, а). Таким способом ллють легкоплавкі сплави: цинкові, олов'яні, свинцево-сурм'яні. Стиснуте повітря чи інертний газ по трубопроводу 1 подається в тигель 2 і тисне на розплав, витісняючи його по металопроводу 3 через мундштук 4 в прес-форму 5.

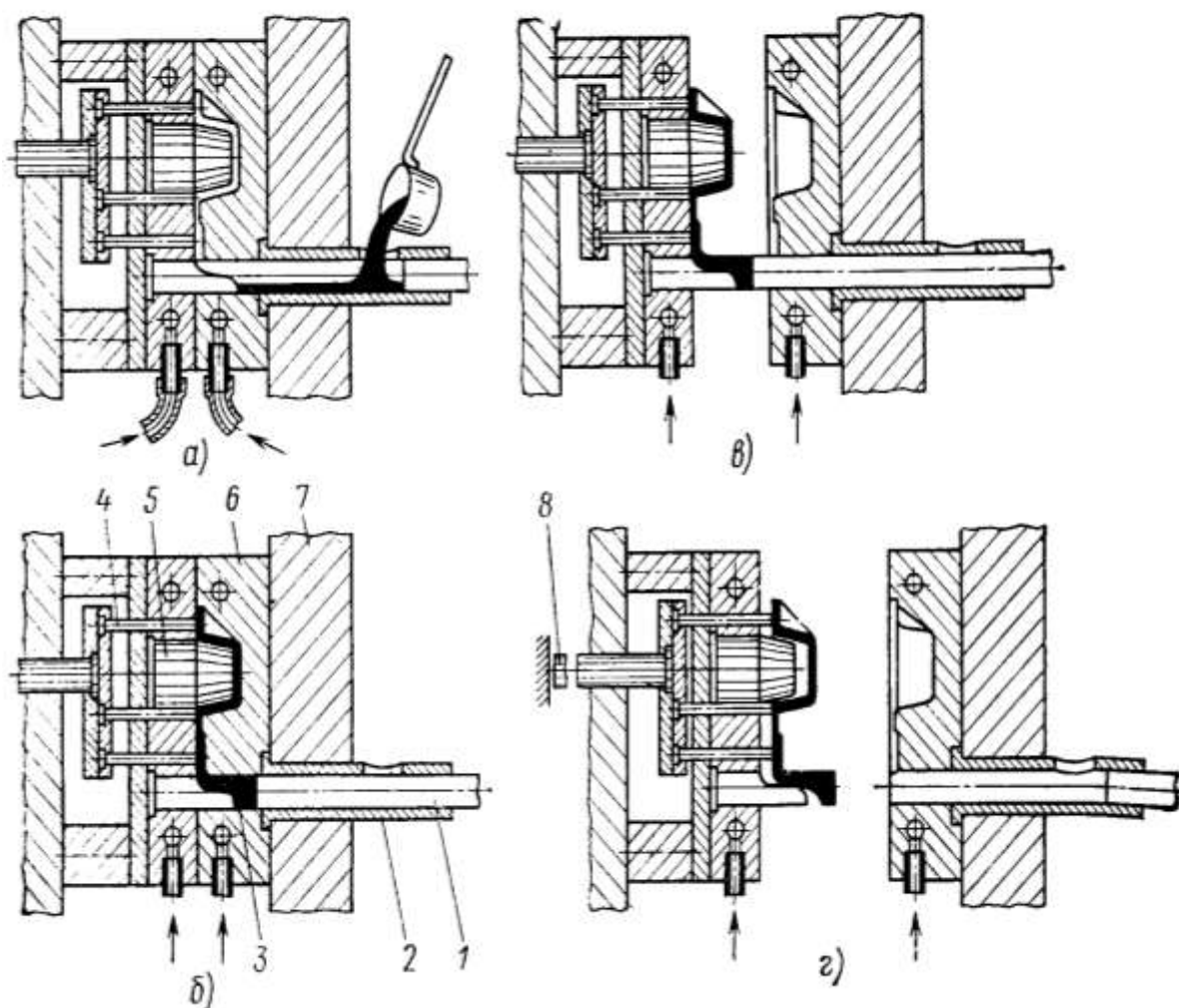


Рисунок 11 – Схема процесу лиття під тиском на машині з холодною камерою пресування

3. Під тиском поршня 3 (рис. 12, б), коли камера пресування 2 знаходиться в тиглі 1 з розплавом (лиття на машинах з «гарячою» камерою пресування). Рідкий метал з тигля до камери пресування надходить через отвір 4.

4. Під низьким тиском (рис. 12, в). Суть цього способу полягає в тому, що розплав з роздавальної печі 1 під тиском повітря чи іншого газу піднімається по металопроводу 4 у форму 5 (зазвичай металеву), встановлену на кришці 3 печі. Після тверднення виливка тиск у тиглі 2 знімають, залишки розплаву з металопроводу зливаються в тигель. Внутрішня порожнина виливка виконується стрижнем 6. Під низьким тиском можна заливати також і звичайні піщано-глинисті форми.

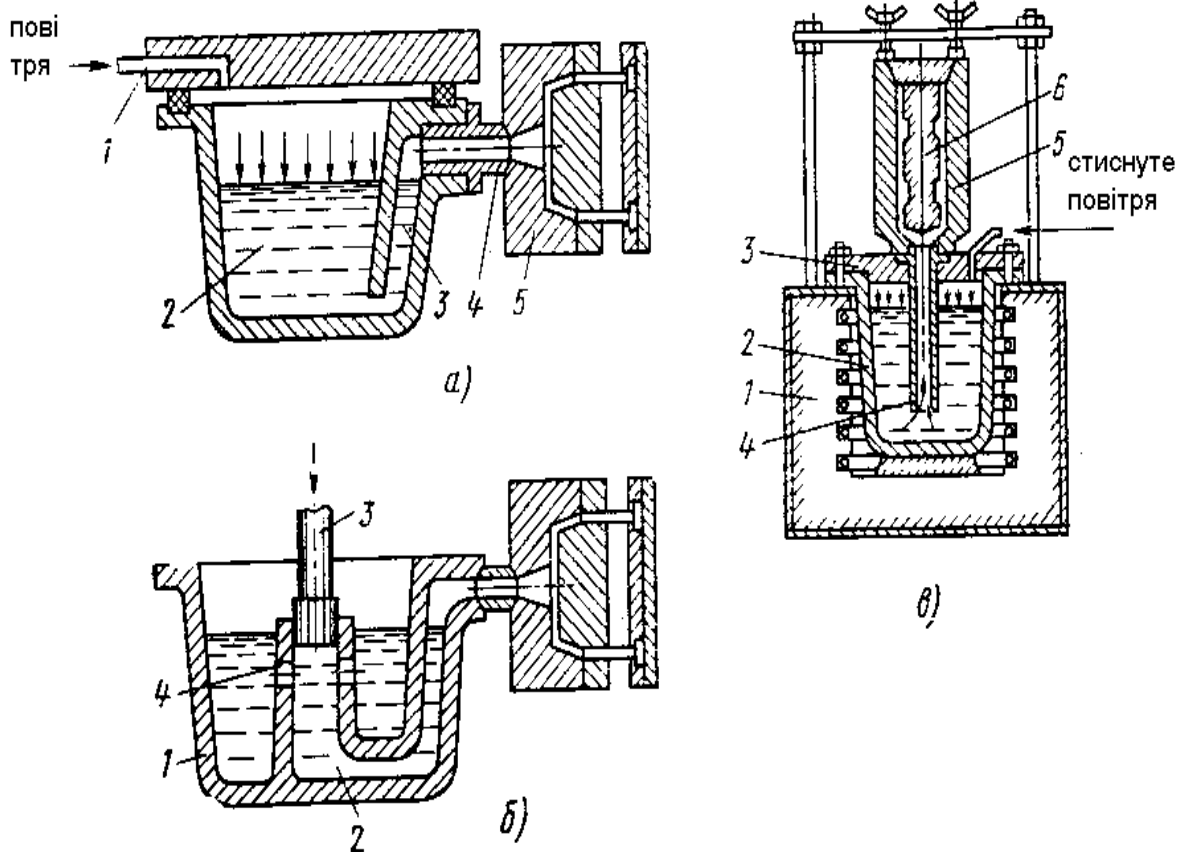


Рисунок 12 – Способи лиття під тиском

2.4 ПЛАВКА МЕТАЛУ В ЛИВАРНИХ ЦЕХАХ

2.4.1 Плавка сталі

В ливарних цехах сталь виплавляють в електричних дугових або індукційних печах, схеми яких наведено на рисунках 17 та 18 першої частини цього підручника.

2.4.2 Плавка чавуну

Найбільш поширеним агрегатом для плавки чавуну в ливарних цехах є *вагранка*. Це циліндрична шахтна піч, шихтою для якої є металева частина, флюси та паливо. Металева частина шихти складається з 30...40% доменного ливарного чавуну, 40...60% відходів власного виробництва та чавунного брухту, 0...20% сталевих брухту і 0...10% феросплавів. Флюсом переважно є вапняк, а паливом – кокс.

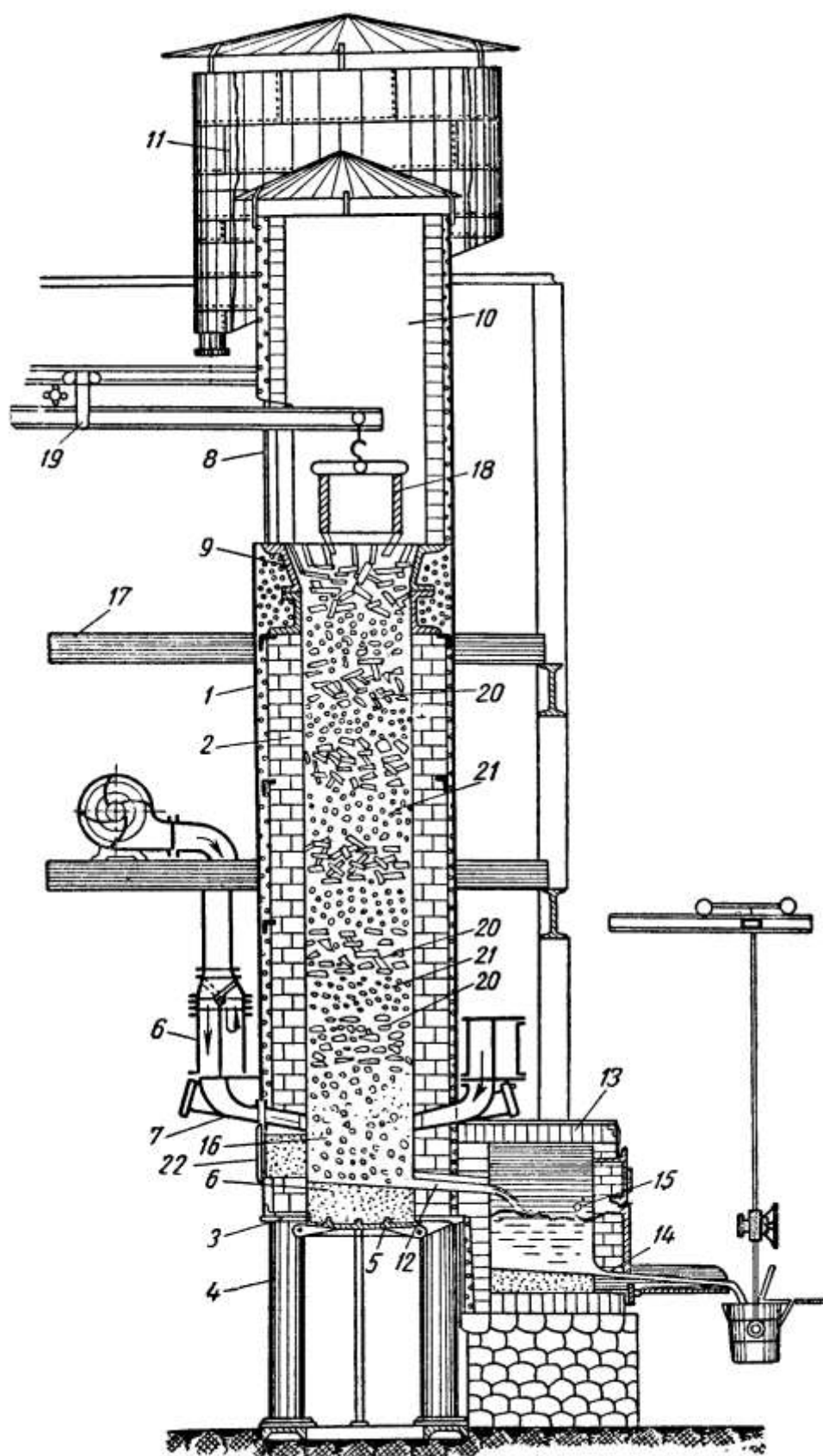


Рисунок 13 – Схема вагранки

На рис. 13 наведено схему вагранки. Кожух шахти 1 зварено з листової сталі і зсередини футеровано вогнетривкою цеглою 2. Шахта спирається на опорну плиту 3, закріплену на чотирьох колонах 4. Крізь вікно 22 (на схемі показано замурованим) на плиту 3 наносять шар вогнетривкої суміші, утворюючи дно шахти. Зверху вагранка закінчується трубою 10 з іскроуловлювачем 11, який уловлює розжарені частинки палива, відокремлюючи їх від вихідних газів. Шахту завантажують шихтою крізь вікно 8. На рівні вікна шахта футерована чавунною цеглою 9 для запобігання руйнування цегляної кладки шахти від ударів шихти. Розплавлений чавун і шлак крізь отвір 12 стікають до накопичувача 13, де вони збираються і відстоюються. Звідси чавун випускають крізь чавунну льотку 14, а шлак – крізь шлакову льотку 15. Якщо вагранка без накопичувача, то рідкий чавун і шлак збираються в горні вагранки. Повітря для горіння палива подається з кільцевого повітропроводу 6 крізь отвори-фурми 7. Шахту безперервно поповнюють певними порціями (так званими *колошами*) шихтових матеріалів за допомогою цебра 18 і консольного крана 19. Нижня частина вагранки заповнена паливом 16. Ця частина палива називається холостою колошою. На холосту колошу завантажують металеву колошу 20, потім паливну колошу 21, на неї засипають флюс, потім знову метал і т. д. В процесі плавки вагранка повністю завантажена матеріалом. Вагранки будують продуктивністю від 0.5 до 30 *т/год*.

Чавун в ливарних цехах виплавляють також в електричних дугових та індукційних печах. Часто застосовують так званий дуплекс-процес, який полягає в тому, що спочатку чавун розплавляють у вагранці, а потім доводять до потрібної температури в електричній печі.

2.4.3 Плавка мідних сплавів

Для плавки мідних сплавів застосовують кілька типів плавильних печей: тигельні, полум'яні, електричні – дугові та індукційні.

Стаціонарні тигельні печі (горни) (рис. 14, *а*) застосовують у разі плавлення невеликих об'ємів металу, який знаходиться у графітовому тиглі. Паливом є мазут або газ.

В дугових електричних печах (рис. 14, *б*) метал розплавляється від тепла електричної дуги, що горить між двома графітовими електродами 1 в робочому просторі печі.

Індукційна піч з металевим сердечником 1 (рис. 14, *в*) може працювати тільки за наявності кільця 2 з рідкого металу навкруги первинної котушки. Тому розплавлений метал виливають з печі не повністю. В частині металу, що залишилася, індукуються струми, завдяки яким і розплавляються шихтові матеріали, які завантажуються в піч. Ці печі застосовують у випадку безперервного виплавлення металу однієї марки.

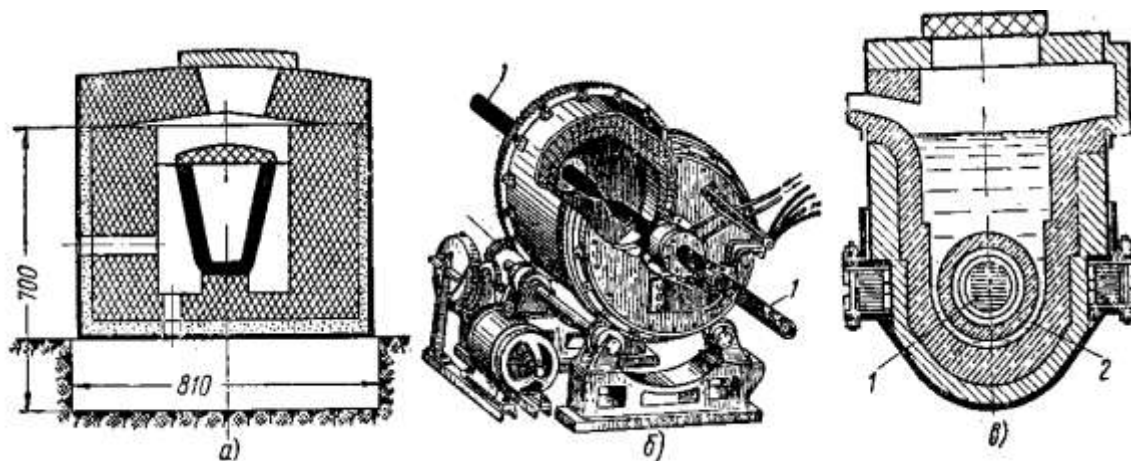


Рисунок 14 – Плавильні печі для плавки мідних сплавів

2.4.4 Плавка алюмінієвих сплавів

Алюмінієві сплави плавлять в плавильних печах, схеми яких наведено на рис. 15.

Поворотні тигельні горни з металевим тиглем (рис. 15, а), а також електричні тигельні горни опору стаціонарні та поворотні застосовують для приготування сплаву до 250 кг. Використовують також камерні печі опору місткістю до 1.5 т як стаціонарні, так і поворотні (рис. 15, б).

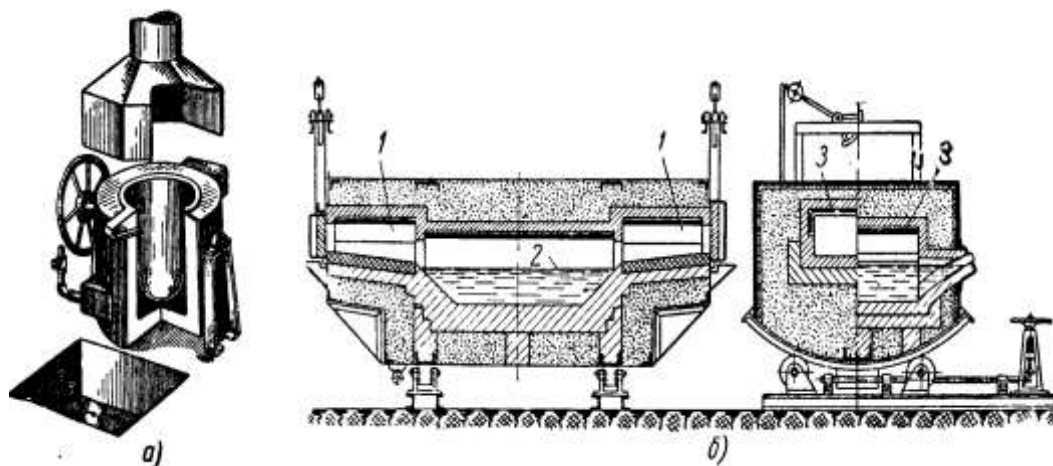


Рисунок 15 – Плавильні печі для плавки алюмінієвих сплавів

а – тигельний горн; б – електропід опору; 1 – завантажувальні вікна; 2 – ванна розплавленого металу; 3 – електронагрівачі опору

2.4.5 Плавка магнієвих сплавів

Магнієві сплави плавлять в тигельних горнах, де паливом може бути газ або мазут, а також в електричних горнах. Місткість останніх – до 90 кг. Місткість полумєневих тигельних печей – до 250 кг. Крім того магнієві сплави плавлять в стаціонарних електричних печах місткістю до 9 т, а також в спеціальних вакуумних печах або в атмосфері захисних газів. Тиглі для плавки магнієвих сплавів виготовляють зварними або литими з м'якої сталі.

Розділ 3 ОБРОБКА МЕТАЛІВ ТИСКОМ

3.1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДУ

3.1.1 Суть і особливості обробки металів тиском

Обробка металів тиском ґрунтується на використанні пластичних властивостей металів, тобто на їх здатності в певних умовах приймати під дією зовнішніх сил залишкові деформації без порушення їх цілісності.

Обробка тиском супроводжується зміною форми матеріалу без зміни його об'єму, завдяки чому досягається раціональне використання матеріалу з незначними відходами.

В сучасному машинобудуванні обробка металів тиском є одним із основних способів виготовлення деталей машин різного призначення. Приблизно 90% сталі і більш як 55% сплавів з кольорових металів підлягають обробці тиском. Цей метод виготовлення заготовок деталей машин корінним чином відрізняється від інших методів обробки, оскільки в процесі пластичного деформування метал не тільки набуває потрібної форми, але й змінює свою структуру (форму та розміри зерен, характер розподілу неметалевих включень, виникнення волокнистої макроструктури) та фізико-механічні властивості.

3.1.2 Основні види обробки металів тиском

До технологічного методу обробки металів тиском належить значна кількість різноманітних технологічних способів, які можна об'єднати у дві основні групи – процеси металургійного та машинобудівного виробництва.

До першої групи належать прокатування, пресування та волочіння, тобто процеси, в основі яких лежить принцип неперервності технологічного процесу. Продукцію цієї групи виробництва (листи, штаби, стрічки, труби, різноманітні профілі, дріт тощо) використовують як заготовку в ковальсько-штампувальних і механічних цехах та як готову продукцію для створення різноманітних конструкцій. До другої групи входять такі процеси, як кування, об'ємне та листове штампування. Ці процеси забезпечують отримання заготовок деталей і готових деталей, які не потребують подальшої механічної обробки. Схеми основних видів обробки металів тиском наведено на рис. 16.

Прокатуванням (рис. 16, а) називають обтискання металу валками, що обертаються. Валки у цьому випадку здійснюють як саму деформацію, так і подачу заготовки в поздовжньому напрямі. Прокатуванням отримують вироби з однаковою по довжині формою поперечного перерізу (прутки, рейки, дріт діаметром, більшим за 6 мм, листи, труби тощо).

Волочіння (рис. 16, б) полягає у протягуванні заготовки крізь отвір (вічко) у волочильній матриці – волоці. Цим способом отримують дрід діаметром до 6 мм, калібровані прутки, тонкостінні труби.

Пресування (рис. 16, в) – це процес видавлювання нагрітого металу із замкнутої матриці крізь отвір у ній. Форма та розміри поперечного перерізу пресованих виробів визначаються конфігурацією та розмірами цього отвору.

Кування (рис. 16, г) здійснюють послідовними ударами по заготовці на молоті або натисканнями на пресі за допомогою бойків.

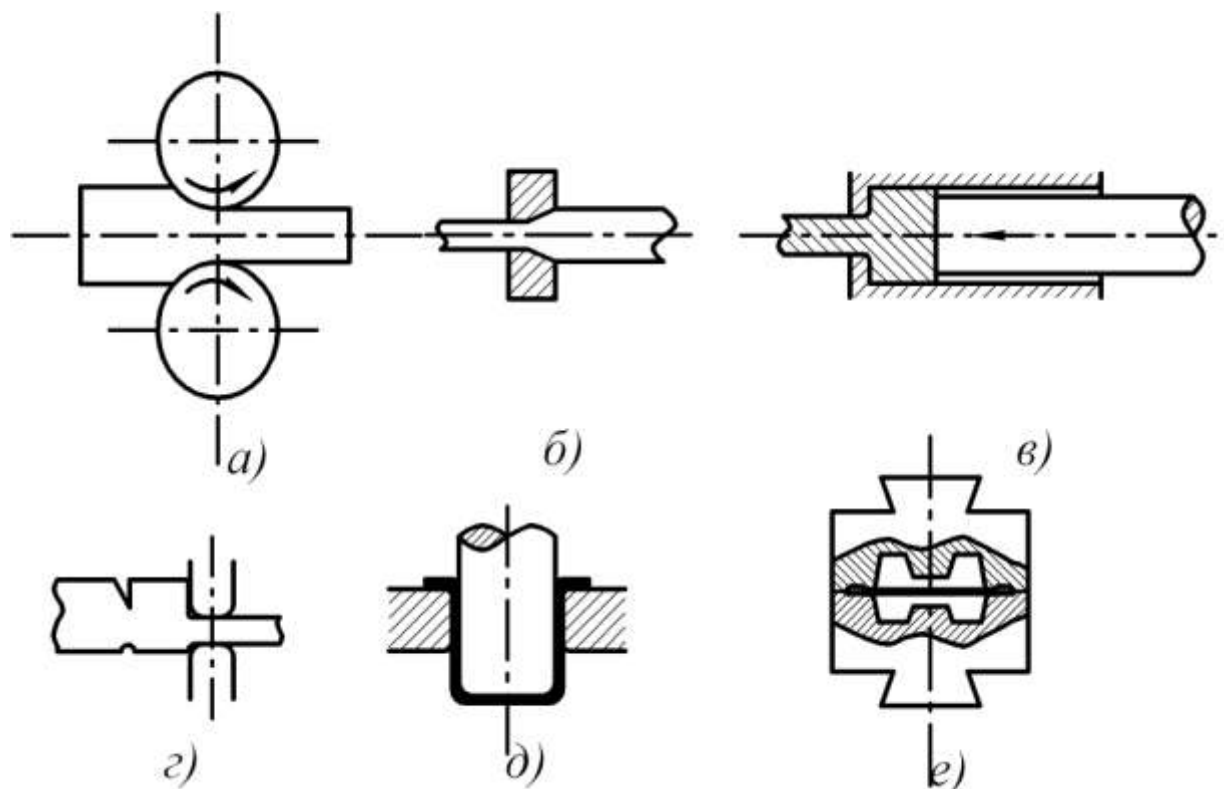


Рисунок 16 – Схеми основних способів обробки тиском

Штампуванням називають деформування вихідної заготовки в спеціальному інструменті – штампі, робоча порожнина якого визначає форму та розміри штампованих поковок.

Якщо вихідним матеріалом є лист, то це буде листове штампування (рис. 16, д), в решті випадків – об'ємне (рис. 16, е).

3.1.3 Вплив обробки тиском і умов її здійснення на властивості та структуру вихідного матеріалу

Обробка тиском змінює не тільки форму вихідної заготовки, але впливає і на механічні властивості та структуру оброблюваного матеріалу. Варто розрізняти холодну та гарячу обробку тиском.

Холодна обробка тиском викликає зміцнення металу або *наклеп*. Це позначається на підвищенні границі міцності, твердості з одночасним

зменшенням пластичності та ударної в'язкості. Низка фізичних властивостей (тепло- та електропровідність, магнітна проникність та деякі інші) також змінюються під впливом холодної обробки. Погіршення пластичності може зробити неможливим подальше деформування металу і спричинити його руйнування. Наклеп можна усунути термічною обробкою під назвою *повернення*. Температура повернення для технічних металів становить 0.2...0.3 від температури плавлення.

У разі холодного деформування металів кристали витягуються у напрямі найбільшої деформації, тобто з'являється певна орієнтація зерен. Така орієнтована структура, що складається з витягнутих у певному напрямі зерен, називається *текстурою* (рис. 17).

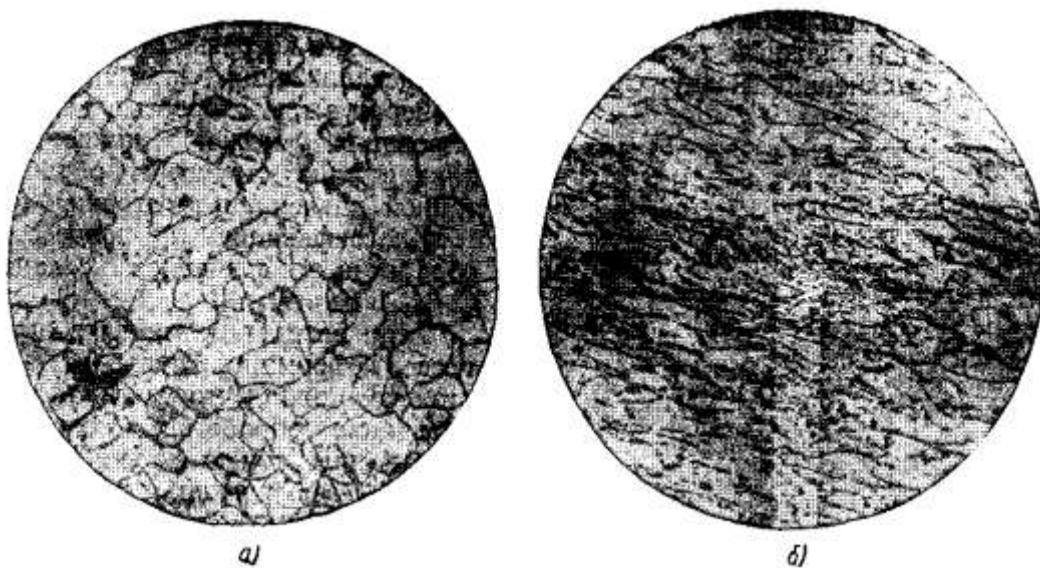


Рисунок 17 – Мікроструктура низьковуглецевої сталі:

а) – до холодної деформації; б) – після холодної деформації

Усунути текстуру і отримати метал з рівноважними зернами можна термічною обробкою під назвою *рекристалізація*. Температура рекристалізації становить $(0.4...0.6) T_{пл}$ металу.

Таким чином, пластична деформація металу призводить до суттєвих і глибоких змін в його структурі та властивостях.

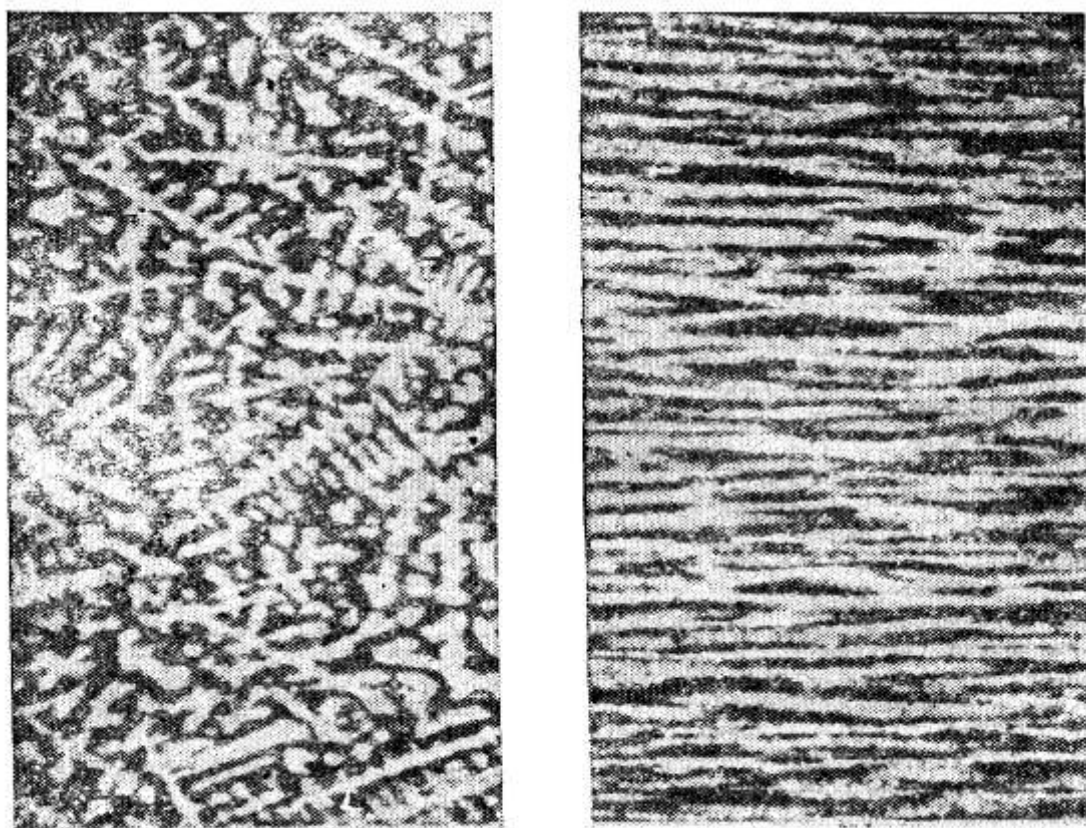
Гаряча обробка здійснюється за температур, вищих за температуру рекристалізації і після закінчення обробки тиском метал має рекристалізовану структуру з рівноважними зернами без слідів зміцнення.

Гаряча обробка тиском вихідного литого зливка сталі деформує і змінює її початкову дендритну структуру, витягуючи і орієнтуючи кристали, а, відтак, і неметалеві включення, розташовані по їх границях у напрямі течії металу. Внаслідок цього утворюється так звана стрічкова або волокниста макроструктура (рис. 18), яка зумовлює необхідність розглядати механічні властивості поковок з урахуванням напрямку в них волокон: вздовж чи поперек.

Волокниста макроструктура металу, отримана в процесі гарячої обробки тиском вихідного зливка сталі, не може бути усунена ні термічною обробкою, ні наступною обробкою тиском. Остання може лише змінити напрям волокон.

Механічні властивості вздовж і поперек волокон таких поковок будуть різними, тобто метал після гарячої обробки тиском має так звану *анізотропію властивостей*: в поздовжньому напрямі вони кращі, в поперечному – гірші.

Цю обставину потрібно враховувати під час розроблення конструкції деталей і технологічного процесу їх виготовлення.



а)

б)

Рисунок 18 – Макроструктура сталі:
а) – литої; б) – після гарячого деформування

Потрібно, щоб напрям найбільших розтягувальних і стискальних напружень, що виникають при роботі деталі, збігався з напрямом волокон, а напрям напружень на переріз чи зсув був перпендикулярним до них.

3.2 НАГРІВАННЯ МЕТАЛУ ПІД ЧАС ОБРОБКИ ТИСКОМ

3.2.1 Термічний режим

Під час гарячого оброблення необхідно притримуватись певного температурного інтервалу, який залежить від хімічного складу сплаву. Для найбільшого підвищення пластичності металу температура початку обробки має бути якомога вищою, але до певної межі, вище якої нагрівати метал не можна, оскільки з'являється небезпека таких негативних явищ як *перегрівання* та *перепалювання*. Перегрівання металу супроводжується інтенсивним ростом зерен, розміри яких зберігаються і після охолодження виробів, що негативно позначається на механічних властивостях металу: зменшуються пластичність і ударна в'язкість. Наслідків перегрівання можна позбутися наступною термічною обробкою – повним відпалом або нормалізацією.

За нагрівання металу до температури, близької до температури плавлення, відбувається розплавлення легкоплавких прошарків між границями зерен, що викликає повну втрату пластичності металу. Це явище називається перепалюванням, воно ніяким чином виправлене не може бути і перепалений метал доводиться відправляти на переплавку.

Температурний інтервал гарячої обробки тиском різних сплавів такий:

Вуглецеві сталі з вмістом вуглецю до 0.3% – 1200...800 °C; з 0.3...0.5% вуглецю – 1150...800 °C; з 0,5...0.9% вуглецю – 1100...800 °C;

Низьколеговані сталі – 100...825 °C; середньо- та високолеговані – 1150...875 °C;

Алюмінієві сплави – 470...350 °C;

Мідні сплави: бронзи – 850...700 °C; латуні – 750...600 °C;

Магнієві сплави – 400...300 °C;

Титанові сплави – 950...730 °C.

3.2.2 Нагрівальні пристрої

Нагрівання заготовок перед їх обробкою тиском здійснюється в нагрівальних печах та електронагрівальних пристроях.

Печі поділяються на полуменеві, в яких тепло утворюється за рахунок спалювання палива (рідкого чи газоподібного), та електричні, де теплота виникає під час проходження електричного струму через металеві або карборундові нагрівачі опору.

Полуменеві печі (рис. 19) за характером розподілу температури в робочому просторі печі поділяються на *камерні* (рис. 19, а) з однаковою температурою по всьому робочому просторі та *методичні* печі (рис. 19, б), в яких температура в робочому просторі підвищується в напрямку від місця завантаження заготовок до місця їх видачі з печі.

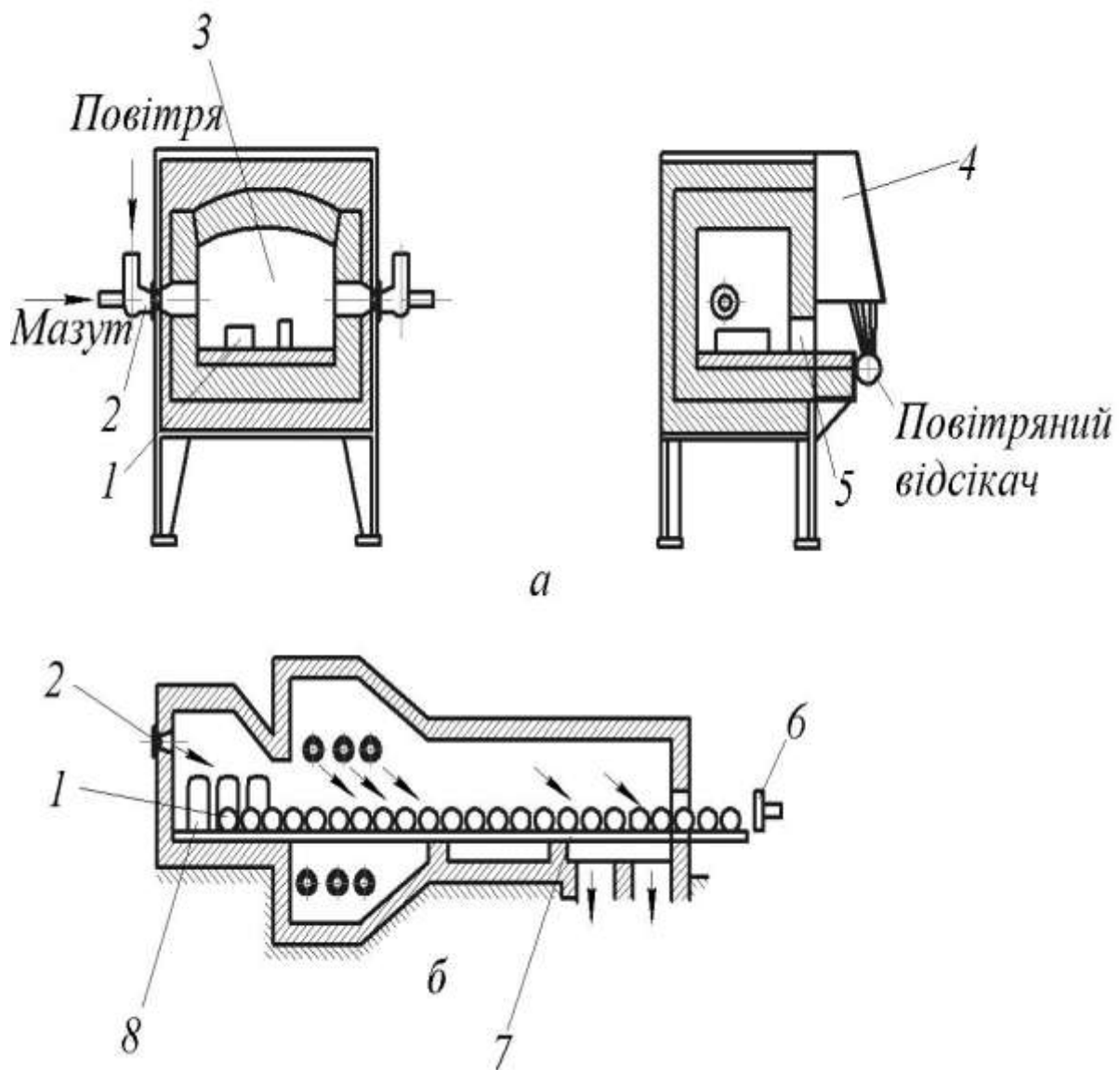


Рисунок 19 – Полуменеві печі для нагрівання заготовок

1 – заготовки; 2 – форсунки або пальники; 3 – робочий простір печі; 4 – димохід; 5 – завантажувальне вікно; 6 – штовхачі для проштовхування заготовок крізь піч; 7 – напрямні для переміщення заготовок; 8 – вивантажувальне вікно

Електричні печі зазвичай камерні і використовуються переважно для нагрівання заготовок з кольорових металів внаслідок малої стійкості нагрівальних елементів за потрібної для нагріву сталі температури.

В електронагрівальних пристроях нагрівання здійснюється за рахунок теплоти, що виділяється в самому металі під дією електромагнітного поля (індукційне нагрівання) або електричного струму (електроконтактне нагрівання).

3.3 ПРОКАТНЕ ВИРОБНИЦТВО

3.3.1 Суть процесу прокатування

Прокатування – це вид обробки металів тиском, під час якої заготовка обтискується двома валками, що обертаються (рис. 16, *а*). Стискаючи метал, валки внаслідок тертя, що виникає між їх поверхнею та металом, одночасно здійснюють і рух подачі вихідної заготовки, поки вся вона не пройде між валками.

В процесі прокатування зменшується товщина заготовки з одночасним збільшенням її довжини та ширини. Відносне зменшення товщини називається *відносним обтиском* або *ступенем деформації* і визначається за формулою:

$$\varepsilon = (h_0 - h_1)/h_0,$$

де h_0 і h_1 – відповідно товщина заготовки до і після прокатування. Значення відносного обтиску дорівнює 0.2...0.5 в залежності від типу виробів.

Відношення довжини заготовки після прокатування l_1 до вихідної l_0 називається *коефіцієнтом витягування*

$$\mu = l_1/l_0.$$

Коефіцієнт витягування становить за одне пропускання заготовки між валками 1.1...1.6 і є однією з важливих характеристик процесу прокатування.

3.3.2 Основні види прокатування

Розрізняють такі основні види прокатування: *поздовжнє, поперечне та гвинтове*.

Під час поздовжнього прокатування (рис. 20, *а*) заготовка пересувається перпендикулярно до осей валків, які обертаються в протилежних напрямках. Таким способом прокатують прутки, листи, стрічки, тобто вироби, форма та розміри перерізу яких не змінюються по довжині.

Під час поперечного прокатування (рис. 20, *б*) валки, що обертаються навколо паралельних осей в одному напрямі, обертають заготовку, яка деформується за примусового переміщення вздовж валків.

Під час гвинтового прокатування (рис. 20, *в*) внаслідок того, що валки розміщені під кутом один до одного і обертаються в одному напрямі, заготовці крім обертового руху надається ще і поступальний рух в напрямку її осі. Якщо швидкість поступального руху заготовки менша швидкості обертового, то прокатування називається також *поперечно-гвинтовим*, а якщо більша – *поздовжньо-гвинтовим*.

Поперечне та гвинтове прокатування застосовують в процесі виготовлення виробів із змінним по довжині перерізом, а поперечно-гвинтове – ще і для прошивання заготовок під час виготовлення безшовних труб.

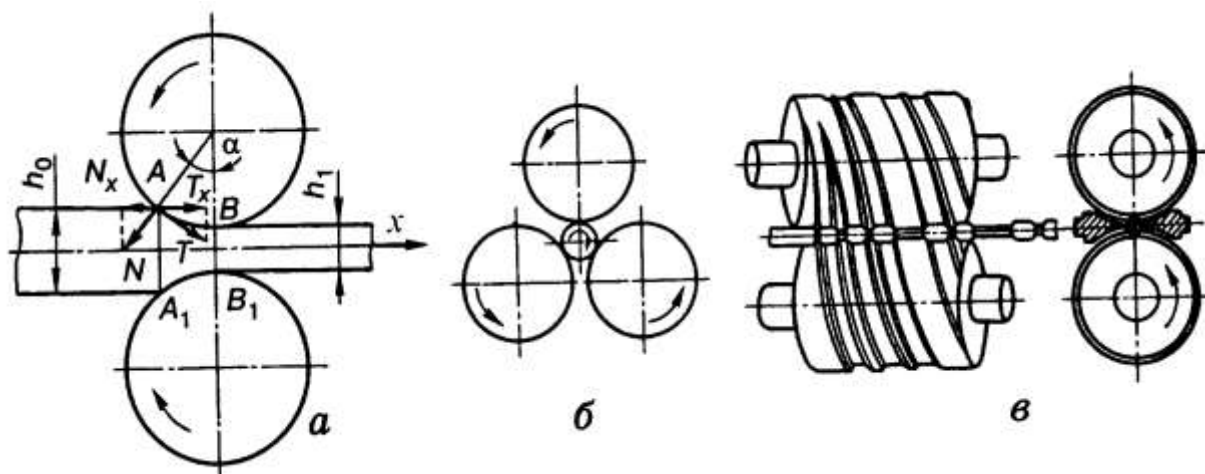


Рисунок 20 – Основні схеми прокатування

3.3.3 Сортамент прокату

Сукупність профілів та розмірів прокатоного металу називається *сортаментом* прокатного виробництва.

Профілем прокатоного виробу називають форму його поперечного перерізу.

За сортаментом продукцію прокатного виробництва поділяють на такі групи:

- ✓ сортовий прокат,
- ✓ листовий, трубний,
- ✓ спеціальний,
- ✓ періодичний.

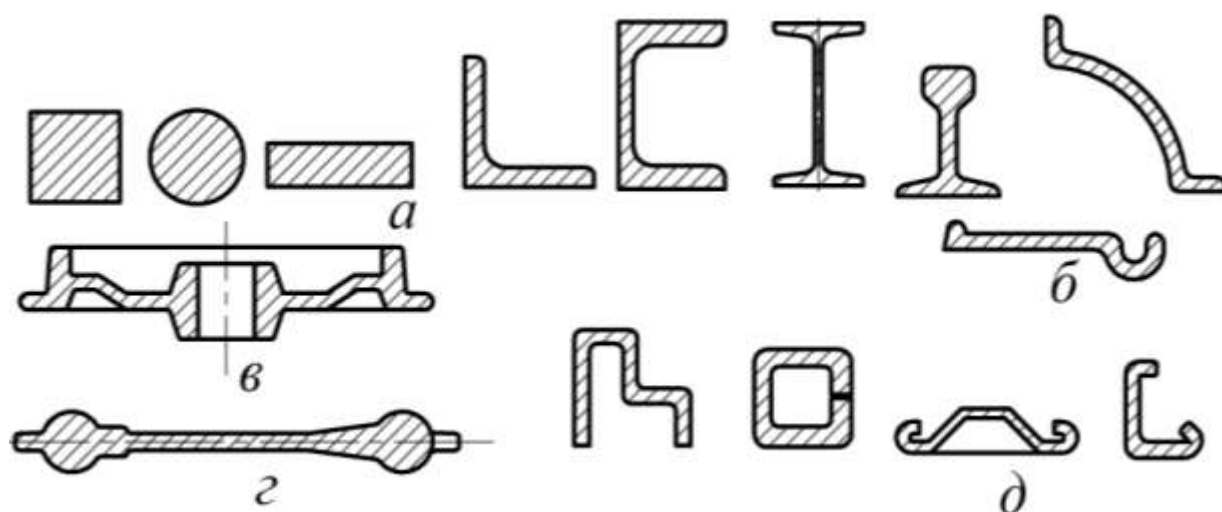


Рисунок 21 – Основні профілі прокату

Профілі *сортowego* прокату можуть бути загального призначення – круглий, квадратний, прямокутний, стрічки, кутники, швелери, таври, двотаври та ін. (рис. 21, а) та спеціального призначення – рейки, профілі для автотракторобудування, суднобудування, транспортного машинобудування та інших галузей промисловості (рис. 21, б).

Листовий прокат поділяють на тонколистовий (товщиною до 4 мм) і товстолистовий, товщина якого може в окремих випадках досягати 450 мм. Лист товщиною менше 0.2 мм називається фольгою.

До *трубного* прокату відносять труби безшовні діаметром 5...450 мм з товщиною стінок 0.5...40 мм і труби шовні (зварні) діаметром до 2500 мм з товщиною стінок до 14 мм.

До *спеціальних* видів прокату належать залізничні колеса (рис. 21, в), шестерні, кулі, підшипникові кільця, періодичний прокат (рис. 21, г), а також *гнутий профіль* (рис. 21, д).

3.3.4 Інструмент і обладнання для прокатування

Основним робочим інструментом для прокатування є **прокатні валки** (рис. 22). Робоча частина валка 1, якою здійснюється деформування заготовки, називається *бочкою*. З обох сторін бочки є *шийки* 2, якими валок фіксується в підшипниках. До шийок прилягають хрестоподібні кінці 3, які називаються *трефами* і призначені для з'єднання валка з приводом його обертання.

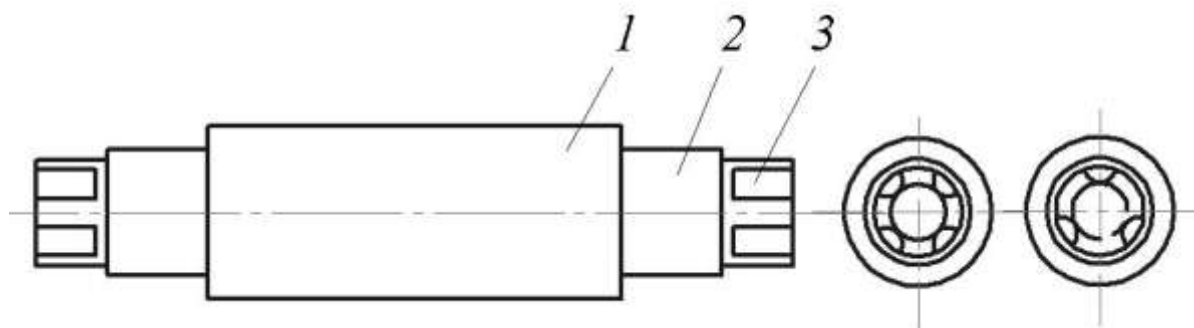


Рисунок 22 – Прокатний валок

Залежно від профілю виробу, що прокатується, бочка валка може бути гладенькою (прокатування листів, стрічок тощо) або з вирізами чи виступами, які називаються *рівчаками*. Сукупність двох вирізів або вирізу з виступом пари валків називається *калібром*. Калібри можуть бути відкритими (рис. 23, а) і закритими (рис. 23, б). На кожній парі рівчакових валків зазвичай розташовують кілька калібрів. Потрібний профіль виробу одержують із вихідної заготовки послідовними пропусканнями її через серію калібрів, часто розташованих не тільки на кількох валках, а навіть і на кількох прокатних станах.

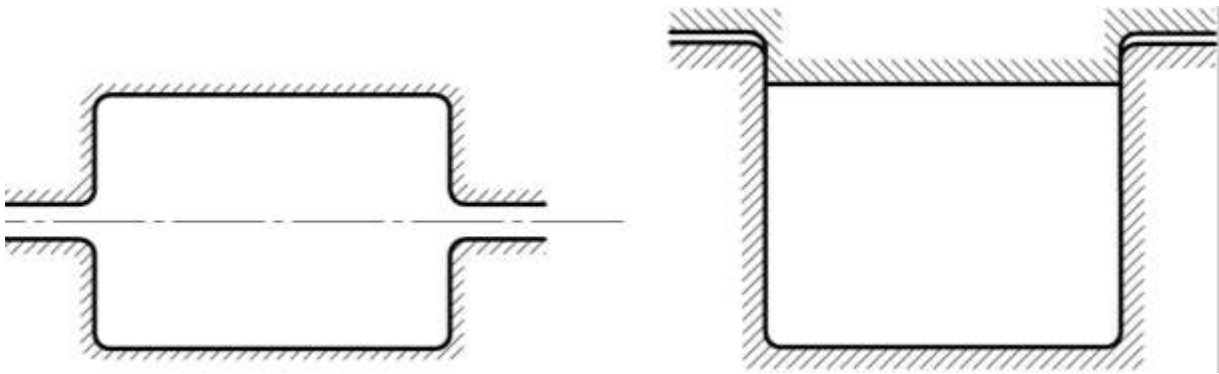


Рисунок 23 – Види калібрів

Прокатні валки 2 монтуються на станині 1 (рис. 24), яка має натискувальний пристрій 3 для зміни зазору між валками. Комплект прокатних валків із станинами називається робочою кліттю. Обертання валки отримують від привода, до якого входять електродвигун 8, редуктор 7, шестеренна кліть 6 і шпинделі 5, які з'єднуються з валками тріфковими муфтами 4.

Сукупність привода, шестеренної кліті, однієї або кількох робочих клітей називається *прокатним станом* (рис. 24).

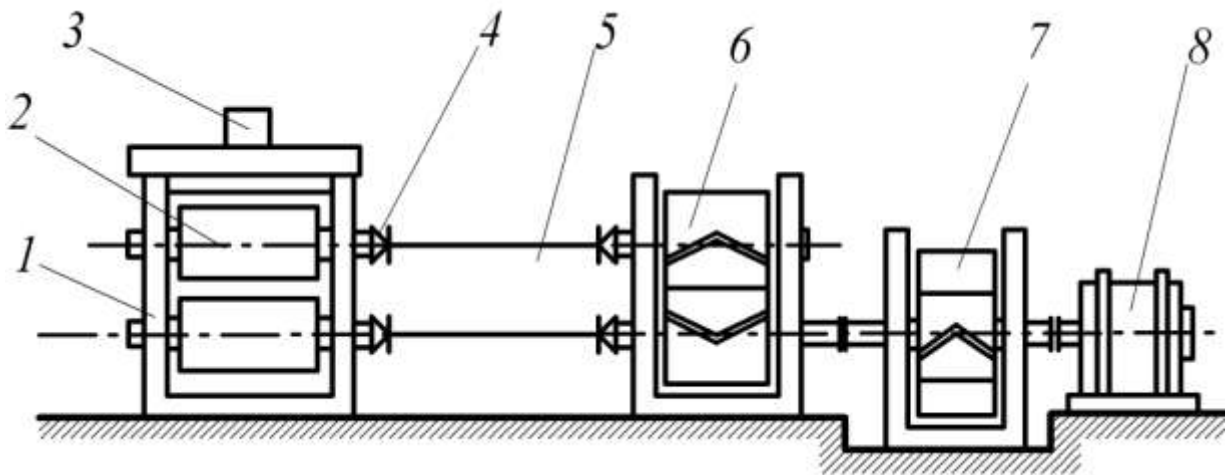


Рисунок 24 – Схема прокатного стану

Прокатні стани *розрізняють* за такими ознаками:

- за кількістю і розміщенням валків у робочих клітях;
- за кількістю і взаємним розміщенням робочих клітей;
- за призначенням;
- за кількістю валків у клітях прокатні стани бувають:
 - двовалкові (дуо-стани),
 - тривалкові (тріо-стани);
 - багатовалкові.

Дуо-стани в кожній кліті мають по два валки (рис. 25, а). Вони можуть бути *нереверсивні* та *реверсивні*, в яких напрям обертання можна змінювати і, таким чином, здійснювати пропускання заготовки в обидва боки.

Тріо-стани мають в кожній кліті по три валки (рис. 25, б). Заготовка, що прокатується, переміщується в одному напрямі між середнім та нижнім валками, а в зворотному – між середнім та верхнім. Дво- і тривалкові стани застосовують під час виробництва всіх видів сортового та листового прокату.

Різновидом тріо-станів є тріо-стан з плаваючим валком (рис. 25, в), який відрізняється тим, що середній валок має діаметр менший, ніж у крайніх, не має привода і обертається за рахунок тертя між ним і одним з двох інших валків, оскільки він може вільно переміщуватись доверху або донизу і в процесі кожного пропускання заготовки притискується відповідно до верхнього або нижнього приводного валка. Такі стани застосовують для прокатування листів завтовшки більше 3 мм.

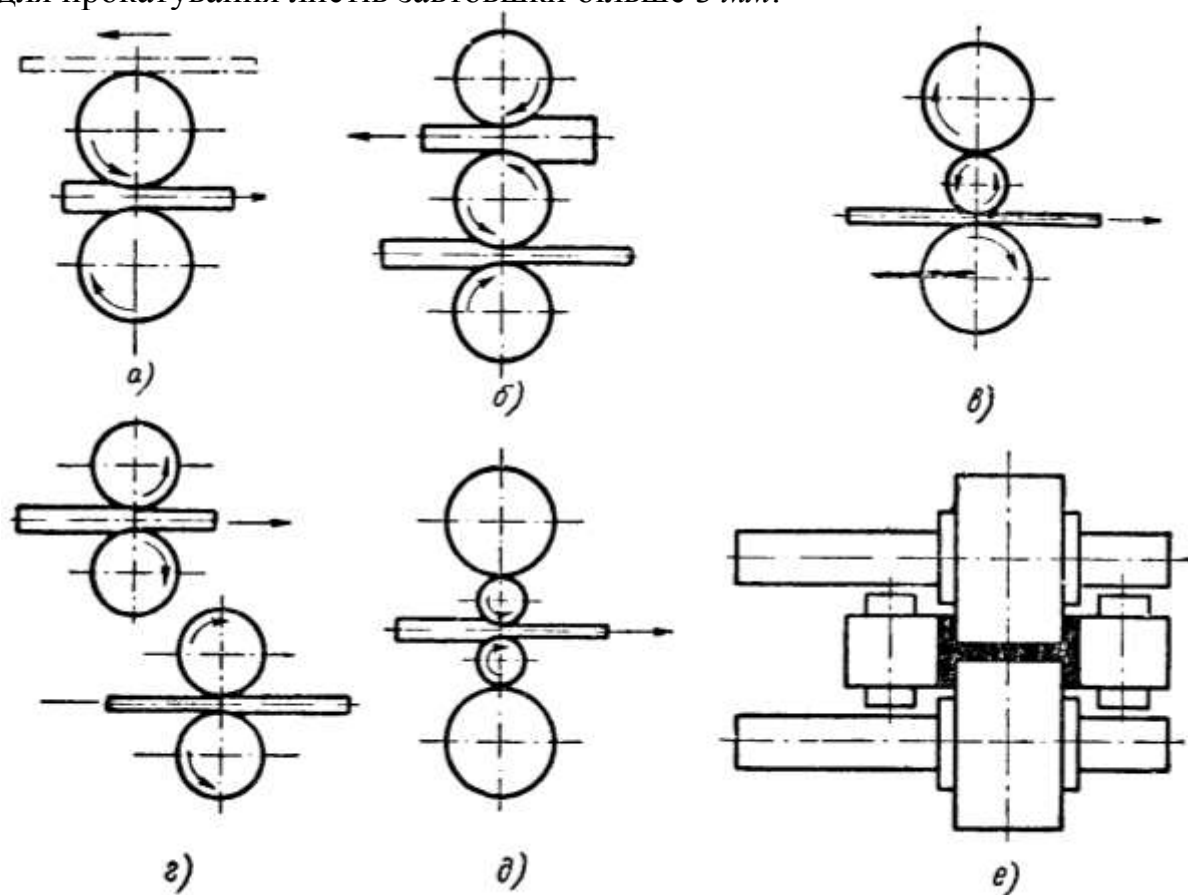


Рисунок 25 – Схеми розташування валків у робочих клітках

Подвійні дуо-стани (рис. 25, г) мають кліті з двома парами валків, які обертаються в протилежних напрямках. Прокатування на цих станах ведеться в обох напрямках, як і на тріо-станах, але з більш високою точністю.

Багатовалкові стани мають два робочих валки невеликого діаметра, а решта, більшого діаметра, є підтримуючими (опорними), призначеними для зменшення прогинання робочих валків і підвищення точності прокату за товщиною. Наприклад, чотиривалкові (кварто-стани), показані на рис. 25, д, використовують для гарячого і холодного прокатування листів, широких стрічок. Решта ж – (шести-, дванадцяти-, двадцятивалкові) – виключно для холодного прокатування тонких листів і стрічок.

Універсальні стани мають як горизонтальні, так і вертикальні валки (рис. 25, е). На цих станах метал обтискується у разі кожного пропускання в горизонтальних і вертикальних площинах. Такі стани використовують для прокатування слябів, двотаврових балок з широкими полицями тощо.

Залежно від кількості і взаємного розташування робочих клітей прокатні стани можуть бути одно- та багатоклітьові з лінійним і послідовним розміщенням клітей.

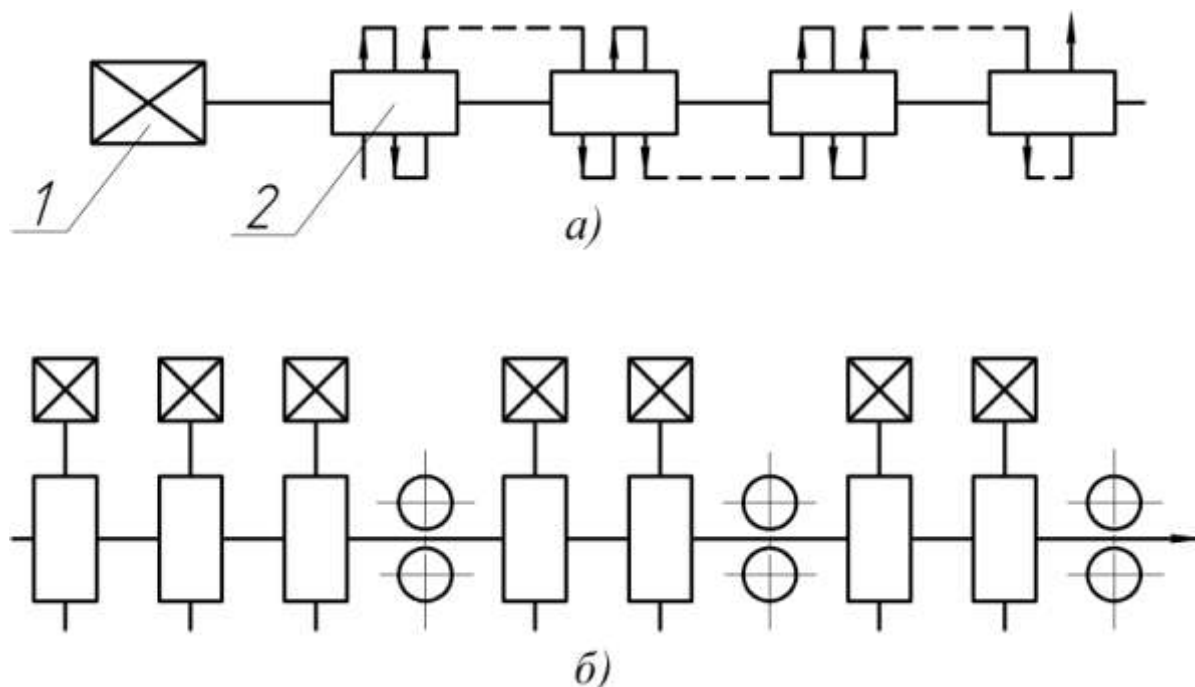


Рисунок 26 – Схеми розташування робочих клітей в прокатних станах

У *лінійних станах* кліті 2 (рис. 26, а) розташовані в одну лінію і є один привод 1. Вони мають малі швидкості прокатування (до 4 м/с) та продуктивність. Послідовне розташування валків використовується в *безперервних станах* (рис. 26, б), які є основним обладнанням сучасних прокатних цехів. Швидкість штаби в них досягає 45 м/с, а продуктивність – 2...4 млн. т прокату на рік.

За призначенням прокатні стани поділяються на обтискні, заготівельні, рейкобалкові, сортові, листо- та трубопрокатні, стани спеціального призначення.

Обтискні стани призначені для обтискання сталевих зливків і одержання з них крупної заготовки. Ці стани називаються *блюмінгами* та *сля-*

бінгами. Продукцією блюмінгів є *блюми* – заготовки квадратного перерізу зі стороною від 125 до 450 мм, які в подальшому використовуються як для виготовлення сортового прокату, так і для кування. Продукцією слябінгів є заготовки прямокутного перерізу – *сляби* – товщиною 75...300 мм і шириною 400...1600 мм, які використовують для виготовлення листів на листопрокатних станах.

Заготівельні стани призначені для прокатування блюмів на сортову заготовку перерізом від 40×40 до 200×200 мм. Крім того, на цих станах прокатують *сутунку* – плоску заготовку шириною 150...600 мм за товщини 6...75 мм. Сутунка є вихідним матеріалом для наступного прокатування в дрібні листи та стрічку.

Сортові стани призначені для прокатування різноманітних профілів – квадратних, круглих, кутників, швелерів, таврів, двотаврів тощо.

Листопрокатні стани поділяють на товстолистові та тонколистові. Товсті листи (тобто, товщиною більше 4 мм) прокатують із слябів, тонкі – як із легких слябів, так і з сутунки. Тонкі листи можуть бути як холодно-, так і гарячекатані.

Трубопрокатні стани призначені для виготовлення труб. За способом виробництва труби поділяються на безшовні та шовні (зварні). Процес виготовлення безшовних труб розділяється на дві стадії: 1) одержання товстостінної гільзи зі зливка або прокатоної заготовки; 2) прокатування з гільзи готової труби.

Гільзу з вихідної заготовки одержують на прошивних станах поперечно-гвинтового прокатування з бочкоподібними валками, осі яких у вертикальній площині нахилені одна до одної під кутом 4...14° (рис. 27, а). Робочі валки 1 і підтримувальні ролики 2 обертаються в одному напрямі. У цьому випадку заготовка 3 набуває гвинтоподібного руху, тобто одночасно з обертальним рухом вона отримує і поступальний рух вздовж осей валків. Пряма конусність валків у зоні прошивання створює в осьовій частині зливка настільки значні напруження, що суцільність металу у цій зоні порушується і остання розпушується з утворенням внутрішньої порожнини. За зоною прошивання метал переходить у зону розкачування, де валки мають зворотну конусність, а розпушена серцевина заготовки зустрічає пробку (дорн) 4, яка і формує остаточний отвір у заготовці. Після прошивання отвору заготовку нагрівають і подають на розкатні стани, де гільза перетворюється на трубу потрібних розмірів.

На *розкатних станах автоматичної дії* (рис. 27, б) гільза 5 розкатується між двома валками 1 на оправці 4. Зазор між оправкою і калібром валка визначає товщину стінки труби. Прокатують трубу за два проходи з поворотом її на 90°. Повернення труби у вихідне положення після кожного проходу здійснюється роликами 6 зворотної подачі. На автоматичних станах прокатують труби діаметром понад 57 мм завтовшки 2.5...40 мм.

На *розкатних станах періодичної дії (пілігримових)* (рис. 27, в) робочі валки 1 мають калібри змінного перерізу і обертаються в протилежних на-

прямах. Заготовка 5 разом з оправкою 4 здійснює пряму і зворотну подачі з поворотом на 90° .

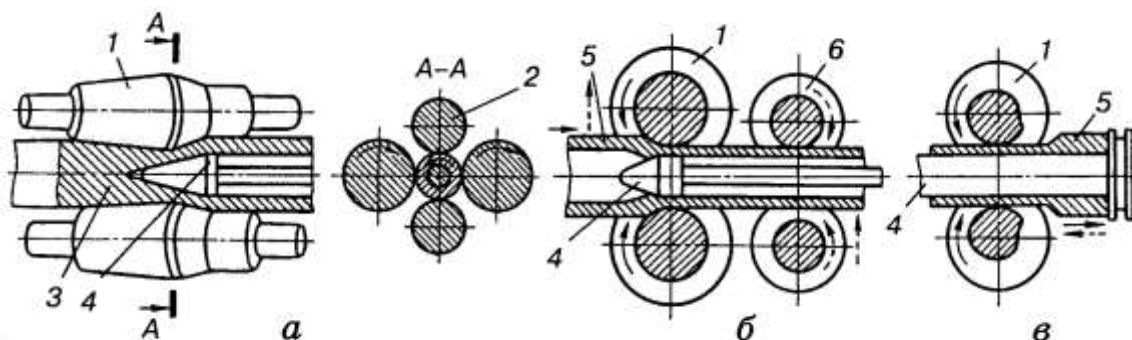


Рисунок 27 – Прокатування безшовних труб

Зварні труби виготовляють діаметром до 2500 мм. Вихідною заготовкою для них є штиба (штрипс) або листи, ширина яких дорівнює довжині кола труби.

Технологічний процес виготовлення зварних труб складається з таких операцій: скручення вихідної заготовки в трубу, зварювання труби, калібрування, обробка і випрямлення.

Труби невеликого діаметра формують у рівчаках валків безперервного стану, а труби діаметром понад 300 мм – на пресах або листозгинальних станах. Після формування застосовують зварювання: безперервне пічне, контактне електричне, дугове під шаром флюсу.

Безперервне пічне зварювання – високопродуктивний спосіб виготовлення труб (переважно водогазопровідних) діаметром 10...114 мм із стінкою завтовшки 1.8...5.0 мм. Стрічка (штрипс), що надходить у рулонах, розмотується, виправляється, обрізується, зварюється стиковим електричним зварюванням з кінцем попереднього рулону і подається в газову нагрівальну піч тунельного типу завдовжки до 40 м, де нагрівається до 1300...1350 °С. Далі заготовка послідовно проходить крізь 6...12 клітей безперервного стану, де формуються і зварюються затиснуті у калібри один до одного впритул краї труби (рис. 28, а). На виході зі стану труба розрізується пилюкою на куски завдовжки 4...12 м, а потім калібрується на калібрувальному стані.

Під час контактної електричної зварювання труб діаметром 6...600 мм із стінкою завтовшки 0.4...5 мм заготовка формується так, як і за пічного зварювання, але без нагрівання. Далі заготовка надходить у трубоелектрозварювальний стан (рис. 28, б), в якому краї труби 4 стискаються натискними роликами 1, нагріваються струмом напругою 5...10 В, який подається від джерела струму крізь щітки 2 та обертові зварювальні ролики 4, і таким чином зварюються. Ролики 5 просувають трубу.

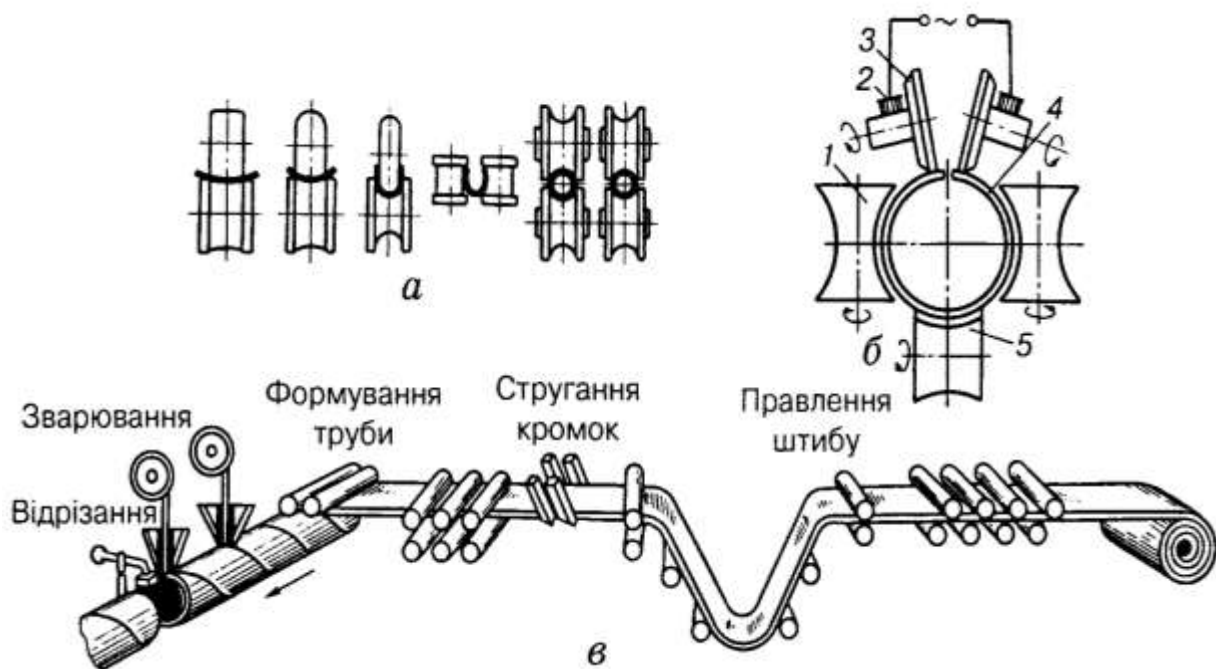


Рисунок 28 – Схеми виготовлення зварних труб

Дуговим зварюванням під шаром флюсу виготовляють труби діаметром 400...1800 мм і більше завтовшки 6...15 мм, прямим і спіральним (рис. 28, в) швами.

На прокатних станах спеціального призначення виготовляють деталі типу коліс, бандажів, кілець, ступінчастих валів, втулок, осей, пальців, черв'яків, ходових гвинтів, черв'ячних фрез тощо.

Гнуті профілі (див. рис. 21, д) порівняно з сортовим фасонним прокатом мають меншу металомісткість і їх застосування в металоконструкціях дозволяє економити до 25...30% металу. Виготовляють їх згинанням тонкої штаби, стрічки на профілезгинальних станах.

3.4 ПРЕСУВАННЯ

3.4.1 Суть процесу пресування

Пресування є одним із видів обробки металів тиском, що здійснюється шляхом видавлювання металу крізь отвір меншого перерізу, ніж переріз вихідного матеріалу. Це високопродуктивний та економічний спосіб отримання точних суцільних та порожнистих профілів, які іншими способами отримати або надто складно, або взагалі неможливо.

Метал під час деформування в умовах всебічного стискання в процесі пресування має найбільшу пластичність. Тому пресуванням можна обробляти як пластичні, так і малопластичні сплави: мідні, алюмінієві, магнієві, титанові, вуглецеві та легovanі сталі тощо.

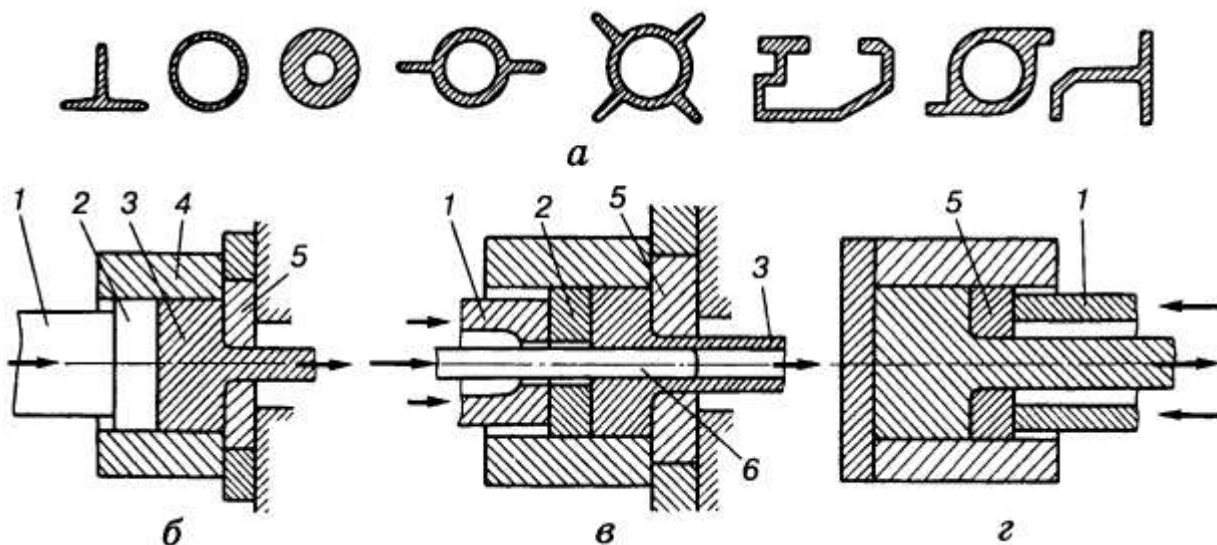


Рисунок 29 – Пресовані профілі та схеми пресування

Пресуванням виготовляють прутки діаметром 5...250 мм, труби зовнішнім діаметром 20...400 мм із стінками завтовшки 1.5...12 мм та інші вироби (рис. 29, а). Вихідним матеріалом для пресування є круглий прокат або зливки діаметром 60...500 мм, довжиною 125...1200 мм залежно від потрібного профілю виробу та зусилля преса. А це зусилля в сучасних гідравлічних пресах, що застосовуються для пресування, становить 3... 250 МН.

3.4.2 Методи пресування

Розрізняють пряме та зворотне пресування.

У процесі *прямого пресування* (рис. 29, б) напрям виходу металу з контейнера 4 крізь отвір у матриці 5 збігається з напрямом руху пуансона 1, тиск якого на заготовку 3 передається через прес-шайбу 2. Профіль пресованого виробу відповідає формі отвору в матриці.

За *зворотного пресування* (рис. 29, г) матриця 5 розміщується в кінці порожнистого пуансона 1 і метал витискується в напрямі, зворотному переміщенню пуансона.

Під час пресування труб заготовка спочатку прошивається голкою 6, яка проходить крізь порожнистий пуансон 1. В процесі подальшого переміщення пуансона і прес-шайби 2 метал видавлюється у вигляді труби 3 в кільцевий зазор між голкою і стінками отвору матриці. Форма отвору матриці у цьому випадку визначатиме зовнішню форму труби, а форма поперечного перерізу голки – внутрішню форму труби.

Недоліком пресування є досить значні (до 15%) втрати металу на так званий *прес-залишок*, тобто частину заготовки, яка залишається в контейнері невитісненою.

3.5 ВОЛОЧІННЯ

3.5.1 Суть процесу волочіння

Волочіння полягає у протягуванні прокатаних або пресованих заготовок крізь отвір у матриці (волоці), переріз якого менший за переріз заготовки (рис. 30, б). Таким чином, в процесі волочіння площа поперечного перерізу заготовки зменшується, а оскільки об'єм залишається незмінним, то довжина її збільшується.

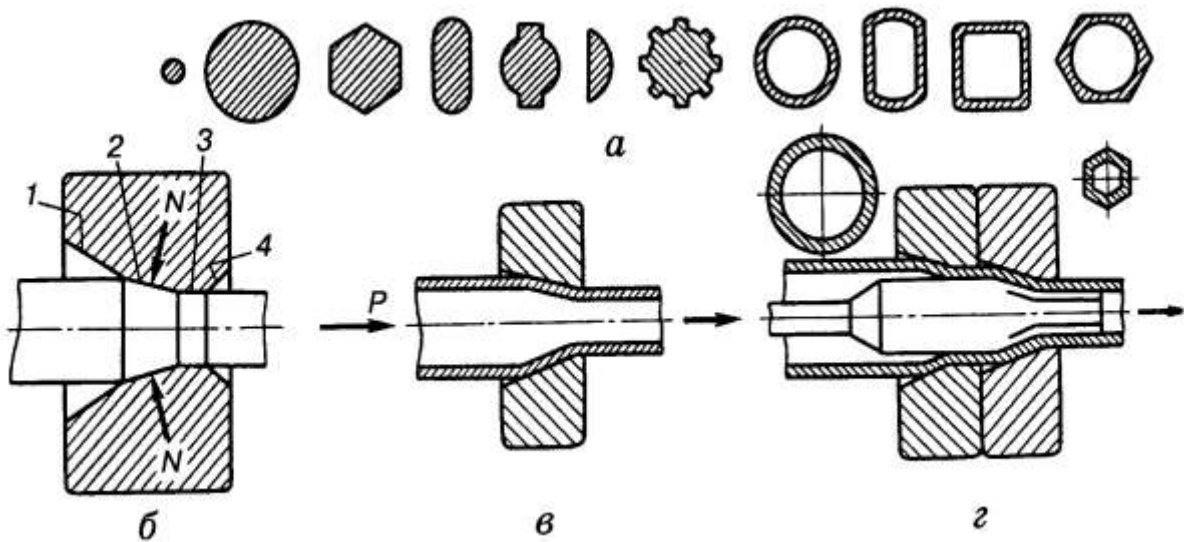


Рисунок 30 – Схеми волочіння та приклади виробів

Відношення $\eta = (F_0 - F_1)/F_0 \cdot 100$, %, де F_0 і F_1 – площі поперечного перерізу відповідно до і після волочіння, називається коефіцієнтом витягання. За один прохід допускається: для сталей $\eta = 10...20\%$, для кольорових металів – до 36%. Потрібне витягування залежно від його величини здійснюється за один чи кілька проходів крізь ряд отворів, що поступово зменшуються. Волочіння зазвичай здійснюють в холодному стані, тому воно супроводжується зміцненням металу (наклепом). Під час волочіння виробів за кілька проходів для усунення наклепу і відновлення пластичних властивостей метал піддають проміжному рекристалізаційному відпалу.

Волочінням із сталі та кольорових металів виготовляють дріт діаметром 0.002...10 мм, калібровані прутки діаметром 3...150 мм, труби діаметром до 500 мм із стінками завтовшки 0.1...10 мм та інші профілі з високою точністю і якісною зовнішньою поверхнею (рис. 30, а).

3.5.2 Інструмент та обладнання для волочіння

Робочим інструментом для волочіння є волочильна матриця – волока, яка виготовляється з інструментальної сталі, твердого сплаву, мінералокераміки або технічних алмазів. Вона складається з чотирьох зон

(рис. 30, б): мастильного конуса 1, робочого конуса 2, калібрувального пояса 3 шириною 2...10 мм і вихідного конуса 4.

Волочіння здійснюють на *волочильних станах*, в яких заготовки протягуються крізь отвір матриці за допомогою тягового пристрою. Ці стани поділяються на ланцюгові та барабанні.

Ланцюгові стани призначені для волочіння прутків та труб. Тяговий пристрій в цих станах здійснює прямолінійний рух завдовжки до 8 м.

Барабанні стани з безперервною подачею заготовки призначені переважно для протягування дроту.

3.5.3 Схеми волочіння

Дріт діаметром менше 5 мм виготовляють виключно волочінням, більше 5 мм – переважно прокатуванням (дріт-катанка). Для виготовлення сталевого дроту діаметром 0.5 мм з дроту-катанки діаметром 5 мм потрібно виконати 20 проходів і не менше трьох проміжних рекристалізаційних відпалювань. Схему волочіння дроту показано на рис. 30, б.

Волочіння труб здійснюють двома способами: без оправки (рис. 30, в) і на оправці (рис. 30, г). В першому випадку зменшується тільки діаметр труби, в другому – одночасно зменшується і діаметр, і товщина стінки. Волочіння на оправці застосовують також для виготовлення фасонних труб з циліндричних.

Волочіння здійснюють із застосуванням густих мастил. Це зменшує зусилля волочіння, зношування інструмента та поліпшує якість поверхні виробів.

3.6 КУВАННЯ

3.6.1 Суть процесу і технологічні операції кування

Куванням називають деформування нагрітої заготовки за допомогою універсального інструмента, придатного для виготовлення виробів великої номенклатури.

У машинобудуванні кування застосовують у таких випадках:

- в одиничному та дрібносерійному виробництвах, коли застосування спеціального інструмента – штампа є економічно недоцільним;
- в процесі виготовлення великих, важких деталей (більше 1 т), для яких кування є єдиним можливим способом їх виробництва, оскільки виготовлення штампів для таких великих деталей є або надто складним, або взагалі неможливим.

Основним інструментом для кування є *бойки* (рис. 32, поз. 11 і 12, рис. 33, поз. 2 і 12), між якими і здійснюється деформування заготовки.

Основними технологічними операціями кування, за допомогою яких можна виготовити поковку практично будь-якої складності, є такі (рис. 31):

Протягування застосовують для видовження заготовки. Цю операцію можна виконувати плоскими (рис. 31, а) та фігурними (рис. 31, б) бойками. В останньому випадку зменшується небезпека виникнення тріщин під час кування малопластичних сплавів і підвищується продуктивність процесу.

Розковування (розгонка) кілець на оправці застосовується для збільшення діаметра заготовки (рис. 31, в).

Осадка – збільшення поперечного перерізу вихідної заготовки за рахунок її висоти. Місцеве потовщення заготовки називається *висадкою* (рис. 31, г).

Прошивання – отримання в заготовці наскрізного або глухого отвору за допомогою інструмента – *прошивня* 1 (рис. 31, д). Наскрізні отвори виконують у тонких заготовках 3 з підкладними кільцями 2. В товстих заготовках спочатку прошивають заглиблення приблизно на 3/4 глибини, а потім цим самим прошивнем закінчують прошивання з іншого боку.

Згинання виконують із використанням різноманітних пристроїв для виготовлення колінчастих валів, гаків, скоб тощо (рис. 31, е).

Закручуванням повертають на певний кут частини заготовки одна відносно одної під час виготовлення, наприклад, колінчастих валів з V-подібним розташуванням шатунних шийок. Для цієї операції застосовують воротки, вилки, хомути тощо (рис. 31, є).

Рубанням поділяють заготовки на частини, утворюють в поковці намітки (надрубання). Для рубання застосовують такий інструмент як сокири 4 (рис. 31, ж).

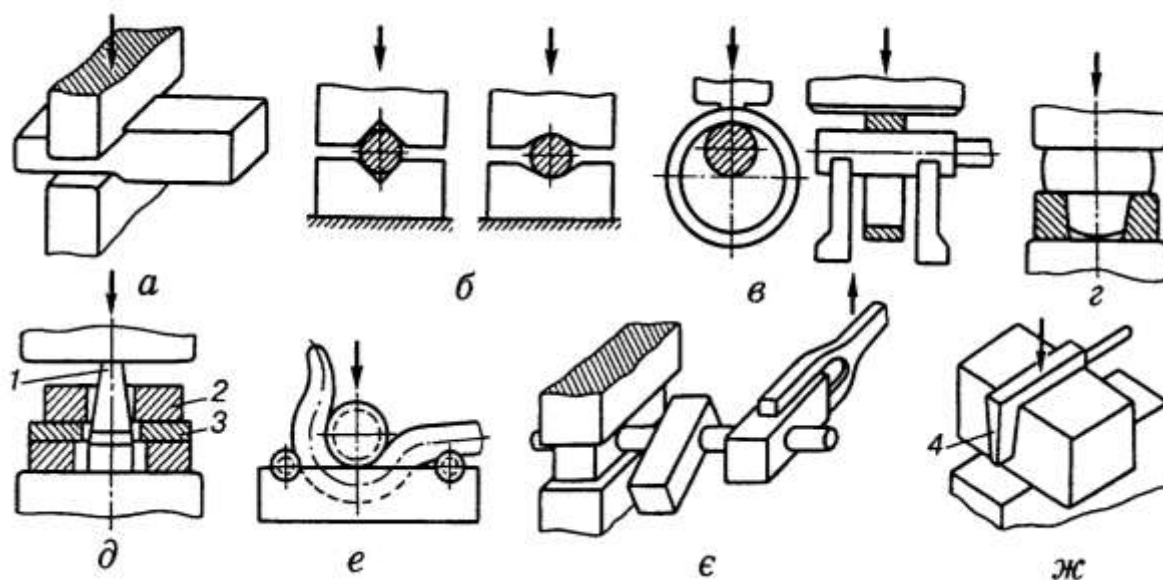


Рисунок 31 – Основні технологічні операції кування

3.6.2 Устаткування для кування

Ковальські операції здійснюють на молотах і пресах. Молоти створюють динамічну (ударну) дію інструмента (бойка) на заготовку. Тривалість деформування під час кування на молотах становить близько 10^{-3} с, а швидкість деформування – 6.0...6.5 м/с. Найбільш поширені пароповітряні і пневматичні молоти. Будь-який молот має так звані падаючі частини, основним елементом яких є *баба*. До нижньої поверхні баби прикріплений верхній боек, який завдає удари по заготовці, що знаходиться на нижньому бойку, закріпленому на нерухомій частині молота – *шаботі*. Для досягнення коефіцієнта корисної дії молота в межах 0.8...0.9 маса шабота має перевищувати масу падаючих частин не менше, ніж в 15 разів.

На рис. 32 показано *пароповітряний кувальний молот*. Піднімання та опускання баби 10 із закріпленим на ній верхнім бойком 11 здійснюється по напрямних 7 під час надходження пари чи стиснутого повітря тиском 0.7...0.9 МПа в робочий циліндр 5. Подача пари регулюється золотниковим пристроєм 4. В процесі зміщення золотника 3 за допомогою важеля 1 і тяги 2, якими керує коваль, пара потрапляє у нижню або верхню порожнину циліндра 5 і переміщує поршень 6, який з'єднаний штоком 8 з бабою 10, відповідно вгору або вниз. Під час руху поршня вниз відбувається падіння баби. Усі механізми розміщені на станині 9, встановленій на масивному фундаменті. Нижній боек 12 нерухомо закріплений на шаботі 13, який, зазвичай, має окремий фундамент. Сучасні пароповітряні молоти мають масу падаючих частин 1...8 т. На них кують заготовки масою до 1 т.

Пневматичні молоти, в яких робочим середовищем є стиснуте повітря тиском 0.2...0.3 МПа, мають масу падаючих частин 50...1000 кг і застосовують для кування дрібних поковок (до 20 кг)

Преси відрізняються від молотів тим, що тривалість деформування під час кування на них становить десятки секунд, а швидкість деформування 0.3...0.5 м/с.

У *гідравлічному пресі* (рис. 33) плунжер 6 переміщує рухому траверсу 3 із закріпленим на ній бойком 2. Потрібне для деформування поковки зусилля створюється тиском рідини (мінерального масла, водної емульсії), яка під тиском 20...30 МПа подається в робочий циліндр 10 по трубопроводу 11. Піднімається плунжер 6 з траверсою 3 за допомогою тяг 5 і поршнів 8, які переміщуються в циліндрах піднімання 9. Нижній боек 12 кріпиться до нижньої плити 1, яка з'єднана з верхньою плитою 7 чотирма напрямними колонами 4, по яких переміщується траверса 3.

Гідравлічні преси виготовляють з максимальним зусиллям 5...150 МН і їх використовують для кування щонайважчих поковок.

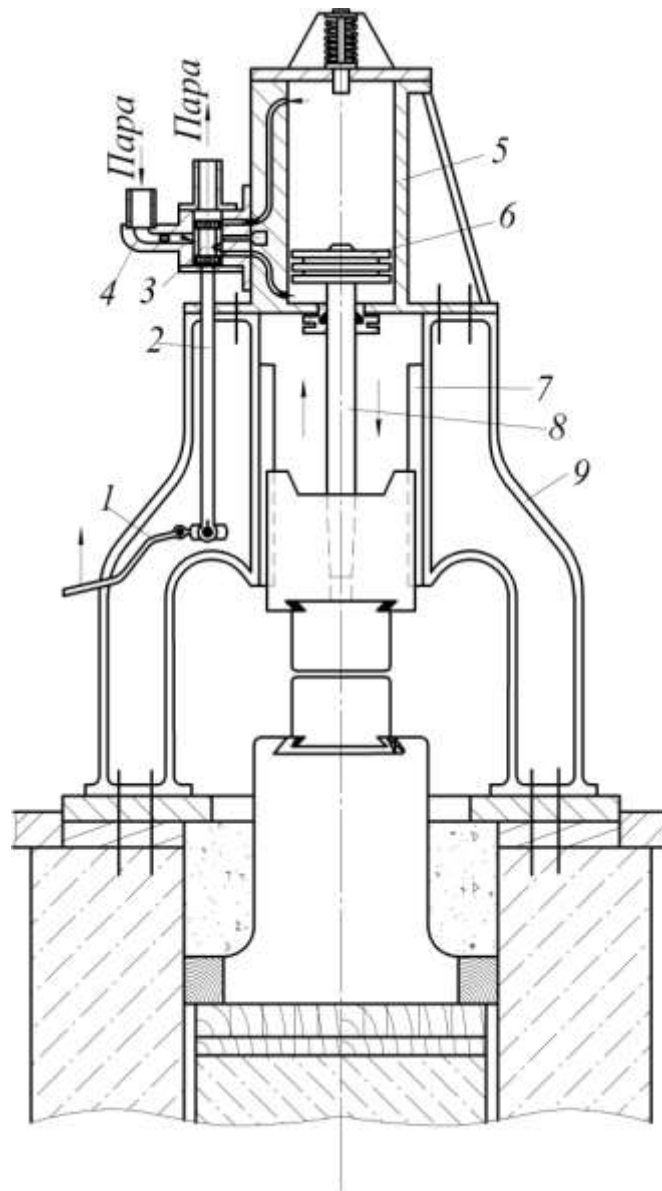


Рисунок 32 – Пароповітряний кувальний молот

Вихідним матеріалом для кування є зливки і прокат. Із зливок виготовляють важкі поковки, маса яких вимірюється інколи сотнями тонн (наприклад, колінчасті вали для суден, турбінні диски, ротори генераторів, суцільноковані барабани для посудин і котлів високого тиску тощо).

Поковки до кількох сотень кілограмів виготовляють переважно з прокату (блумів) різних розмірів перерізу, а для дрібних поковок як вихідна заготовка використовується сортовий прокат – круглий, квадратний, штабовий та ін.

Перевагами кування перед іншими способами виготовлення заготовок обробкою тиском є універсальність інструмента, необмеженість заготовок за масою, доступність і легка здійсненність способу.

Недоліками кування є низька точність заготовок, високі припуски на обробку, великі напуски, низькі коефіцієнти використання металу та вагової точності, низька продуктивність процесу.

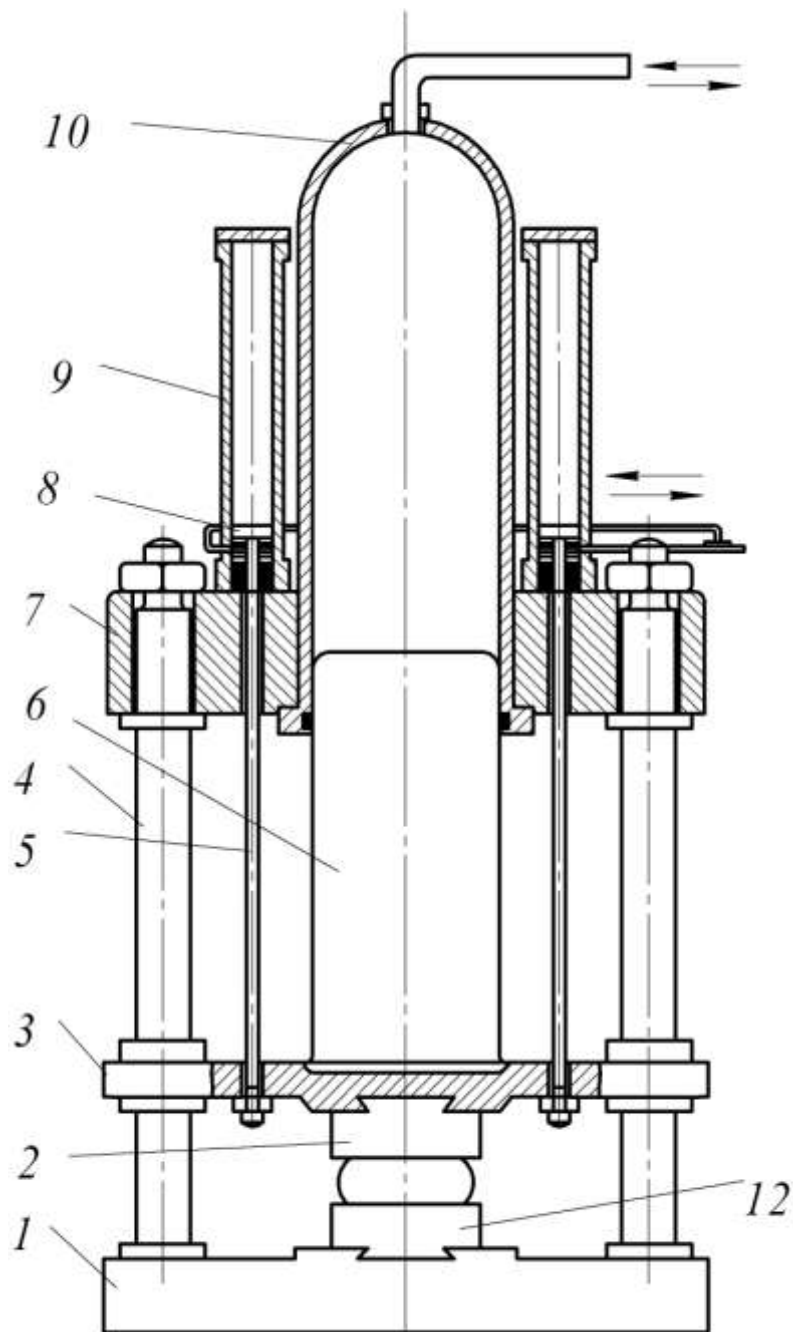


Рисунок 33 – Гідравлічний кувальний прес

3.7 ГАРЯЧЕ ОБ'ЄМНЕ ШТАМПУВАННЯ

3.7.1 Суть процесу

Об'ємне штампування є способом обробки металів тиском, під час якого переміщення металу примусово обмежується поверхнями порожнини інструмента – штампа. Конфігурація поковки відповідає робочій порожнині штампа в кінці штампування.

Порівняно з куванням об'ємне штампування має в 50...100 разів вищу продуктивність, в 3...4 рази менші припуски та напуски, більш високу

якість поверхні, значно вищі коефіцієнти використання металу та вагової точності.

Недоліками штампування є складність та висока вартість штамів, обмеженість маси поковок (переважно до 100 кг). Об'ємне штампування доцільно застосовувати в масовому та великосерійному виробництві.

3.7.2 Способи штампування

Розрізняють об'ємне штампування у відкритих та закритих штампах.

У *відкритих штампах* між рухомою (верхньою) 2 та нерухомою (нижньою) 1 частинами штампа до останнього удару верхньої частини по нижній (всього 1...5 ударів) існує зазор. Після повного стулювання частин штампа зазор залишається у вигляді облойної (задиркової) канавки 3, куди витікає надлишковий об'єм металу заготовки, утворюючи облой (задирку), який в подальшому обрізується (рис. 34, а).

У *закритих штампах* (рис. 34, б, в) деформування металу відбувається у закритій порожнині і не супроводжується утворенням облой. Це робить штампування у закритих штампах більш прогресивним з погляду витрат металу, але потребує більш високої точності щодо об'єму вихідної заготовки. Крім того, закриті штампи менш стійкі внаслідок того, що нагріваються в процесі гарячого об'ємного штампування до більш високих температур, ніж відкриті. Тому закрите штампування застосовують приблизно у 20% випадків об'ємного штампування.

Різновидом закритого штампування є *штампування видавлюванням* (рис. 34, з), схема якого близька до схеми пресування. Різниця між цими процесами полягає в тому, що під час видавлювання виробом 4 є все те, що виходить із матриці, і те, що в ній залишається, а у разі пресування – тільки те, що вийшло з матриці.

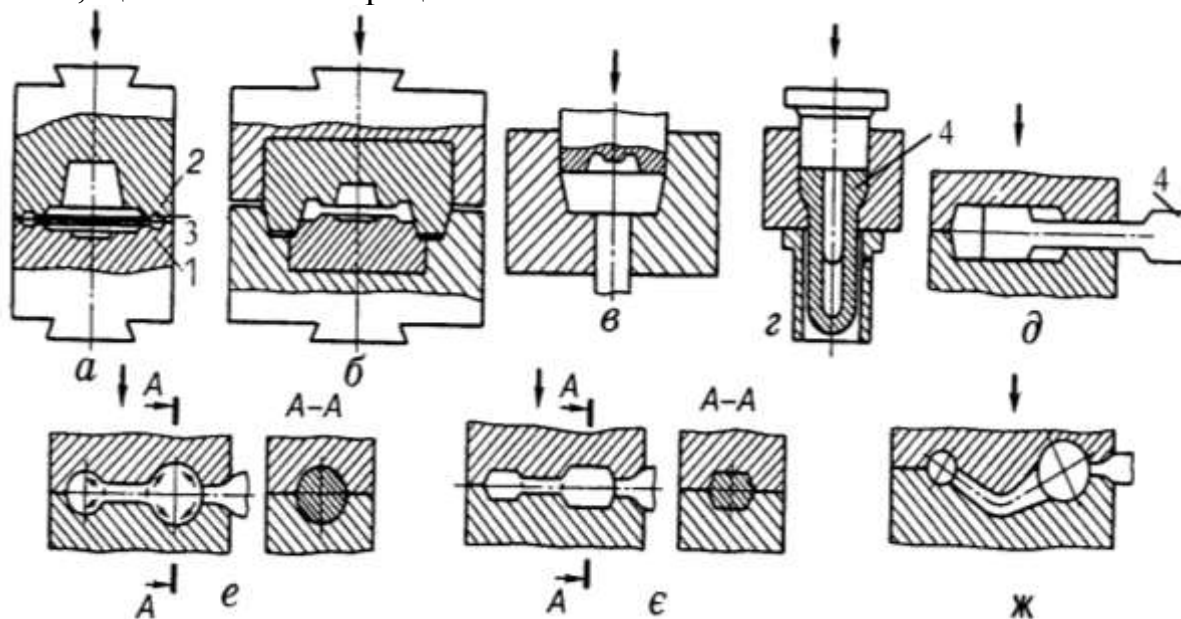


Рисунок 34 – Схеми гарячого об'ємного штампування і заготівельних рівчаків

Робоча порожнина стулених складових частин штампа називається *рівчаком штампa*. Поковки простої форми штампують в *однорівчакових* штампах. Складні поковки з різкими змінами перерізу по довжині виготовляють в *багаторівчакових* штампах з послідовним деформуванням заготовки в кількох рівчаках з поступовим наближенням до кінцевої форми поковки. Рівчаки в багаторівчакових штампах поділяють на заготівельні і штампувальні.

Заготівельні рівчаки призначені для підготовки фасонної заготовки задля наступного штампування. В них виконують: осадку; протягування – видовження частини заготовки 4 (рис. 34, д); підкатку – місцеве збільшення перерізу заготовки за рахунок сусідніх ділянок (рис. 34, е); перетиск – розплющування заготовки; формування – надання заготовці форми, наближеної до кінцевої (рис. 34, є); згинання (рис. 34, ж); відрубівання (під час штампування з прутка).

Штампувальні рівчаки є чорнові та чистові (остаточні). Чорнові рівчаки відрізняються від чистових тільки більшими радіусами заокруглень і штампувальними нахилами та не мають облойних канавок.

3.7.3 Устаткування для об'ємного штампування

Гаряче об'ємне штампування виконують на штампувальних молотах, пресах, горизонтально-кувальних машинах і спеціальних машинах вузького призначення – ротаційно-кувальних машинах, кувальних вальцях, горизонтально-згинальних машинах, електровисадних машинах та ін.

Штампувальні молоти застосовують для штампування поковок переважно в багаторівчакових відкритих штампах. До штампувальних молотів належать пароповітряні, гідравлічні, фрикційні з дошкою. Основним типом штампувальних молотів є *пароповітряні* (рис. 35) з масою падаючих частин 630...25000 кг. В цих молотах станина 4 і шабот 2 мають загальний фундамент 1. Маса шабота в 20...30 разів перевищує масу падаючих частин. Стояки станини 4 розміщені безпосередньо на шаботі і з'єднані з ним болтами з пружинами. Баба 5 із закріпленою на ній верхньою частиною штампа переміщується по встановлених на стояках напрямних 3. Нижня частина штампа з нагрітою до температури штампування заготовкою закріплена на шаботі 2.

Штампувальні молоти мають педально-автоматичне керування. Якщо педаль 9 не натиснута, то баба здійснює холостий зворотно-поступальний рух, витримуючи зазор між частинами штампа 200...300 мм. Поворотом важеля 8 через золотниковий пристрій 7 можна керувати подачею пари в робочий циліндр 6 і визначати положення баби. Під час натискання на педаль 9 зростає розмах коливань баби і верхня половина штампа здійснює удари по заготовці. Зазвичай штампування здійснюється за 3...5 ударів. В кінці останнього удару обидві частини штампа стикуються по площині розтину. На молотах штампують поковки масою переважно до 100 кг.

Крім молотів для штампування застосовують гвинтові фрикційні, гідравлічні та кривошипні гарячештампувальні преси (КГШП).

Гвинтові фрикційні преси зусиллям до 6.3 МН використовують для штампування у відкритих і закритих штампах поковок масою до 20 кг переважно в дрібносерійному виробництві.

Гідравлічні преси для штампування порівняно з кувальними мають більш жорстку конструкцію і обладнані виштовхувачами для видалення поковок із штампа. Ці преси з зусиллям до 750 МН застосовують для штампування великих поковок у відкритих і закритих штампах.

Кривошипні гарячештампувальні преси з зусиллям 6.3...100 МН застосовують для виготовлення поковок з прокату у відкритих і закритих штампах, а також видавлюванням. На рис. 36 наведено схему КГШП. Від електродвигуна 1 клинопасовою передачею рух передається зубчастому колесу великих розмірів 2, яке вільно обертається на колінчастому валу 4. З'єднуватись з цим валом і таким чином приводити його в обертання колесо 2 може за допомогою фрикційної дискової муфти 3. Від колінчастого вала 4 рух передається шатуну 5, який перетворює обертовий рух вала у зворотно-поступальний рух повзуна 7 із закріпленою до нього верхньою плитою 10 зі штампом 11. Нижня плита 13 зі штампом 12 закріплена на столі преса 14. Суміщення верхньої і нижньої частин штампа забезпечується напрямними колонками 9. Під час переміщення повзуна 7 догори виштовхувачі 8 видаляють поковку зі штампа. Для зупинення колінчастого вала 4 у верхньому положенні після виключення муфти 3 використовують гальмо 6.

На КГШП метал у кожному рівчаку деформується за один хід повзуна. Тому об'єм вихідної заготовки має точно відповідати об'єму поковки. Незмінність ходу повзуна і наявність напрямних колонок дає можливість досягати високої точності поковок, а застосування виштовхувачів дає змогу зменшити штампувальні нахили до $5...7^\circ$ проти $7...10^\circ$ в процесі штампування на молотах без виштовхувачів.

Горизонтально-кувальні машини (ГКМ) найбільш зручні для штампування деталей, що мають форму правильних або ускладнених виступами чи впадинами тіл обертання (рис. 37).

Штампи горизонтально-кувальних машин, на відміну від молотових, складаються не з двох частин, а з трьох: нерухомої матриці, рухомої матриці та пуансона, які розтинаються по двох взаємно перпендикулярних площинах. Схему процесу штампування на ГКМ показано на рис. 38. Пруток 1 з нагрітою частиною на його кінці закладають в нерухому (праву) матрицю 2, закріплену в нерухомій щогі 3 машини. Положення кінця прутка визначається упором 4. Машину включають і починається переміщення рухомої щогли 5 (лівої) з рухомою матрицею 6 і повзуна машини з пуансоном 7 (рис. 38, а).

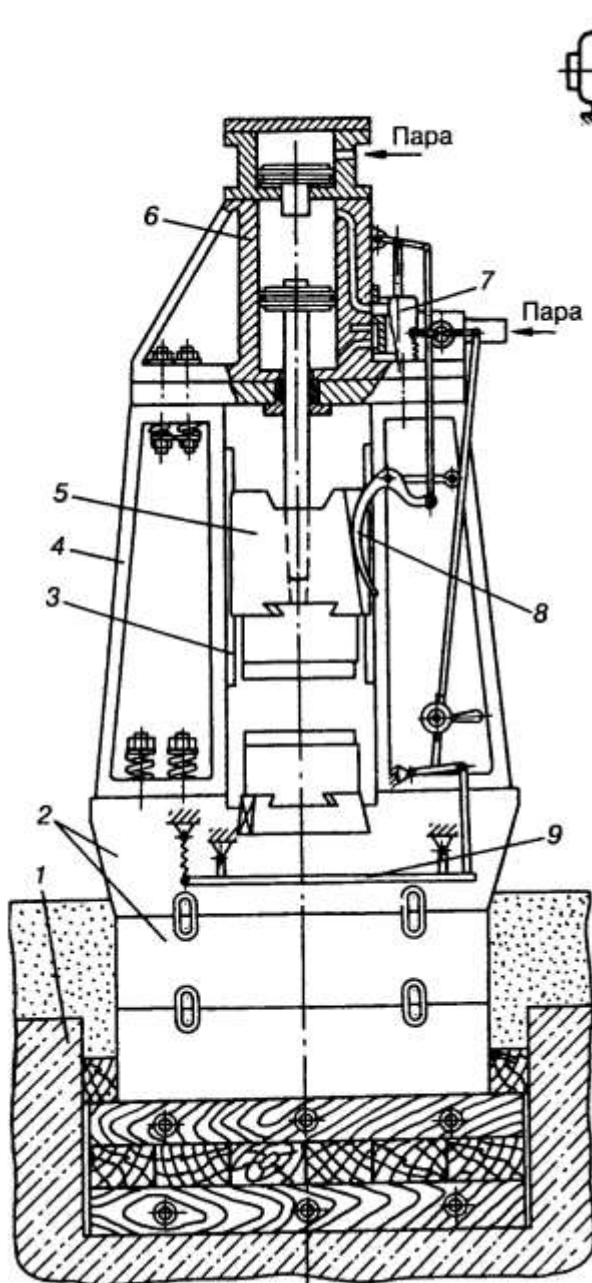


Рисунок 35 – Пароповітряний штампувальний молот

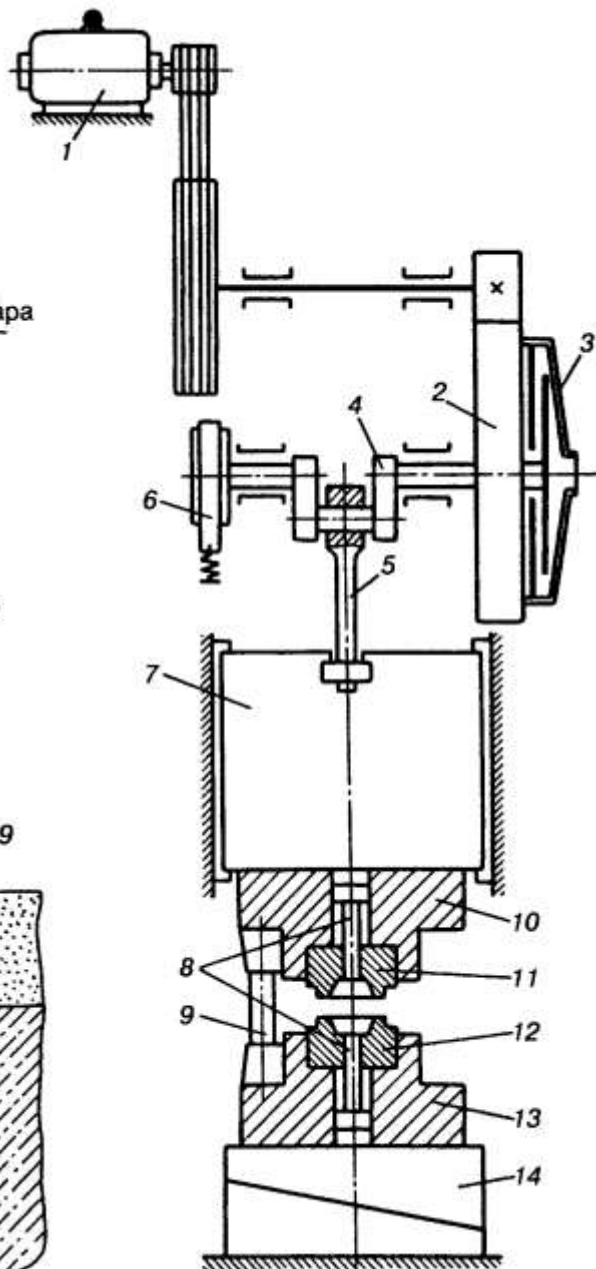


Рисунок 36 – Схема кривошипного гарячештампувального преса

Раніше, ніж пуансон зіткнеться з виступаючим торцем прутка 1, рухома матриця притисне пруток до нерухомої матриці 2, а упор 4 автоматично відійде вбік. Пруток буде міцно утримуватись у затискній частині матриць (рис. 38, б).

Під час подальшого переміщення повзуна пуансон 7 буде виконувати висадку частини прутка, яка виступає за межі затискної ділянки матриць. Метал заповнить порожнину в матрицях (рис. 38, в).

Потім повзун переміщується у зворотному напрямі, пуансон виходить з порожнини матриць, матриці розтискуються і висаджену заготовку

виймають або вона випадає з матриць. Після цього пуансон і матриці займають вихідне положення (рис. 38, з). Штампування на ГKM можна виконувати за кілька переходів в окремих рівчаках, осі яких розташовані горизонтально одна під одною. Кожен перехід виконується за один робочий хід машини.

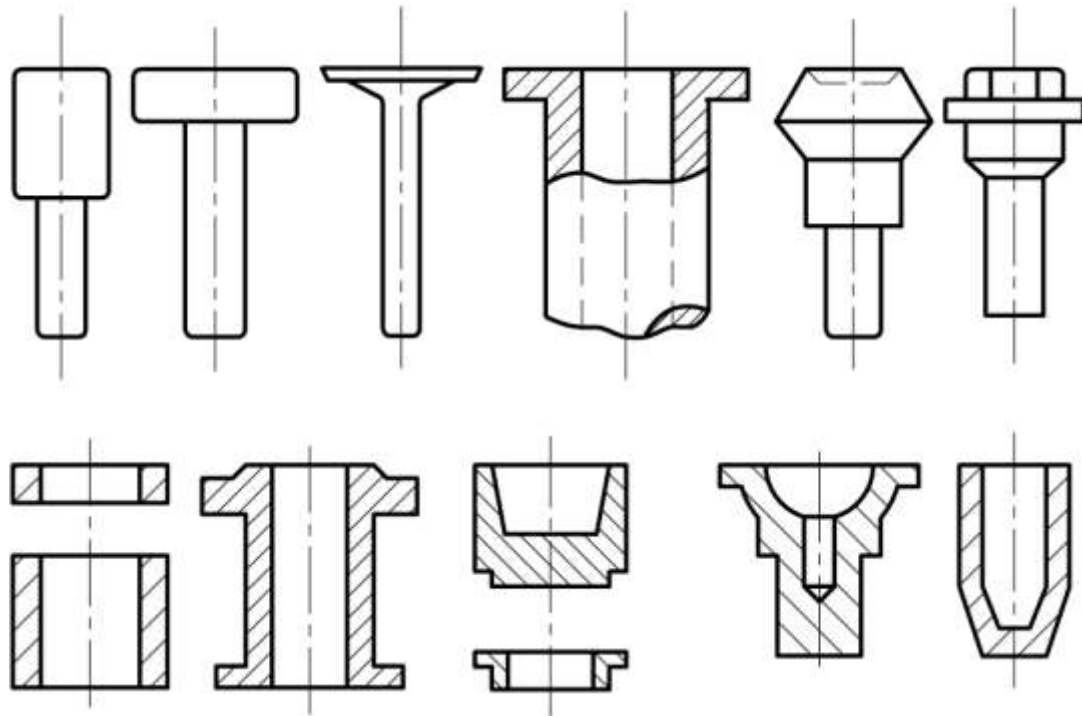


Рисунок 37 – Типи поковок, що штампуються на горизонтально-кувальних машинах

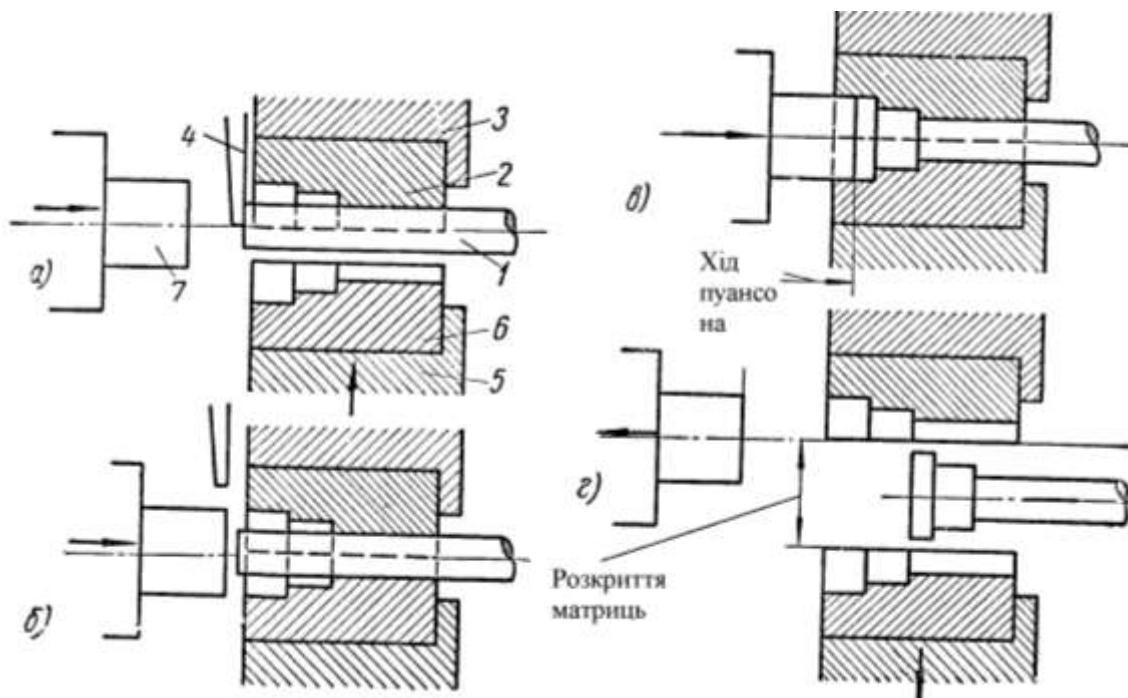


Рисунок 38 – Схема процесу штампування на горизонтально-кувальній машині

Штампування на горизонтально-кувальних машинах має такі особливості: 1) високу продуктивність (до 400...900 поковок за годину); 2) можливість виробляти поковки такої конфігурації, яка не може бути здійснена без напусків за штампування на молотах; 3) можливість утворювати в поковках наскрізні отвори, чого не можна робити під час штампування на молотах і пресах, де на місці отворів роблять тільки заглиблення (намітки) з обох боків, залишаючи між ними оболонку металу – перемичку; 4) незначні відходи металу через малу величину облою (задирки) або навіть повною його відсутністю; 5) точність розмірів і чистота поверхні; 6) зручність і безпека роботи.

3.7.4 Обробка поковок

Після об'ємного штампування поковки обробляють з метою надання їм більш високої точності перед механічною обробкою на металорізальних верстатах. Ця обробка здійснюється безпосередньо в ковальсько-штампувальних цехах і містить такі операції:

- *обрізування і зачищення облою*, що утворюється під час штампування у відкритих штампах. Цю операцію виконують на кривошипних пресах в обрізувальних штампах;
- *прошивання перемички* для утворення наскрізного отвору. Часто цю операцію поєднують з обрізуванням облою;
- *виправлення* для усунення викривлених осей та спотворених поперечних перерізів. Виправлення здійснюють після обрізання облою в чистових рівчаках штампів або в спеціальних правильних штампах;
- *калібрування (чеканка)* для підвищення точності поковок за масою, розмірами і якістю поверхні. Калібрування поділяється на площинне та об'ємне. *Площинне* калібрування забезпечує підвищення точності розмірів між окремими, переважно паралельними площинами поковки. *Об'ємне* калібрування покращує якість поверхні поковки з одночасним підвищенням точності всіх її розмірів.
- *термічна обробка* поковок (найчастіше відпалювання і нормалізація) з метою усунення залишкових напружень після штампування і поліпшення оброблюваності різанням;
- *очищення від окалини* для покращення якості поверхні поковок. Виконують в обертових барабанах, на дробометальних установках та травленням у 15...18% розчині сірчаної кислоти, нагрітої до 60 °С.

3.8 ХОЛОДНЕ ШТАМПУВАННЯ

Холодним називають штампування без нагрівання заготовок. Його поділяють на об'ємне та листове.

3.8.1 Холодне об'ємне штампування

Штампування заготовок без нагрівання в холодному стані дає можливість майже повністю виключити обробку різанням і забезпечує зменшення трудомісткості виготовлення деталей на 30...80% та підвищення коефіцієнта використання металу на 50% і більше. Основними видами холодного об'ємного штампування є видавлювання і всадка.

Холодне видавлювання – це одержання поковок за пластичної течії металу в порожнині штампа і за своєю схемою не відрізняється від пресування. Тільки у разі видавлювання виробом є не прутки певного профілю, як у випадку пресування, а готова фасонна деталь, яка потребує лише незначної механічної обробки. Схему холодного об'ємного видавлювання показано на рис. 39, а.

Вихідна заготовка (зазвичай частина прокатоного або пресованого прутка) деформується у товстостінному контейнері (матриці) 1 під дією пуансона 5 і витікає через отвір у матриці. Готову деталь 3 видаляють з матриці за допомогою виштовхувача 2 і знімача 4.

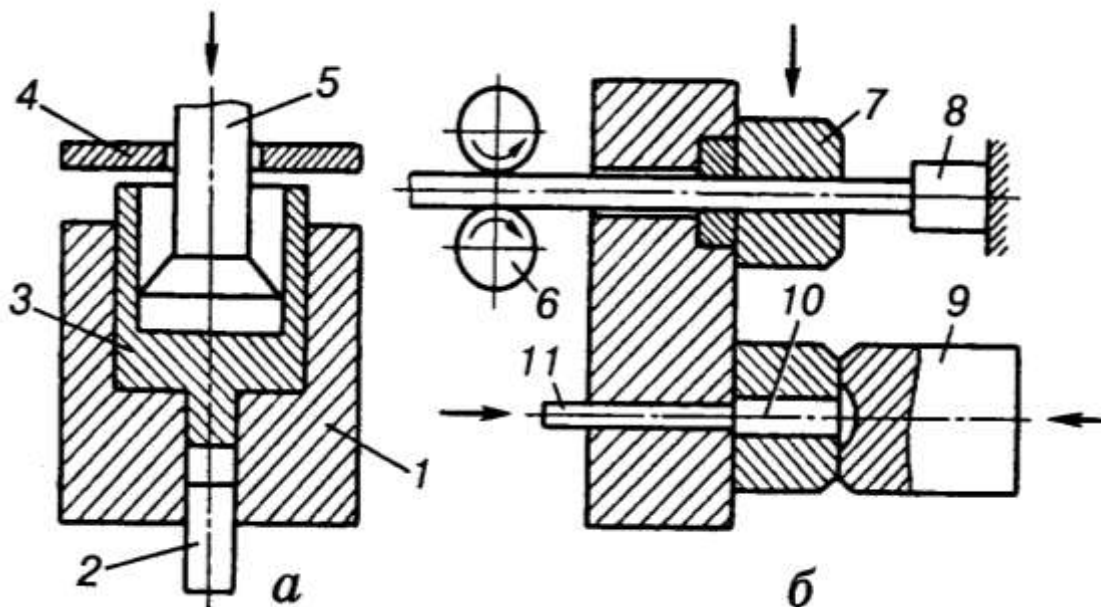


Рисунок 39 – Схеми холодного об'ємного штампування

Холодну всадку застосовують для виготовлення деталей у масовому виробництві: болтів, гвинтів, шпильок, гайок, шурупів, цвяхів тощо. Вихідною заготовкою є дрід або прутки діаметром до 38 мм. Схему всадки заклепки на холодновисаджувальному автоматі показано на рис. 39, б. Дрід або прутки роликами 6 висуваються крізь матрицю 7 до упору 8. Далі матриця переміщується з одночасним відрізуванням деталі від заготовки на позицію всадки. Всадка заклепки 10 здійснюється пуансоном 9, а видаляється вона з матриці виштовхувачем 11.

3.8.2 Листове штампування

Листовим штампуванням називають процес виробництва плоских і об'ємних тонкостінних деталей з листа, стрічки, штаби товщиною зазвичай не більше 5 мм. Матеріалом для листового штампування є сталь і сплави кольорових металів.

Широке застосування листового штампування в промисловості пояснюється низкою його позитивних якостей: 1) високою продуктивністю (до 30...90 тис. деталей за зміну; 2) точністю деталей, що забезпечує їх взаємозамінність і виключає у більшості випадків їх механічну обробку; 3) сприятливими умовами для автоматизації процесу.

Технологічні операції листового штампування можна поділити на дві групи: роздільні та формозмінні.

Роздільні операції листового штампування пов'язані з відокремленням однієї частини матеріалу від іншої по замкнутому або незамкнутому контуру. До них відносяться:

Відрізання – розділення заготовки на частини за допомогою ножів або штампа. Його найчастіше виконують на гільйотинних ножицях з поступальним рухом ріжучих кромek ножів (рис. 40, а), дискових ножицях з обертовим рухом ножів (рис. 40, б), а також на відрізних штампах.

2. *Вирізування (вирубкування)* – повне відокремлення матеріалу по замкнутому контуру. У цьому випадку частина, що відокремлюється, є виробом (рис. 40, в).

3. *Пробивання* – операція отримання в деталі наскрізного отвору (рис. 40, г).

4. *Надрізання* – операція часткового відокремлення матеріалу по незамкнутому контуру без видалення залишків, тобто без відходів (рис. 40, д).

Операції вирізування та пробивання виконуються за допомогою штампів. Основними робочими деталями штампів є пуансон 1 і матриця 2 (рис. 40, в, г), які працюють як ножі замкнутої форми. Зазор Z між пуансоном та матрицею, що дорівнює $(0.05...0.1)S$, де S – товщина вихідної заготовки, забезпечується за рахунок зменшення діаметра пуансона в процесі вирізування (вирубкування) і за рахунок збільшення діаметра матриці під час пробивання.

Формозмінні операції листового штампування – це такі операції, коли плоска або порожниста заготовка перетворюється в просторову деталь потрібних форми та розмірів. До них належать:

✓ *Витягання* – процес одержання порожнистих виробів з плоскої вихідної заготовки без стоншування її стінки. Витяганням виготовляють кузови автомобілів, каструлі, гільзи тощо. Неглибокі деталі простої форми витягають за один перехід. Деталі більшої глибини, а також складної форми витягають за кілька послідовних переходів. У випадку багаторазового витягання діаметр деталі зменшується з кожним переходом, а глибина

збільшується. На рис. 41, а) показано схему витягання стакану діаметром d_1 з вихідної заготовки діаметром D . На рис. 41, б) показано схему другого переходу для одержання стакану діаметром d_2 із стакану діаметром d_1 , отриманого в першому переході.

Відношення зовнішнього діаметра одержаної деталі до діаметра вихідної заготовки називається коефіцієнтом витягання K . Для практичних розрахунків заготовок із сталі і сплавів кольорових металів користуються такими значеннями коефіцієнтів витягання:

➤ для першого переходу $K = d/D = 0.5...0.7$;

➤ для другого і наступних переходів

$$K_2 = K_3 = ... = K_i = d_1/d_2 = ... = d_i/d_{i-1} = 0.75...0.90,$$

де i – кількість переходів.

Зазор між пуансоном і матрицею Z має бути таким, щоб заготовку можна було затягнути в цей зазор. Зазвичай вибирають $Z = (1.2...1.3)S$, де S – товщина стінки. Для останнього переходу витягання $Z = 1.1S$.

✓ *Витягання зі стоншуванням стінки (редукування)* є додатковою операцією, яка застосовується для стоншування бічних стінок попередньо витягнутої деталі. Це досягається тим, що зазор між пуансоном і матрицею беруть меншим, ніж товщина вихідної заготовки, а робочий отвір матриці у верхній частині виконують конічним (рис. 41, в). За один перехід допускається стоншування стінки 40...60 %.

3. *Згинання* – операція, яка змінює напрямлення осі деталі. Під час згинання формозміна обмежується мінімальним радіусом інструмента R в зоні згинання. Залежно від пластичних властивостей металу радіус R вибирається таким, що дорівнює 0,1...0,2 товщини заготовки (рис. 41, г).

4. *Розбортування* полягає в утворенні борта в заготовці з попередньо пробитим отвором (рис. 41, д). Розбортуванням можна одержувати порожнисті заклепки, фланці, люки в днищах котлів та ін. Коефіцієнтом розбортування K_p називається відношення діаметра отвору у вихідній заготовці d_0 до діаметра борта d_1 . Допустиме без руйнування значення $K_p = 0.45...0.65$.

5. *Обтискання* – це місцеве зменшення поперечного перерізу порожнистого виробу, одержаного витяганням (рис. 41, е). Величина обтискання за один перехід становить 20...30%.

6. *Формування* – операція, яка виконується з метою одержання остаточного профілю (форми) чи більш точних розмірів попередньо витягнутого виробу. Прикладом формування є *випинання* – формування зсередини, коли опуклості, орнаменти, ребра тощо одержують тиском гуми або рідини. На рис. 41, ж) показано випинання попередньо витягнутого виробу за допомогою гумового вкладиша 6, на якого тисне зверху пуансон 2.

Більшість листоштампувальних робіт виконуються на кривошипних механічних пресах, яким властива надійність в роботі, економічність і простота в керуванні.

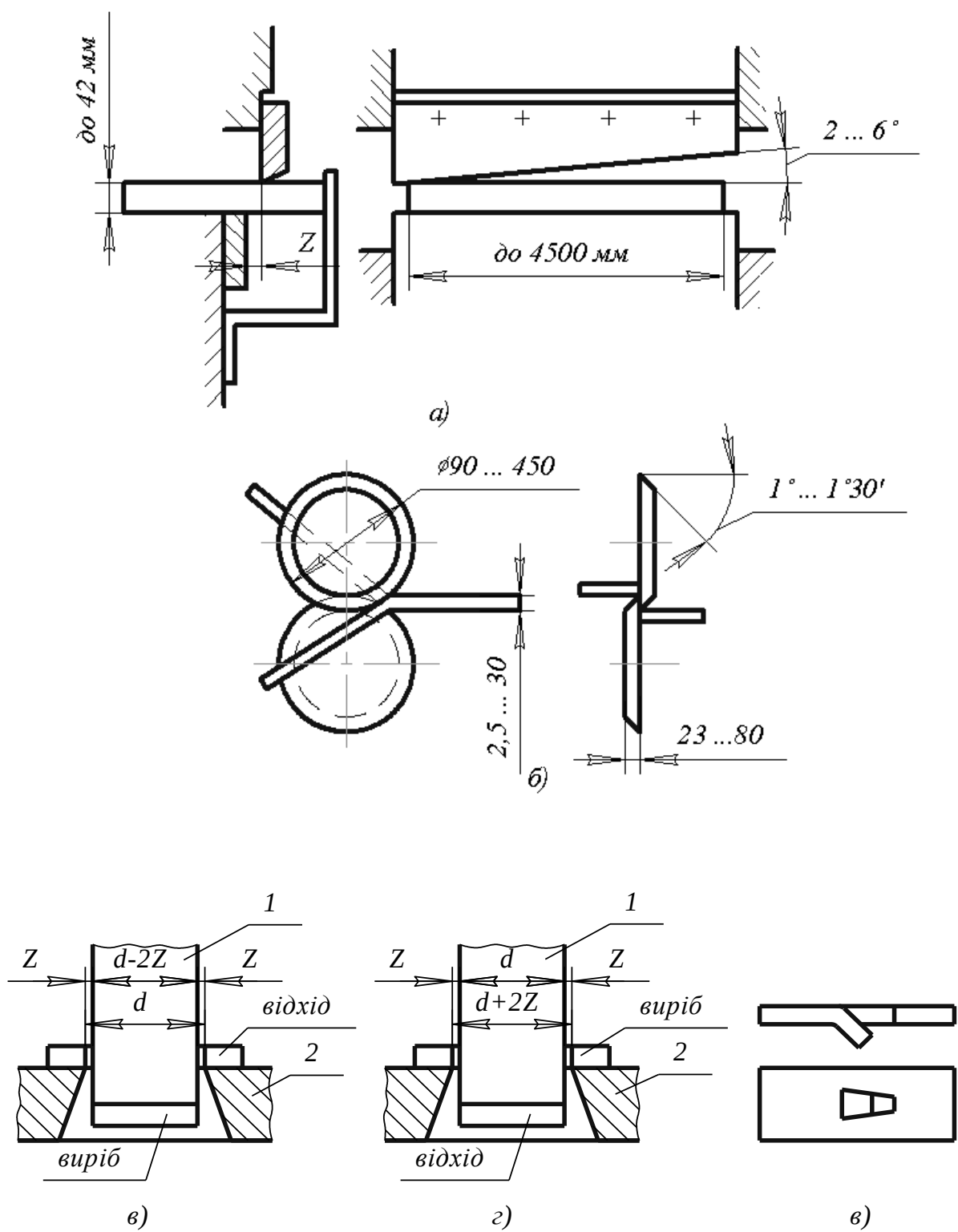


Рисунок 40 – Схеми роздільних операцій

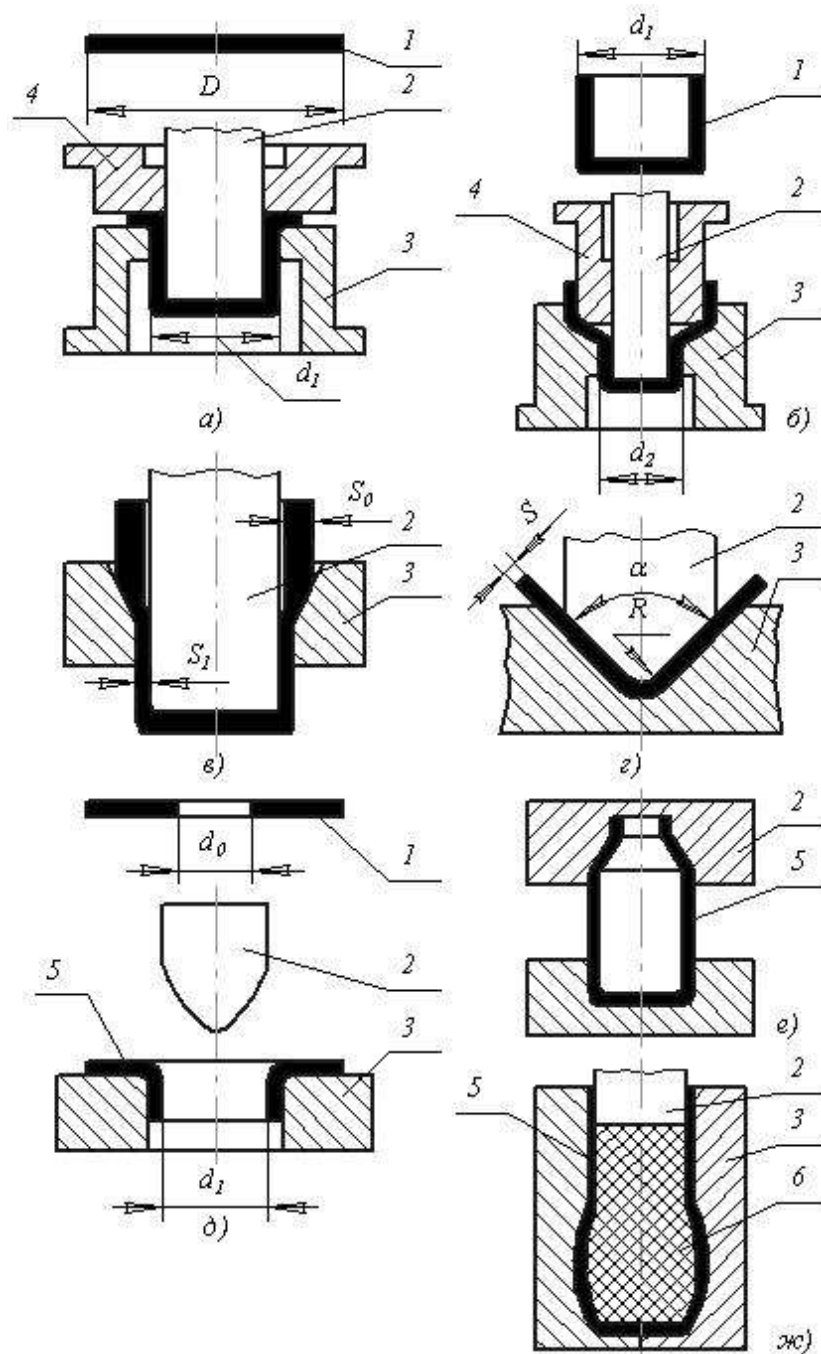
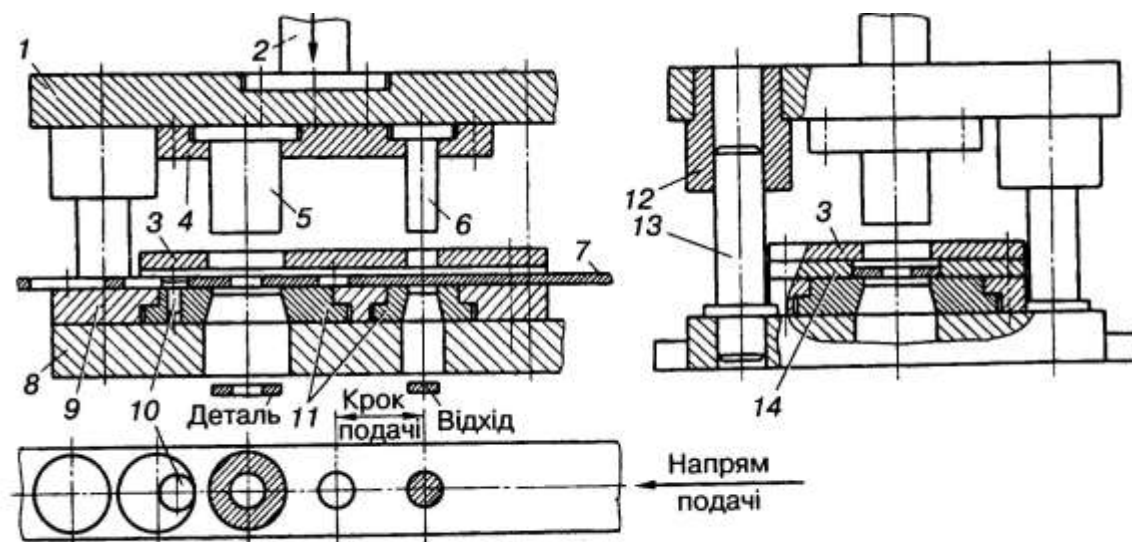


Рисунок 41 – Формозмінні операції листового штампування:

1 – вихідна заготовка; 2 – пуансон; 3 – матриця; 4 – притискувач; 5 – виріб;
6 – гумовий вкладиш

Інструментом для листового штампування є штамп, який складається із технологічних (робочих) і конструктивних деталей (блока). Перші безпосередньо забезпечують виконання технологічних операцій. До них належать пуансони, матриці, притискувачі, виштовхувачі, напрямні планки та інші. Другі потрібні для з'єднання всіх деталей штампа в єдину конструкцію і для закріплення штампа в пресі. Це верхня та нижня плити, хвостовик, напрямні колонки, скріплювальні деталі.

На рис. 42 показано штамп послідовної дії для виготовлення шайб з штаби. В ньому за один хід повзуна преса виконуються дві операції: пробивання отвору в одній деталі і вирізування контуру другої. Нижня плита штампа 8 болтами прикріплена до столу, а верхня плита 1 за допомогою хвостовика 2 – до повзуна преса. На нижній плиті у матрицетримачі 9 встановлено матриці 11, а на них дві напрямні пластини 14 і знімач 3. На верхній плиті в пуансонотримачі 4 закріплено пуансони вирубання 5 та пробивання 6. Точне спряження робочих деталей штампа забезпечується напрямними колонками 13, закріпленими в нижній плиті, і напрямними втулками 12. Процес штампування здійснюється так: штаба 7 подається в зазор під знімач. Коли верхня частина штампа опускається, пуансони 5 і 6 одночасно входять у відповідні матриці 11 і виконують відразу дві операції: вирізування і пробивання. Під час піднімання повзуна знімачем 3 штаба скидається з пуансонів. Перед наступним ударом штаба подається вперед до упора 10.



В штампах суміщеної дії одночасно з вирубуванням і пробиванням можуть здійснюватись також операції витягання, розбортовування, згинання тощо.

Розділ 4 ОСНОВИ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

4.1 ФІЗИЧНА СУТЬ І КЛАСИФІКАЦІЯ СПОСОБІВ ЗВАРЮВАННЯ

Зварюванням називається процес виготовлення нероз'ємних з'єднань твердих матеріалів за допомогою встановлення міжатомних зв'язків між зварюваними частинами за їх місцевого (спільного) нагрівання чи пластичного деформування або їх сумісної дії. Суть зварювання полягає у зближенні елементарних частинок зварюваних частин на такі відстані, щоб між ними почали діяти сили міжатомного зчеплення з утворенням спільної кристалічної ґратки. Ці відстані сумірні параметрам кристалічних ґраток і дорівнюють 3...4 ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$).

Зварювання є одним з основних технологічних процесів у машинобудуванні та будівництві. Важко назвати галузь народного господарства, де б не застосовувалося зварювання.

Зварювання дало змогу внести докорінні зміни в технологію виробництва, створити принципово нові конструкції машин. Наприклад, застосування зварних конструкцій замість клепаних у будівництві дозволило зекономити близько 20% металу, знизити на 5...30 % трудомісткість виготовлення конструкцій.

Залежно від виду енергії, застосовуваної в процесі зварювання, розрізняють три класи зварювання: термічний, термомеханічний і механічний (ГОСТ 19521—74).

До **термічного** класу належать види зварювання, що здійснюються плавленням, тобто місцевим розплавленням з'єднуваних частин із використанням теплової енергії.

Основні види зварювання термічного класу – дугове, газове, електрошлакове, електронно-променеве, плазмове, лазерне, термічне та ін.

До **термомеханічного** класу належать види зварювання, за яких використовується тепла енергія й тиск – контактне, дифузійне, газопресове, дугопресове та ін.

До **механічного класу** належать види зварювання, що здійснюються з використанням механічної енергії й тиску: холодне, вибухом, ультразвукове, тертям та ін.

Зварювання видами, які належать до термічного класу, називається *зварюванням плавленням*, а зварювання видами, що відносяться до термомеханічного і механічного класів – *зварюванням тиском*.

Крім того, кожний вид зварювання може бути розгорнутим за технічними та технологічними ознаками. Наприклад, дугове зварювання можна виконувати дугою прямої або посередньої дії, плавким або неплавким електродом, з захистом металу газом, флюсом тощо.

Найважливішими видами зварювання в сучасному машинобудуванні є дугове, контактне і газове.

Зварне з'єднання у разі зварювання плавленням (рис. 43, *а*) містить зварний шов 1, тобто ділянку зварного з'єднання, що утворилася внаслідок кристалізації зварювальної ванни; зону сплавлення 2, де перебувають зерна металу, що частково обплавилися, на межі основного металу та шва; зону термічного впливу 3, тобто ділянку основного металу, що не розплавилася, структура і властивості якого змінилися внаслідок нагрівання під час зварювання плавленням або різанням; основний метал 4, тобто метал з'єднуваних частин, що зварюються, який не змінив властивостей в процесі зварювання.

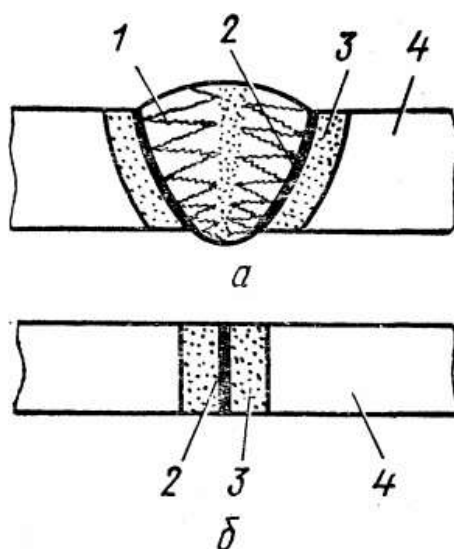


Рисунок 43 – Схема зварного з'єднання

З'єднання, виконане зварюванням тиском (рис. 43, *б*) у твердому стані, складається із зони з'єднання 2, де утворилися міжатомні зв'язки з'єднуваних частин, зони термомеханічного впливу 3, основного металу 4.

У формуванні структури та властивостей зварного з'єднання під час зварювання плавленням визначальна роль належить тепловим процесам, а у разі зварювання тиском – пластичній деформації.

4.2 ДУГОВЕ ЗВАРЮВАННЯ

4.2.1 Зварювальна дуга та її властивості

Джерелом теплоти за дугового зварювання є *електрична дуга*, яку відкрив у 1802 р. В. В. Петров. Вперше для зварювання електричну дугу застосував російський винахідник, родом з Херсонської губернії, М. М. Бенардос у 1882 р. Він використав у цьому випадку вугільний електрод, а в 1888 р. М. С. Слав'янов запропонував спосіб зварювання металевим електродом. Ці способи і зараз називаються іменами їх винахідників – спосіб Бенардоса, або зварювання неплавким (вугільним чи вольфрамо-

вим) електродом, і спосіб Слав'янова, або зварювання металевим плавким електродом.

Зварювальна дуга – це потужний електричний розряд у дуже іонізованій суміші газів та парів матеріалів, які використовуються під час зварювання, що супроводжується виділенням значної кількості теплоти і світла.

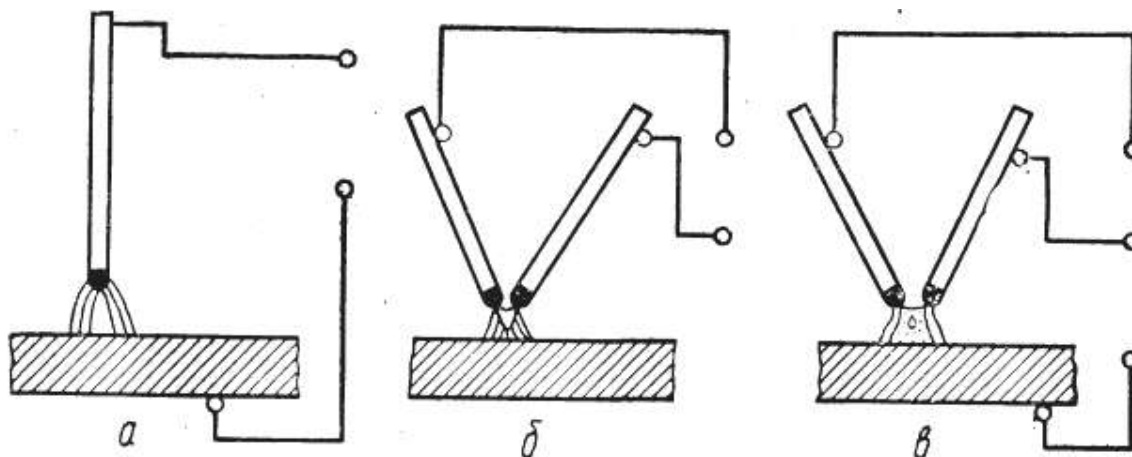


Рисунок 44 – Види зварювальних дуг:

а – прямої; *б* – посередньої; *в* – комбінованої дії (трифазна)

Залежно від числа електродів і способів увімкнення електродів та зварюваної деталі в електричне коло розрізняють такі види зварювальних дуг (рис. 44):

- прямої дії, коли дуга горить між електродом і виробом;
- посередньої дії, коли дуга горить між двома електродами, а зварюваний виріб не включений в електричне коло;
- трифазна дуга, що збуджується між двома електродами, а також між кожним електродом і основним металом.

За родом струму розрізняють дуги, що живляться змінним і постійним струмом. За використання постійного струму розрізняють зварювання на прямій та зворотній полярності. У першому випадку електрод вмикають у негативний полюс і він слугує катодом, а виріб – до позитивного полюса і він слугує анодом; у другому випадку електрод підключають до позитивного полюса і він слугує анодом, а виріб – до негативного і він слугує катодом.

Електричні властивості дуги. Для утворення та підтримання горіння дуги потрібно, щоб у просторі між електродами були електрично заряджені частинки – електрони, позитивні та негативні іони. Процес утворення іонів та електронів називається *іонізацією*, а газ, що містить електрони та іони – іонізованим. Іонізація дугового проміжку відбувається під час запалювання дуги і безперервно підтримується в процесі її горіння.

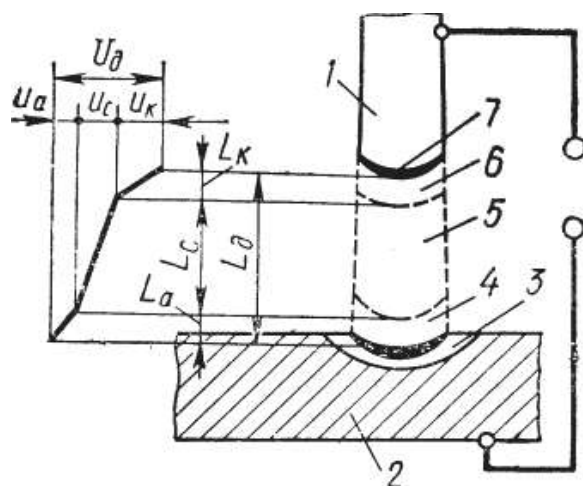


Рисунок 45 – Схема зварювальної дуги та спад напруги в ній:
 1 – електрод; 2 – виріб; 3 – анодна пляма; 4 – анодна ділянка дуги;
 5 – стовп дуги; 6 – катодна ділянка дуги; 7 – катодна пляма

У дуговому проміжку виділяють такі зони (рис. 45): катодну L_k та анодну L_a , де спостерігається значний спад напруги, викликаний утворенням біля електродів просторових зарядів (скупченням заряджених частинок), та розміщену між ними зону дугового розряду, що називається стовпом дуги L_c . Температура стовпа дуги становить близько $6000\text{ }^{\circ}\text{C}$. На поверхні анода та катода утворюються електродні плями, що являють собою основу стовпа дуги, через які проходить увесь зварювальний струм. Температура катодної плями становить $2400\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура анодної плями – $2600\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Загальна напруга зварювальної дуги відповідно складається із суми спаду напруги в окремих зонах дуги: $U_d = U_k + U_c + U_a$, де U_d , U_k , U_c , U_a – відповідно загальний спад напруги на дузі, в катодній зоні, стовпі дуги та анодній зоні, В.

Залежність напруги в зварювальній дузі від її довжини описується рівнянням

$$U_d = a + bL_d,$$

де a – сума спаду напруги в прикатодній та прианодній зонах, В;

L_d – довжина стовпа дуги, мм;

b – питомий спад напруги в дузі, віднесений до 1 мм стовпа дуги, В/мм.

У випадку зварювання сталевими електродами $a = 10$, а $b = 2\text{ В/мм}$.

Теплова потужність дуги. Основною характеристикою зварювальної дуги як джерела енергії для зварювання є ефективна теплова потужність $q_{дж}$. Ефективна теплова потужність джерела зварювального нагріву – це кількість теплоти, введеної в метал за одиницю часу і витраченої на його нагрівання. Ефективна теплова потужність є частиною загальної теплової потужності дуги q , бо якась кількість теплоти дуги непродуктивно ви-

трачається на тепловідведення в металі, випромінювання, нагрівання крапель під час розбризкування.

Відношення ефективної теплової потужності до повної теплової потужності джерела теплоти називається ефективним коефіцієнтом корисної дії (ККД) процесу нагрівання $\eta_{дж} = q_{дж}/q$.

Повну теплову потужність зварювальної дуги, тобто кількість теплоти, що виділяється дугою за одиницю часу, наближено вважають такою, що дорівнює тепловому еквіваленту її електричної потужності

$$q = IU_{д},$$

де I – величина зварювального струму, A ;

$U_{д}$ – спад напруги на дузі, B .

Відповідно ефективна теплова потужність визначається виразом

$$q_{дж} = IU_{д}\eta_{дж}.$$

Значення $\eta_{дж}$ може змінюватися від 0.3 до 0.95 і для різних видів зварювання орієнтовно становить: відкрита вугільна дуга – 0.5...0.65; дуга в аргоні – 0.5...0.6; зварювання штучними покритими електродами – 0.7...0.75; зварювання під флюсом – 0.85...0.93.

Кількість теплоти, що вводиться в метал джерелом нагріву і віднесена до одиниці довжини шва, називається погонною енергією зварювання. Погонна енергія, $Дж/м$, дорівнює відношенню ефективної потужності джерела теплоти (дуги) $q_{дж}$ до швидкості переміщення дуги

$$v: q_{дж}/v = IU_{дж}/v.$$

Під час утворення зварювального шва ефективна теплова потужність дуги витрачається на розплавлення основного та присаджувального металів.

4.2.2 Джерела струму для дугового зварювання

Для живлення зварювальної дуги застосовують джерела змінного струму (зварювальні трансформатори) та джерела постійного струму – зварювальні генератори з приводом від електродвигуна (зварювальні перетворювачі), зварювальні генератори з приводом від двигуна. внутрішнього згоряння (зварювальні агрегати) та напівпровідникові зварювальні випрямлячі.

Зварювальні трансформатори завдяки своїм техніко-економічним показникам мають переваги порівняно з джерелами постійного струму. Вони простіші в експлуатації, довговічніші, мають вищий ККД.

Джерела постійного струму вигідніші в технологічному відношенні: за їх застосування підвищується стійкість горіння дуги, поліпшуються умови зварювання в різних просторових положеннях.

Вимоги до джерел живлення для дугового зварювання. Щоб забезпечити стійкість горіння дуги, джерела живлення для дугового зварювання мають задовольняти такі вимоги:

- мати напругу холостого ходу, тобто напругу на затискачах джерела струму за розімкнутого зварювального кола, достатню для легкого збудження дуги та стійкого її горіння, але щоб не перевищувала норм безпеки праці, тобто не більше як 80...90 В;
- мати достатню потужність для виконання зварювальних робіт;
- забезпечувати струм короткого замикання, що не перевищує встановлених значень, щоб джерело струму витримувало тривалі короткі замикання зварювального кола без перегріву та пошкодження обмотки, за умови достатньої стабільності процесу;
- мати гарні динамічні властивості, тобто забезпечувати швидке відновлення напруги дуги після коротких замикань;
- мати пристрої для плавного регулювання дуги зварювального струму;
- мати задану зовнішню характеристику.

Зовнішньою характеристикою джерела живлення називається залежність між напругою на його вихідних клеммах і струмом у зварювальному колі. Зовнішні характеристики (рис. 46) можуть бути таких основних видів: крутоспадна 1, пологоспадна 2, жорстка 3, зростаюча 4.

Джерело струму з відповідною зовнішньою характеристикою вибирають залежно від вольт-амперної характеристики дуги.

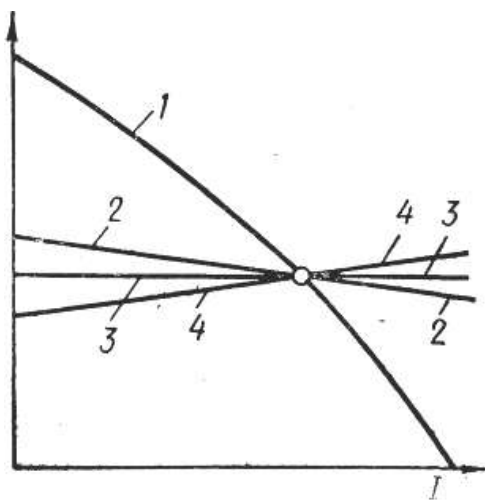


Рисунок 46 – Основні типи зовнішніх характеристик джерел живлення для дугового зварювання

Вольт-амперною характеристикою (ВАХ) дуги називається залежність напруги дуги від зварювального струму (рис. 47). ВАХ має три зони – спадну I, жорстку II, зростаючу III. Це пов'язано з тим, що для дугового розряду опір не стала величина, бо кількість заряджених частинок у ньому залежить від інтенсивності іонізації, переважно від струму. Тому ефектична дуга в газах не підпорядковується закону Ома і ВАХ є звичайно нелінійною. За малих струмів до 100 А (I зона) із збільшенням струму інтенсивно зростає число заряджених частинок (переважно внаслідок розігрівання та зростання емісії катода), опір стовпа дуги зменшується, тому спа-

дає потрібна для підтримання розряду напруга й характеристика дуги буде спадною. Під час подальшого зростання струму (*II* зона) стовп дуги починає стискатися, об'єм газу, що бере участь у перенесенні заряду, зменшується, це призводить до меншої швидкості зростання числа заряджених частинок. Тому напруга дуги стає мало залежною від струму, а характеристика стає пологою та жорсткою. Подальше збільшення струму характеризується сильним стисканням стовпа дуги (*III* зона), і вольт-амперна крива стає зростаючою, що вказує на збільшення енергії, яка витрачається всередині дуги.

Зони *I* та *II* ВАХ відповідають режимам зварювання, що застосовують в процесі ручного зварювання плавким покритим електродом, а також неплавким електродом у середовищі захисних газів. Механізоване зварювання під флюсом відповідає *II* зоні і частково захоплює *III* зону за умови використання тонких електродних дротів і підвищеної густини струму; зварювання плавким електродом у захисних газах відповідає *III* зоні ВАХ. Для живлення дуги із спадною чи жорсткою ВАХ застосовують джерела живлення із спадною чи пологоспадною зовнішньою характеристикою. Для живлення дуги зі зростаючою ВАХ застосовують джерела струму з жорсткою чи зростаючою зовнішньою характеристикою.

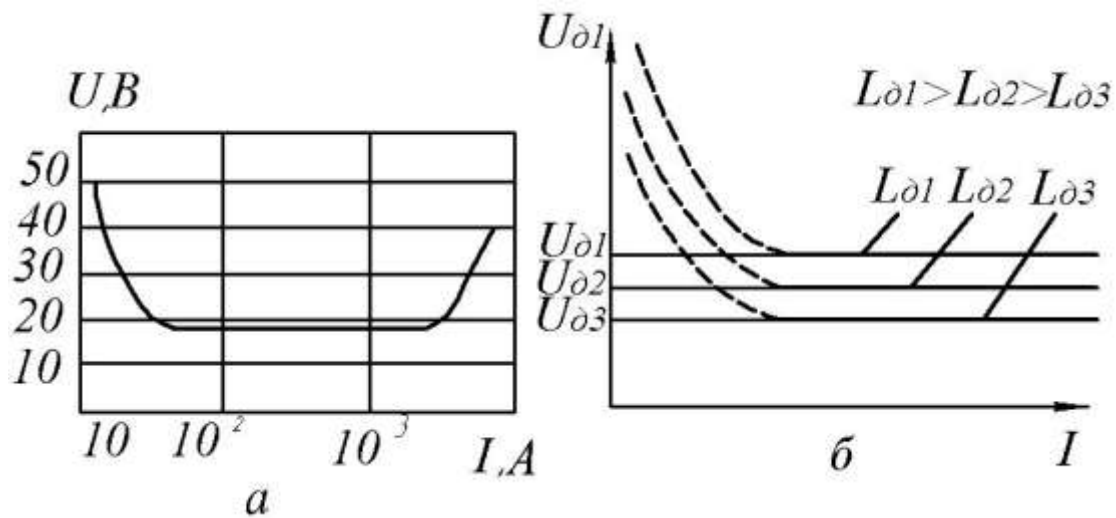


Рисунок 47 – Вольт-амперна характеристика дуги:

а – загальний вигляд, *б* – залежність напруги дуги U_d від її довжини L_d

Зварювальні трансформатори. Це спеціальні знижувальні трансформатори, зовнішня характеристика яких забезпечує живлення зварювальної дуги та регулювання зварювального струму. Трансформатори, як правило, мають спадну характеристику, їх використовують для ручного дугового зварювання та автоматичного зварювання під флюсом. Трансформатори з жорсткою характеристикою застосовують для електрошлакового зварювання.

Трансформатор складається з осердя – магнітопроводу з трансформаторної сталі, на якому розміщуються дві обмотки – первинна й вторинна. Змінний струм з мережі, проходячи через первинну обмотку трансформатора, намагнічує осердя, створюючи в ньому змінний магнітний потік, який, перетинаючи витки вторинної обмотки, індукуює в ній змінний струм.

Напруга індукованого струму залежить від числа витків вторинної обмотки: чим менше витків, тим напруга індукованого струму буде меншою і, навпаки, чим більше витків, тим напруга вища. Регулювання величини зварювального струму й створення зовнішньої характеристики забезпечується зміною потоку магнітного розсіяння шляхом регулювання відстані між первинною I і вторинною II обмотками (рис. 48, в) або вмиканням у зварювальне коло додаткової дросельної (реактивної) обмотки III (рис. 48, а), б). Під час проходження зварювального струму у витках дросельної обмотки індукуються електрорушійна сила (ЕРС) самоіндукції, яка має напрям, протилежний напрямку основної ЕРС трансформатора. Тому напруга, підведена до дуги, знижується від значення холостого ходу (60...80 В) до 18...30 В під час горіння дуги і майже до нуля у разі короткого замикання.

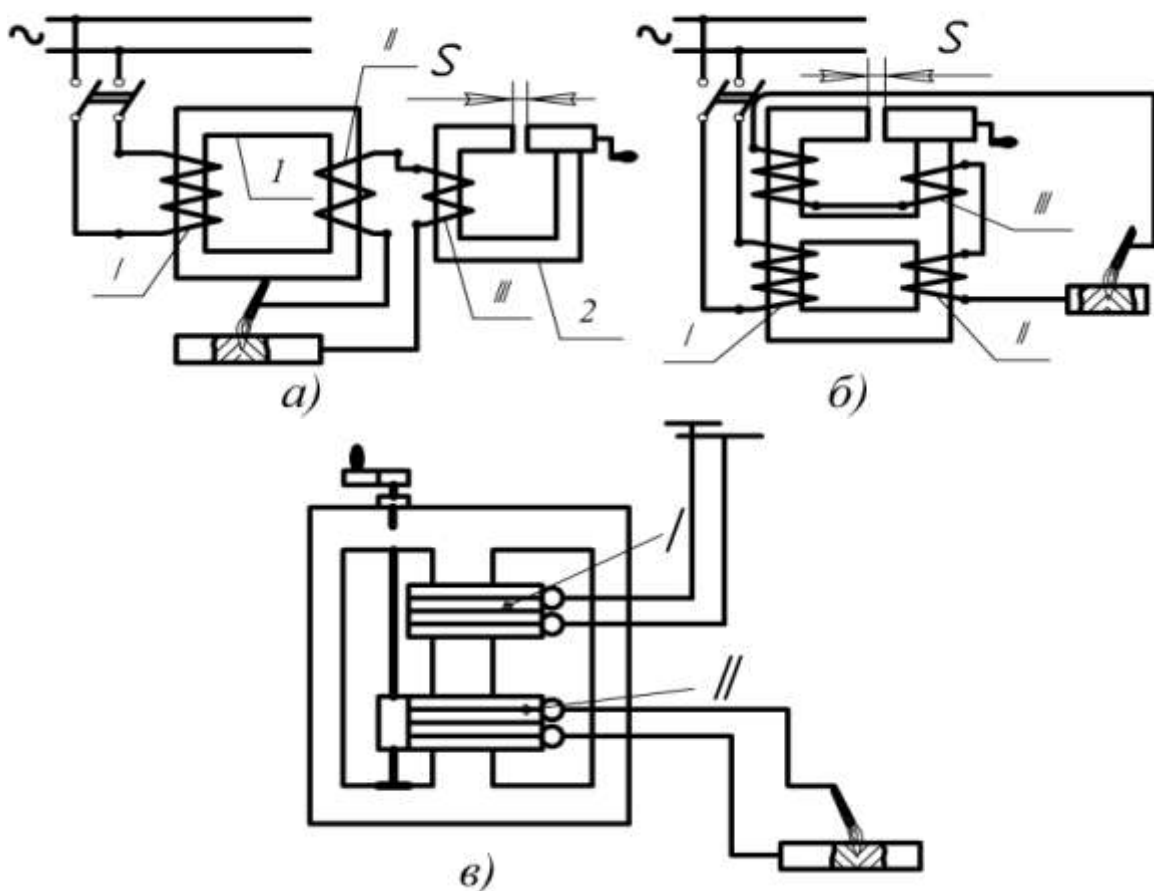


Рисунок 48 – Схеми зварювальних трансформаторів

Дросельна обмотка III може бути розміщена на окремому осерді 2 (рис. 48, *а*) або на спільному з обмотками I і II осерді (рис. 48, *б*) і вмикається послідовно з вторинною обмоткою трансформатора. Струм у трансформаторах з дросельними обмотками регулюють зміною повітряного зазору S між рухомою і нерухомою частинами осердя. Із збільшенням зазору самоіндукція дроселя, яка залежить від магнітного потоку осердя, зменшується, а напруга на дузі і зварювальний струм – збільшуються. Зменшення зазору зумовлює зворотнє явище.

Зараз на зміну розглянутим типам джерел, які ще широко використовуються в промисловості, приходить нове покоління джерел живлення з використанням тиристорів, модуляторів і мікропроцесорів, що мають кращі експлуатаційні характеристики.

4.3 РУЧНЕ ДУГОВЕ ЗВАРЮВАННЯ

4.3.1 Суть процесу

Найобсяжнішим серед інших видів зварювання є ручне дугове зварювання – зварювання плавленням штучними електродами, за якого подача електрода та переміщення дуги вздовж зварюваних кромок виконуються вручну. Схему процесу показано на рис. 49. Дуга горить між стержнем 1 електрода та основним металом 7. Під дією теплоти дуги електрод і основний метал плавляться, утворюючи металеву зварювальну ванну 4. Краплі 8 рідкого металу з електродного стержня, що розплавляється, переносяться у ванну через дуговий проміжок.

Одночасно із стержнем плавиться покриття 2 електрода, утворюючи газовий захист 3 навколо дуги та рідку шлакову ванну на поверхні розплавленого металу.

Металева та шлакова ванни разом утворюють зварювальну ванну. Із рухом дуги метал зварювальної ванни твердне й утворюється зварний шов 6. Рідкий шлак із остиганням утворює на поверхні шва тверду шлакову кірку 5, яка видаляється після остигання шва. Щоб забезпечити заданий склад і властивості шва, зварювання виконують покритими електродами, до яких висуваються спеціальні вимоги.

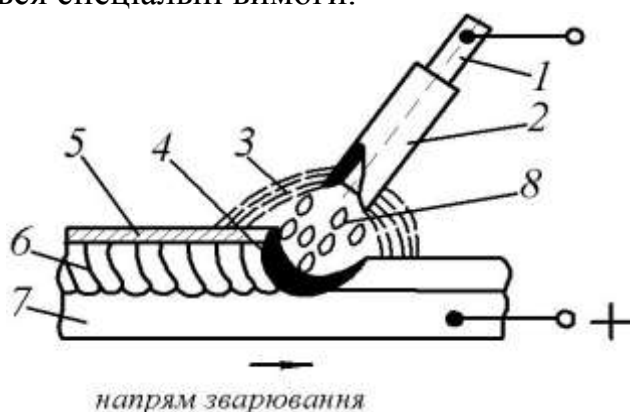


Рисунок 49 – Ручне дугове зварювання металевим електродом з покриттям

Зварювальний пост для ручного дугового зварювання оснащують джерелом живлення, струмопідводом, потрібними інструментами. Схему живлення дуги показано на рис. 50. Зварювальні пости можуть бути стаціонарними та пересувними.

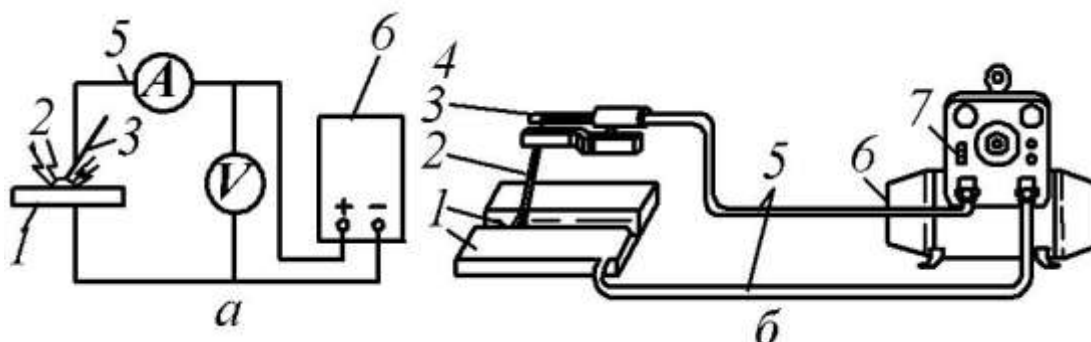


Рисунок 50 – Схема живлення дуги за ручного дугового зварювання (на постійному струмі):

a – електрична схема; *б* – загальне компонування поста для зварювання;
1 – виріб; *2* – зварювальна дуга; *3* – електрод; *4* – електродотримач; *5* – зварювальні проводи; *6* – джерело живлення; *7* – щит з приладами контролю та регулювання параметрів режиму зварювання

До *стаціонарних постів* належать пости, розташовані в цеху, переважно в окремих зварювальних кабінах, в яких зварюють вироби невеликих розмірів.

Пересувні зварювальні пости, як правило, застосовують під час монтажу великогабаритних виробів (трубопроводи, металоконструкції, посудини) та ремонтних робіт. Часто використовують переносні джерела живлення.

Залежно від зварюваних матеріалів та застосовуваних електродів для ручного дугового зварювання застосовують джерела змінного чи постійного струму з крутоспадною характеристикою.

4.3.2 Електроди для ручного дугового зварювання

Плавкі електроди для ручного дугового зварювання – це стержні завдовжки до 450 мм із зварювального дроту, на які нанесено шар покриття.

Для дугового зварювання та наплавлення застосовується спеціальний зварювальний та наплавний дріт.

ГОСТ 2246-70 передбачає 77 марок сталевого зварювального дроту різного хімічного складу; 6 марок з низьковуглецевої сталі (Св-08, Св-08А, Св-08АА, Св-08ГА, Св-10ГА, Св-10Г2); 30 марок з легованої сталі (Св-08ГС, Св-08Г2С, Св-18ХГС та ін.); 41 марку з високолегованої сталі (Св-12Х11НМФ, Св-10Х17Т, Св-06Х19Н9Т).

У легованій сталі легувальних елементів міститься від 2.5 до 10%, у високолегованій – більше як 10%.

Літери та цифри в написанні марок дроту позначають: Св – зварювальний, цифра після Св – вміст вуглецю в сотих частках процента (наприклад, 08 означає 0.08 % вуглецю); А – знижений, АА – ще більш знижений вміст сірки та фосфору; літери – умовні позначення легувальних елементів; цифри після них – середній вміст легувальних елементів у процентах.

Сталевий зварювальний дріт, призначений для всіх видів зварювання плавленням та виготовлення електродів, випускають за ГОСТ 2246-70 таких діаметрів: 0.3; 0.5; 0.8; 1.0; 1.2; 1.4; 1.6; 2.0; 2.5; 3.0; 4.0; 5.0; 6.0; 8.0; 10.0 та 12.0 мм.

Сталевий наплавний дріт за ГОСТ 10543-82 виготовляється діаметром від 0.3 до 8.0 мм: з вуглецевої сталі – 9 марок (Нп-25, Нп-40 та ін.), з легованої сталі – 11 марок (Нп-40Г, Нп-50Г, Нп-30ХГСА та ін.), із високолегованої сталі – 11 марок (Нп-20Х14, Нп-30Х13, Нп-30Х10Г10Т та ін.). Дріт використовується для наплавлення під флюсом, у захисних газах, електрошлакового наплавлення та виготовлення покритих електродів для ручного наплавлення. Марку дроту вибирають залежно від призначення та потрібної твердості наплавленого металу.

До складу покриття, нанесеного на металеві стержні зі зварювального дроту, входять такі компоненти:

- газотвірні – неорганічні речовини (мармур CaCO_3 , магнезит MgCO_3 та ін.) та органічні речовини (крохмаль, харчове борошно і т. ін.);
- шлакоутворювальні, що становлять основу покриття – звичайно це руди (марганцева, титанова), мінерали (ільменитовий та рутиловий концентрати, польовий шпат, кремнезем, граніт, крейда, плавиковий шпат та ін.);
- легувальні елементи та елементи-розкислювачі – Si , Mn , Ti та ін., що використовуються у вигляді сплавів цих елементів із залізом, так званих феросплавів; Al вводиться в покриття у вигляді порошку – пудри;
- зв'язувальні компоненти – водні розчини силікатів натрію та калію, які називають натрієвим і калієвим рідким склом, а також натрієво-калієвим рідким склом;
- формові домішки – речовини, що надають покриттю кращі пластичні властивості (бетоніт, каолін, декстрин, слюда та ін.).

Для підвищення продуктивності зварювання в покриття додають залізний порошок до 60 % маси покриття.

За видом покриття електроди класифікуються: з кислим покриттям – А; основним – Б; целюлозним – Ц; рутиловим – Р; змішаного виду – відповідне подвійне позначення, іншими видами покриттів – П. Якщо покриття містить залізний порошок у кількості, більшій як 20%, до позначення виду покриття додають букву Ж.

Кислі покриття А (електроди АНО-2, СМ-5 та ін.) складаються переважно з оксидів заліза та марганцю (звичайно у вигляді руди), кремнезему,

феромарганцю. Електроди з кислим покриттям технологічні, проте оксиди марганцю роблять їх токсичними.

Рутилові покриття Р (електроди АНО-3, АНО-4, ОЗС-3, ОЗС-4, ОЗС-6, МР-3, МР-4 та ін.) мають у своєму складі переважну кількість рутилу TiO_2 . Рутилові покриття технологічні, менш шкідливі для органів дихання зварника, ніж інші.

Целюлозні покриття Ц (електроди ВСЦ-1, ВСЦ-2, ОЗЦ-1 та ін.) складаються з целюлози, органічної смоли, феросплавів, тальку та ін. Ці покриття зручні для зварювання у будь-якому просторовому положенні, але дають наплавлений метал зниженої пластичності.

Основні покриття Б (електроди УОНИ-13/45, УП-1/45, ОЗС-2, ДСК-50 та ін.) не містять оксидів заліза та марганцю. Наприклад, покриття марки УОНИ-13/45 складається з мармуру, плавикового шпату, кварцового піску, феросиліцію, феромарганцю, феротитану, рідкого скла. Метал шва, виконаний електродом з основним покриттям, має більшу пластичність. Цими електродами зварюють відповідальні конструкції.

За товщиною покриття залежно від співвідношення діаметра електрода (D) та діаметра сталевих стержня (d) розрізняють електроди:

- із тонким покриттям ($D/d < 1,20$) – М;
- із середнім покриттям ($1,20 < D/d < 1,45$) – С;
- з товстим покриттям ($1,45 < D/d < 1,80$) – Д;
- з особливо товстим покриттям ($D/d > 1,88$) – Г.

За якістю, тобто точністю виготовлення, станом поверхні покриття, суцільністю виконаного цими електродами металу шва, за вмістом сірки та фосфору в наплавленому металі електроди поділяють на групи 1, 2 і 3. Чим вищий номер, тим краща якість.

За допустимими просторовими положеннями зварювання та наплавлення електроди поділяють на такі групи: 1 – для всіх положень; 2 – для всіх положень, крім вертикального зверху до низу; 3 – для нижнього, горизонтального на вертикальній площині та вертикального знизу вгору; 4 – для нижнього.

Класифікація сталевих покритих електродів. Металеві електроди для дугового зварювання сталей та наплавлення виготовляють згідно з ГОСТ 9466-75 «Електроди покриті металеві для ручного дугового зварювання сталей і наплавлення. Класифікація, розміри та загальні технічні вимоги». Сталеві покриті електроди для ручного дугового зварювання та наплавлення поділяються за призначенням (ГОСТ 9467-75):

- для зварювання вуглецевих і низьколегованих конструкційних сталей стандарт передбачає 14 типів електродів (Э38, Э42, Э42А, Э46, Э46А, Э50, Э50А, Э55, Э60, Э70, Э85, Э100, Э125, Э150);
- для зварювання легованих теплостійких сталей – дев'ять типів електродів, зокрема Э-09МХ, Э-09Х1М, Э-09М та ін;
- для зварювання високолегованих сталей з особливими властивостями – 49 типів (ГОСТ 10052-75): Э-12Х13, Э-10Х17Н13С4 та ін;

➤ для наплавлення поверхневих шарів з особливими властивостями – 44 типи (ГОСТ 10051-75): Э-10Г2, Э-30Г2ХМ, Э-10Х2ГМ, Э-90Х4М4ВФ, Э-105В6Х5М3Ф3 та ін.

4.3.3 Види зварних з'єднань

Зварні з'єднання можуть бути стиковими, кутовими, тавровими та внапусток (рис. 51).

Стиковим називається зварне з'єднання двох елементів, розміщених в одній площині або на одній поверхні.

Кутовим називається з'єднання двох елементів, розміщених під прямим кутом і зварених у місці примикання їхніх країв.

З'єднанням *внапусток* називається зварне з'єднання, в якому зварювані елементи розміщені паралельно і перекривають один одного.

Тавровим називається зварне з'єднання, в якому до бічної поверхні одного елемента примикає під кутом приварений торцем інший елемент.

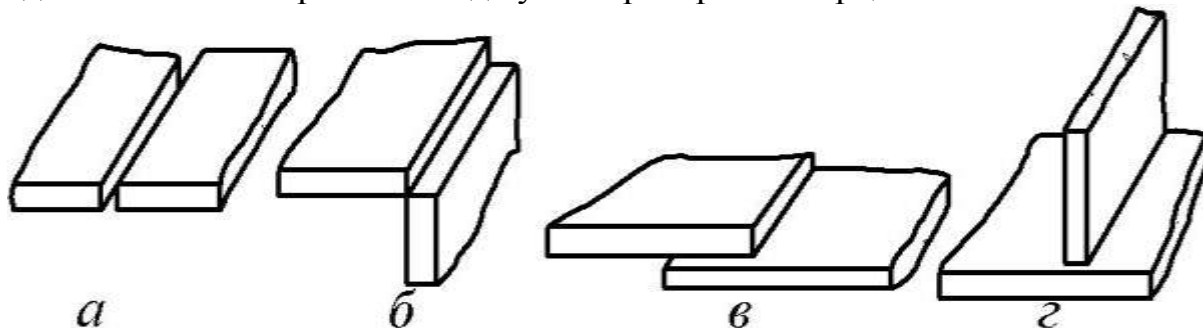


Рисунок 51 – Зварні з'єднання:

а – стикове; б – кутове; в – внапусток; г – таврове

Зварний шов – ділянка зварного з'єднання, що утворилася внаслідок кристалізації металу зварювальної ванни. Частина зварного шва, що перебуває під час зварювання в рідкому стані, називається зварювальною ванною. Зварні шви можуть бути стиковими та кутовими (рис. 52). Стиковий шов – зварний шов стикового з'єднання. Кутовий шов – зварний шов кутового, таврового з'єднань та з'єднання внапусток.

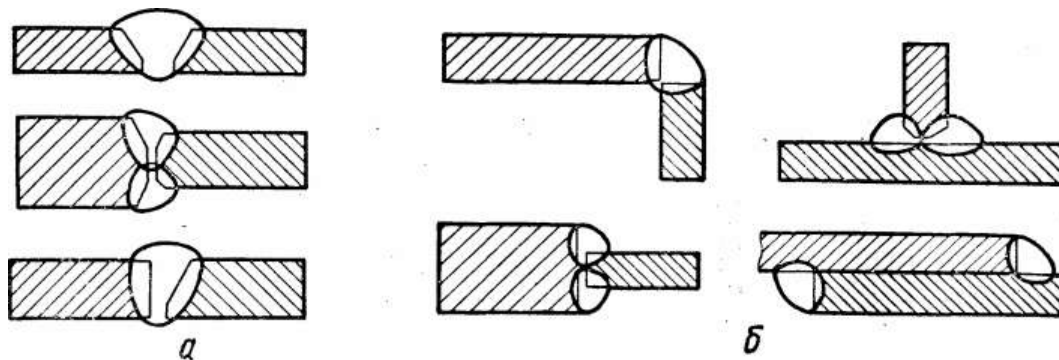


Рисунок 52 – Зварні шви:

а – стикові; б – кутові

Зварні шви можуть бути безперервними, переривчастими, одно- та багат шаровими, одно- та двосторонніми. Зварні шви, застосовувані для фіксації взаємного розміщення, розмірів і форми елементів, що складаються під зварювання, називаються прихватками.

На рис. 53 показано основні положення швів у просторі.

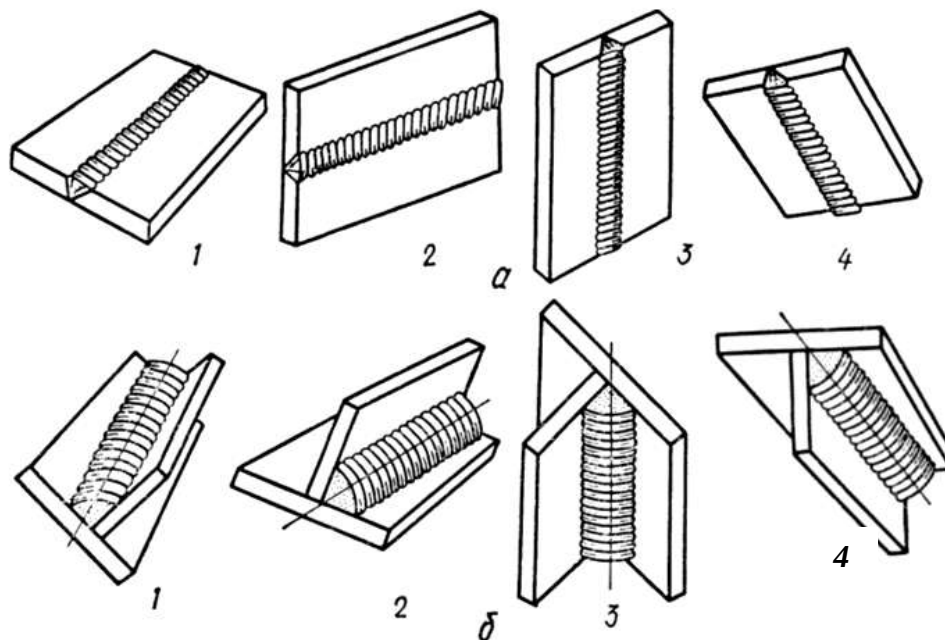


Рисунок 53 – Просторове положення зварних швів:

a – стикові; *б* – кутові;

1 – нижнє; 2 – горизонтальне; 3 – вертикальне; 4 – стельове

Щоб забезпечити якісний провар і формування зварного шва, кромки готують під зварювання. Елементи геометричної форми підготовки кромки під зварювання (рис. 54, *a*) – кут розчищення кромки α , кут β скошу однієї кромки 5, зазор b між кромками, що стикуються, притуплення кромки, тобто нескошена частина c торця кромки.

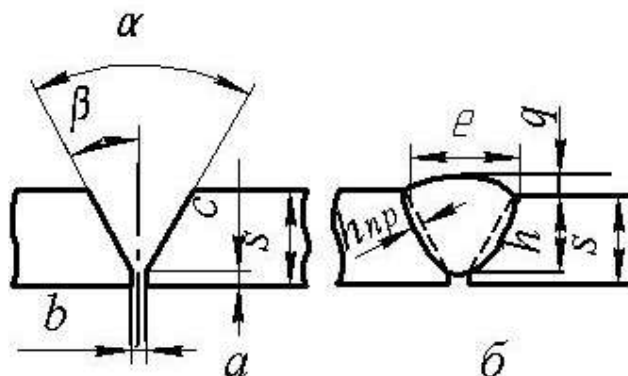


Рисунок 54 – Елементи геометричної форми підготовлених кромки під зварювання (*a*) та виконаного шва (*б*)

Елементи геометричної форми зварного шва (рис. 54, *б*) – ширина e та глибина h шва, глибина $h_{пр}$ провару, випуклість q (угнутість) шва.

Залежно від конструктивних особливостей виробу та виду зварювання до підготовки та складання деталей висувають різні вимоги.

Державні стандарти регламентують основні типи та конструктивні елементи швів зварних з'єднань:

ГОСТ 5264-80 – для ручного дугового зварювання;

ГОСТ 8713-79 – для автоматичного та механізованого зварювання під флюсом;

ГОСТ 14771-76 – для дугового зварювання в захисних газах;

ГОСТ 15164-78 – для електрошлакового зварювання;

ГОСТ 15878-79 – для контактного зварювання та ін.

ГОСТ 2.312-72 встановлює графічне зображення та позначення зварних швів.

4.3.4 Технологія ручного дугового зварювання

Вибір режиму ручного дугового зварювання. Під режимом зварювання розуміють сукупність контрольованих параметрів, що визначають умови зварювання. Параметри режиму зварювання поділяють на основні та додаткові. До основних параметрів режиму ручного зварювання належать діаметр електрода, величина, рід і полярність струму, напруга на дузі, швидкість зварювання. До додаткових належать: величина вильоту електрода, склад і товщина покриття електродів, положення електрода та положення виробу під час зварювання.

Діаметр електрода вибирають залежно від товщини металу, катета шва, положення шва в просторі.

Приблизне співвідношення між товщиною металу S і діаметром електрода d_e за зварювання в нижньому положенні шва становить:

$S, \text{мм}$	1...2	3...5	4...10	12...24	30...60
$d_e, \text{мм}$	2...3	3...4	4...5	5...6	6...8

Сила струму, переважно, залежить від діаметра електрода, але також від довжини його робочої частини, складу покриття, положення зварного шва. Чим більший струм, тим більша продуктивність, тобто більша кількість наплавленого металу.

Проте у разі надмірного струму для цього діаметра електрода електрод швидко перегрівається вище допустимої межі, що призводить до зниження якості шва та підвищеного розбризкування. У випадку недостатньої сили струму дуга нестійка, часто обривається, в шві можуть бути непровари.

Силу струму можна визначити за такими формулами:

$I_d = (20 + 6d_e)d_e$ – за зварювання конструкційних сталей для електродів діаметром 3...6 мм;

$I_d = 30d_e$ – для електродів діаметром менше 3 мм, де d_e – діаметр електрода, мм.

Зварювання швів у вертикальному та стельовому положеннях виконують, як правило, електродами діаметром, не більшим за 4 мм. У цьому випадку сила струму має бути на 10...20 % нижчою, ніж для зварювання в нижньому положенні. Напруга дуги змінюється в порівняно вузьких межах – 16...30 В.

Техніка зварювання. Дуга може збуджуватися двома прийомами: дотиком впритул і відведенням перпендикулярно вгору або «чирканням» електродом як сірником. Другий спосіб зручніший, але непридатний у вузьких і незручних місцях.

У процесі зварювання потрібно підтримувати певну довжину дуги, яка залежить від марки та діаметра електрода. Орієнтовно нормальна довжина дуги має бути $L_d = (0.5...1.1)d_e$.

Довжина дуги істотно впливає на якість зварного шва та його геометричну форму. Довга дуга сприяє інтенсивнішому окисленню та азотуванню розплавлюваного металу, збільшує розбризкування. Під час зварювання електродами основного типу виникає пористість металу.

У процесі зварювання електроду надається рух у трьох напрямках.

Перший рух – поступальний, за напрямом осі електрода. Цим рухом підтримується стала (у певних межах) довжина дуги залежно від швидкості плавлення електрода.

Другий рух – переміщення електрода вздовж осі валика для утворення шва. Швидкість цього руху встановлюється залежно від сили струму, діаметра електрода, швидкості його плавлення, виду шва та інших факторів. Коли немає поперечних рухів електрода, дістаємо так званий нитковий валик, на 2...3 мм більший за діаметр електрода, або вузький шов завширшки $e < 1,5d_e$.

Третій рух – переміщення електрода поперек шва, щоб дістати шов ширший, ніж нитковий валик, так званий розширений валик.

Поперечні коливальні рухи кінця електрода (рис. 55) визначаються формою розчищення, розмірами та положенням шва, властивостями зварюваного матеріалу, навичками зварника. Для широких швів, які дістають з поперечними коливаннями, $e = (1.5...5)d_e$.

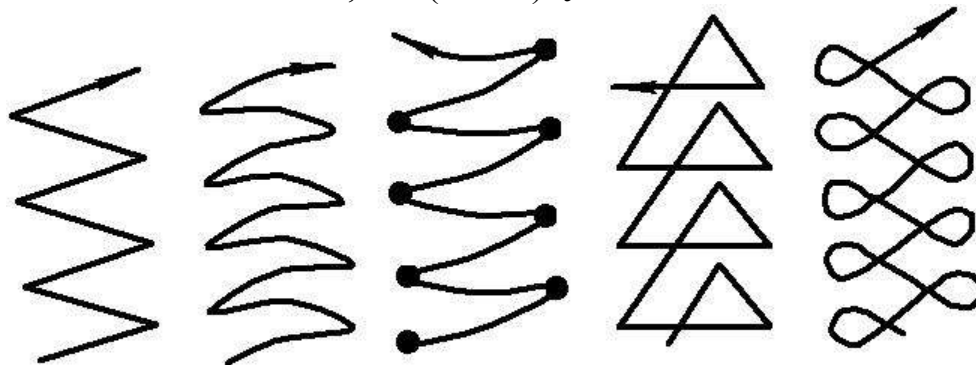


Рисунок 55 – Траєкторія руху кінця електрода при ручному дуговому зварюванні

Для підвищення роботоздатності зварних конструкцій, зменшення внутрішніх напруг і деформацій велике значення має порядок заповнення швів.

Під порядком заповнення шва розуміють як порядок заповнення розчищення шва в поперечному перерізі, так і послідовність зварювання по довжині шва.

За довжиною усі шви умовно можна поділити на три групи: короткі – до 300 мм, середні – 300...1000, довгі – більше 1000 мм.

Залежно від довжини шва, матеріалу, вимог до точності та якості зварних з'єднань зварювання таких швів може виконуватися по-різному (рис. 56).

Короткі шви виконують на прохід – від початку шва до його кінця. Шви середньої лінії зварюють від середини до кінців або зворотноступінчастим методом. Шви довгі виконують двома способами: від середини до країв (зворотноступінчастий метод) і врозкид.

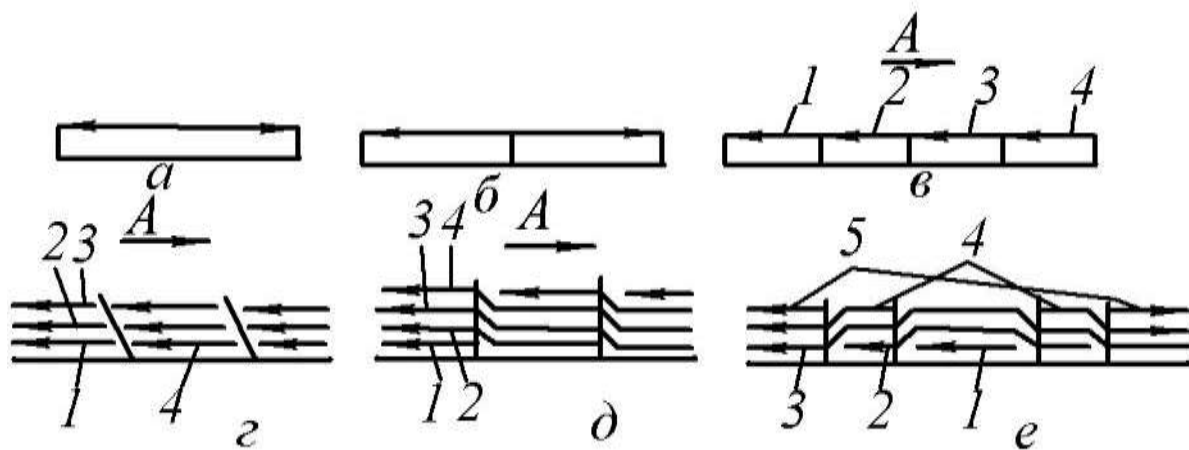


Рисунок 56 – Схеми зварювання:

а – на прохід; *б* – від середини до країв;
в – зворотноступінчастим способом; *г* – блоками; *д* – каскадом; *е* – гіркою;
А – напрям заповнення розчищення (стрілками показано напрям зварювання);
1 – *5* – послідовність зварювання в кожному шарі

За зворотноступінчастого методу весь шов розбивається на невеликі ділянки завдовжки по 150...200 мм, на кожній ділянці зварювання ведуть у напрямі, протилежному загальному напрямку зварювання. Довжина ділянок звичайно дорівнює від 100 до 350 мм. Залежно від кількості проходів (шарів), потрібних для виконання проєктного перерізу шва, розрізняють однопрохідний (одношаровий) та багатопрохідний (багатошаровий) шви (рис. 57).

З погляду продуктивності найдоцільнішими є однопрохідні шви, які зазвичай застосовують під час зварювання металу невеликих товщин (до 8...10 мм) з попереднім розчищенням кромки.

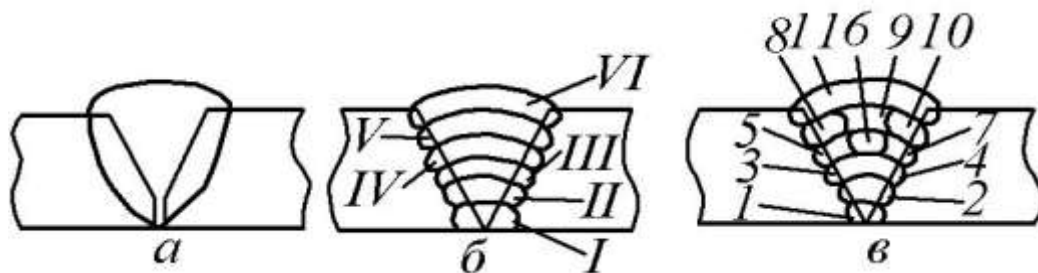


Рисунок 57 – Поперечні перерізи стикових швів:

a – однопрохідних (одношарових); *б* – багатошарових;
в – багатопохідних; *I* – *VI* – шари; *1*–*11* – проходи

Зварювання з'єднань відповідальних конструкцій великої товщини (вище 20...25 мм), коли виникають об'ємні напружки та зростає небезпека утворення тріщин, виконують із застосуванням спеціальних прийомів заповнення швів «гіркою» або «каскадним» методом.

Під час зварювання «гіркою» спочатку в місце розчищення кромки наплавляють перший шар металу невеликий завдовжки 200...300 мм, а потім другий шар, який перекриває перший і довший за нього вдвоє. Третій шар перекриває другий і довший за нього на 200...300 мм. Так наплавляють шари доти, доки на невеликій ділянці над першим шаром місце розчищення кромки не буде заповнене. Потім від цієї «гірки» зварювання ведуть у різні боки короткими швами тим самим способом. Отже, зона зварювання весь час перебуває в гарячому стані, що запобігає появі тріщин. «Каскадний» метод – різновид «гірки».

Переваги і недоліки ручного дугового зварювання. Ручне дугове зварювання забезпечує механічні властивості зварних швів, не нижчі за властивості основного металу, тому його широко застосовують під час виготовлення конструкцій і виробів відповідального призначення у різних галузях промисловості і в будівництві. До переваг ручного дугового зварювання належить також можливість виконання зварних швів у різних просторових положеннях і у важкодоступних місцях.

Недоліком цього способу зварювання є низька продуктивність процесу, яка визначається силою зварювального струму. За ручного дугового зварювання сила струму обмежується порівняно невеликим значенням через перегрівання електродних стрижнів і руйнування покриття за умови великого струму.

4.4 ЗВАРЮВАННЯ ПІД ФЛЮСОМ

4.4.1 Суть процесу

Зварювання під флюсом – це дугове зварювання, за якого дуга горить під шаром зварювального флюсу, який забезпечує захист зварювальної ванни від повітря. Поряд із захистом флюс стабілізує дугу, забезпечує розкислення, легування та рафінування розплавленого металу зварювальної ванни.

За ступенем механізації процесу розрізняють автоматичне та механізоване зварювання під флюсом. Найчастіше використовується автоматичний процес. Механізоване зварювання під флюсом застосовують значно рідше.

Схему процесу автоматичного зварювання під флюсом наведено на рис. 58. Електродний дріт автоматично подається в зону зварювання. Дуга горить між кінцем електрода 4 та виробом 2 під шаром зварювального флюсу 6, який подається на виріб із бункера 3. Під дією теплоти, що виділяється зварювальною дугою, плавляться електродний дріт і основний метал, а також частина флюсу, що перебуває в зоні дуги. В зоні горіння дуги утворюється порожнина, обмежена у верхній частині оболонкою розплавленого флюсу 7. Ця порожнина заповнена паром металу, флюсу чи газами, їх тиск підтримує флюсове склепіння, що утворюється над зварювальною ванною. Дуга 5 горить безпосередньо поблизу переднього краю ванни, трохи відхиляючись від вертикального положення в бік, протилежний напрямку зварювання. Під впливом тиску дуги рідкий метал також відтискується в бік, протилежний напрямку зварювання, утворюючи зварювальну ванну 8. Під електродом створюється кратер з тонким шаром розплавленого металу, а основна маса розплавленого металу займає простір від кратера до поверхні шва 12. Розплавлений флюс 7 внаслідок значно меншої густини спливає на поверхню розплавленого металу і покриває його щільним шаром.

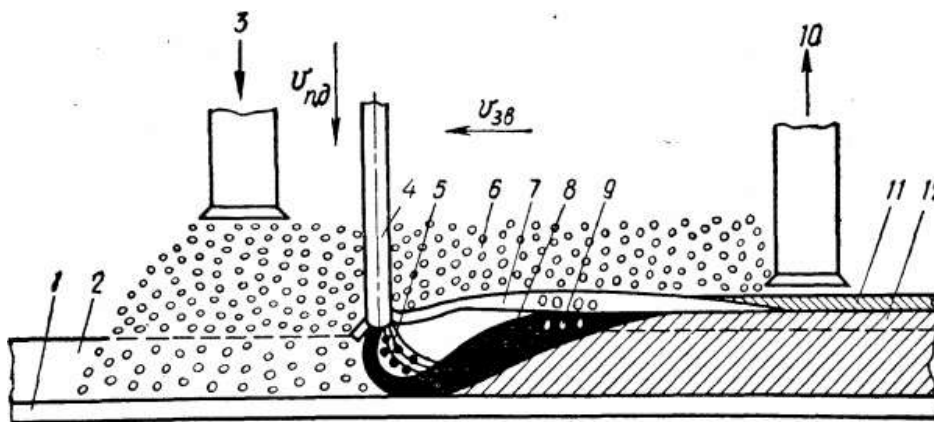


Рисунок 58 – Схema процесу автоматичного зварювання під флюсом

Флюс захищає дугу та зварювальну ванну від шкідливої дії навколишнього середовища, впливає на метал зварювальної ванни і, крім того, перешкоджає розбризкуванню рідкого металу. Розплавлений флюс, маючи низьку теплопровідність, уповільнює процес охолодження шва, що полегшує шлаковим включенням і розчиненим у металі газам 9 піднятися на поверхню ванни, сприяючи очищенню металу шва від забруднення. Нерозплавлений у процесі зварювання надлишковий флюс пневматичним пристроєм 10 відсмоктують із шва і використовують потім під час наступного зварювання.

Розплавлена та затверділа частина флюсу утворює на шві товсту шлакову кірку 11. Після припинення зварювання та охолодження металу шлакова кірка легко відокремлюється від металу шва 12. Зварювання звичайно проводять на підкладці 1 чи флюсовій подушці.

Перевагами зварювання під флюсом є:

- висока продуктивність (підвищена в 6...12 разів порівняно з ручним дуговим зварюванням) завдяки застосуванню великих струмів (до 2000 А і більше), великої глибини проплавлення (до 20 мм), а також майже повної відсутності втрат металу на вигар і розбризкування (не більше 3% проти 20...30% за зварювання відкритою дугою);
- механізація процесу зварювання;
- висока та стабільна якість зварних швів за рахунок надійного захисту флюсом зварювальної ванни від повітря, однорідності металу шва за хімічним складом, поліпшення форми шва та збереження сталості його розмірів;
- поліпшення умов праці зварників.

Недоліками зварювання під флюсом є можливість зварювання лише в нижньому положенні (нахил до 15°), трудність застосування в монтажних умовах, на коротких, криволінійних швах, у різному просторовому положенні.

Автоматичне та механізоване зварювання під флюсом застосовують для зварювання в нижньому положенні металу завтовшки 2...100 мм у серійному і масовому виробництві під час виготовлення котлів, мостових балок, резервуарів для зберігання рідин і газів, корпусів суден, зварних труб великих діаметрів та інших виробів. Зварюють сталі різного складу, мідь, титан, алюміній та сплави на їх основі

4.4.2 Зварювальні флюси й дроти

Зварювальним флюсом (ГОСТ 9087-81) називається неметалевий матеріал, розплав якого потрібний для зварювання та поліпшення якості шва.

За способом виготовлення флюси поділяють на плавлені та неплавлені або керамічні.

Плавлений флюс дістають сплавленням його складових. Сплавлену масу після охолодження подрібнюють на зерна потрібного розміру.

Неплавлені (керамічні) флюси являють собою механічну суміш порошкоподібних і зернистих матеріалів із скріплювачем – рідким склом.

Перевагою плавлених флюсів перед керамічними є вищі технологічні властивості (захист, формування, відокремлюваність шлакової кірки та ін.) і менша вартість.

Перевагою керамічних флюсів є можливість у широких межах легувати метал шва через флюс. Зараз наша промисловість застосовує переважно плавлені флюси. Шихтою для їх виготовлення є кварцовий пісок (SiO_2), манганова руда (MnO) і плавиковий шпат (CaF_2).

4.4.3 Технологія зварювання під флюсом

Основними параметрами режиму зварювання під флюсом є величина струму, його рід і полярність, напруга дуги, швидкість зварювання, діаметр і швидкість подачі електродного дроту. Додаткові параметри режиму – виліт електрода, нахил електрода та виробу, марка флюсу, підготовка кромок і вид зварного з'єднання.

Параметри режиму зварювання вибирають, виходячи з товщини зварюваного металу, необхідної форми зварного шва, яка визначається глибиною проплавлення та шириною шва. Режим зварювання визначають за експериментальними таблицями або наближено простим розрахунком, під час зварювання без розчищення – за глибиною проплавлення, під час зварювання з розчищенням – за кількістю наплавленого металу. Порядок добору режиму зварювання такий: залежно від товщини зварюваного металу вибирають діаметр електродного дроту, потім залежно від діаметра встановлюють зварювальний струм, потім швидкість подачі електродного дроту та швидкість зварювання.

Автоматичне зварювання під флюсом ведуть зварювальним дротом суцільного перерізу діаметром 1...6 мм за сили струму 150...2000 А та напруги дуги 22...55 В, напівавтоматичне – зварювальним дротом діаметром 0.8...2 мм за сили струму 100...500 А та напруги дуги 22...38 В.

4.4.4 Обладнання для зварювання під флюсом

За ступенем механізації окремих операцій дугове зварювання під флюсом може бути автоматичним і механізованим.

Автоматичним прийнято називати зварювання з механізованим збудженням і підтриманням дугового процесу, механізованою подачею зварювальних матеріалів у зону плавлення та механізованим переміщенням дуги вздовж лінії зварного з'єднання.

Механізованим прийнято називати зварювання з механізованою подачею дроту та інших зварювальних матеріалів у зону плавлення і ручним переміщенням дуги вздовж лінії зварного з'єднання.

Переносний зварювальний апарат (автомат) для дугового зварювання із самохідним візком, який переміщує його вздовж зварювальних кромок по поверхні виробу чи переносній колії, покладений на виріб, називається зварювальним трактором.

Розглянемо для прикладу зварювальний автомат тракторного типу ТС-35, призначений для дугового зварювання під флюсом стикових з'єднань із розчищенням і без розчищення кромок, для виконання кутових швів вертикальним та похилим електродами і для зварювання з'єднань внапусток. Трактор у процесі зварювання може пересуватися безпосередньо по виробу чи по напрямній лінійці.

Зварювальний автомат ТС-35 складається зі зварювального трактора (рис. 59), апаратного ящика та джерела живлення. Трактор є самохідним

механізмом, який складається зі зварювальної головки та ходового візка з індивідуальними електроприводами. Механізм подачі 1 забезпечує подачу електродного дроту діаметром 1.6...5.0 мм за допомогою набірних роликів з насічкою. Швидкість подачі дроту регулюється в межах 50...500 м/год. Ходовий візок 2 слугує для переміщення трактора вздовж зварюваного шва. Швидкість зварювання встановлюється добором змінних шестерень у межах 12...120 м/год. На візку встановлена касета 3 для електродного дроту, пульт керування 4 та бункер для флюсу 6.

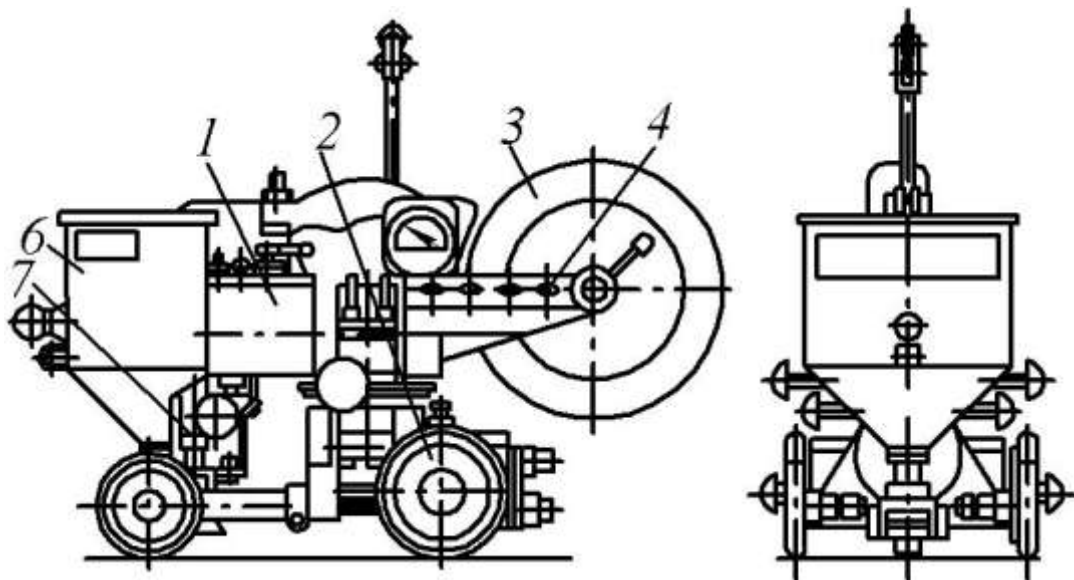


Рисунок 59 – Загальний вигляд зварювального трактора ТС-35

Зварювальна головка має два типи струмопровідних мундштуків 5. Для зварювання електродним дротом діаметром 3...5 мм на струмах до 1000 А використовують контактні ролики. Для зварювання тонким дротом діаметром 1.6...2 мм на струмах до 600 А застосовують трубчасті мундштуки з наконечником у вигляді ковзного контакту.

Стійкий процес зварювання та гарна якість зварного шва забезпечуються за правильного вибору та підтримання сталими режимів зварювання. До основних параметрів режиму належать зварювальний струм, напруга та швидкість зварювання. В сучасних зварювальних головках використовуються два принципи регулювання режиму дуги за її напругою — саморегулювання дуги та автоматичне регулювання дуги.

Стала довжина дуги забезпечується в разі, коли швидкість подачі електродного дроту v_e дорівнює швидкості його плавлення v_n . Якщо $v_e > v_n$, то це призведе до коротких замикань, коли ж $v_e < v_n$ — до обриву дуги та припинення процесу зварювання.

Порушення рівності $v_e = v_n$ у процесі зварювання можливе з таких причин: коливання напруги в мережі; нерівності, хвилястість, прихватки на зварюваних поверхнях; нерівномірна швидкість подачі електродного дроту; магнітне дуття, що відхиляє дугу та інші причини.

Більшість зварювальних апаратів для дугового зварювання працює за принципом саморегулювання дуги.

Саморегулювання дуги — це властивість зварювальної дуги при зварюванні плавким електродом відновлювати довжину при випадкових її відхиленнях, завдяки зміні швидкості плавлення електрода. Чим більше змінюється довжина дуги, тим більше змінюється струм i , отже, швидкість плавлення електрода. Якщо довжина дуги зменшується, струм i швидкість плавлення збільшуються і довжина дуги повертається до початкового значення.

4.5 ЕЛЕКТРОШЛАКОВЕ ЗВАРЮВАННЯ

Електрошлакове зварювання — це зварювання плавленням, за якого для нагрівання металу використовується теплота, що виділяється під час проходження електричного струму через розплавлений електропровідний шлак. За електрошлакового зварювання майже вся електрична потужність передається шлаковій ванні, а від неї — електроду та основному металу. У цьому випадку розплавлений флюс слугує захистом від шкідливої дії навколишнього середовища та засобом металургійної дії на розплавлений метал. Кількість теплоти — Q , що виділяється під час електрошлакового процесу, пропорційна струму I , напрузі U , опору шлаку R та часу t проходження струму, $Q = I \cdot U \cdot t$. Ця теплота витрачається на плавлення металу, нагрівання шлаку та тепловідведення. Температура розплавленого шлаку становить близько 2000 °С, що забезпечує плавлення основного й електродного металу.

Схему електрошлакового зварювання дротяним електродом показано на рис. 60. Електрод 1 та основний метал 2 зв'язані електрично через розплавлений шлак 3. За рахунок теплоти, що виділяється в шлаковій ванні під час проходження електричного струму, метал електрода та кромки основного металу обплавляються і стікають на дно розплаву, утворюючи металеву ванну 4. На початку процесу зварювання збуджується електрична дуга, після розплавлення флюсу під дією дуги та утворення шлакової ванни рідкий флюс заливає й гасить дугу, і дуговий процес переходить в електрошлаковий.

Зварювані деталі складають вертикально без скосу кромки, із зазором 20... 40 мм. Для формування шва та утримання рідкого металу й шлаку від витікання застосовують спеціальні пристрої формування — рухомі чи нерухомі мідні повзуни 5, що охолоджуються водою 6, або пластини, які залишилися. Розплавлений метал, що кристалізується в нижній частині металеві ванни, утворює шов 7.

Електрошлакове зварювання має такі особливості та переваги:

- метал практично будь-якої товщини можна зварювати за один прохід, тому продуктивність зварювання в 5...15 разів вища, ніж за багатопроходового автоматичного зварювання під флюсом, у цьому випадку, як правило, не потрібне розчищення кромки;

- вертикальне положення металевої ванни, підвищена температура її верхньої частини та значний час знаходження металу в розплавленому стані сприяють видаленню газів і неметалевих включень з металу шва;
- мала витрата флюсу, зазвичай не більше 5 % від маси наплавленого металу.

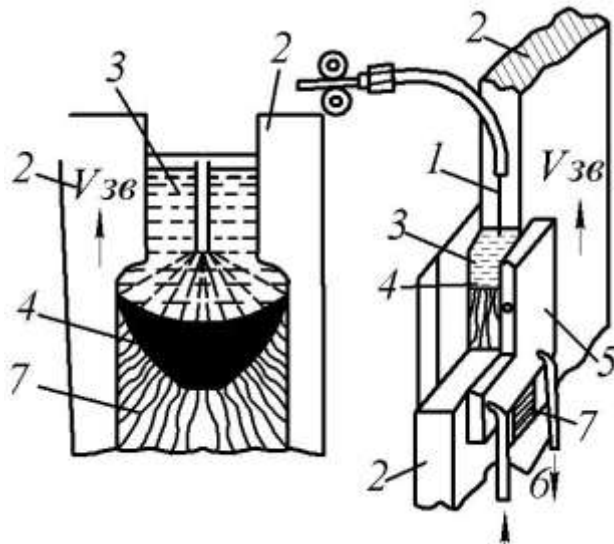


Рисунок 60 – Схема процесу електрошлакового зварювання

Недоліком електрошлакового зварювання є значне перегрівання металу навколошовної зони, що призводить до зниження пластичних властивостей, тому необхідна, як правило, наступна високотемпературна обробка для одержання потрібних механічних властивостей зварного з'єднання.

Електрошлакове зварювання технічно можливе за товщини металу, більшої 16 мм і, як правило, економічно вигідне у разі зварювання металу завтовшки більше 25 мм. Цей вид зварювання дозволяє виконувати тільки вертикальні шви. Електрошлакове зварювання застосовують для зварювання сталей, алюмінієвих і титанових сплавів.

Застосування електрошлакового зварювання вносить докорінні зміни в технологію виробництва великогабаритних виробів, виникає можливість заміни великих литих або кованих деталей зварно-литими чи зварно-кованими з дрібніших деталей.

Електрошлакове зварювання широко застосовують у важкому машинобудуванні під час виробництва товстостінних котлів високого тиску, станин потужних пресів і верстатів, валів гідротурбін, шаботів молотів та ін.

Для електрошлакового зварювання використовують автомати спеціальної конструкції, які притискаються до зварюваних деталей за допомогою механічних або магнітних притискувачів. Як джерела струму застосовують зварювальні трансформатори з жорсткою зовнішньою характеристикою і великою силою струму (до 2000 А).

4.6 ЗВАРЮВАННЯ В ЗАХИСНИХ ГАЗАХ

4.6.1. Загальні відомості

Суттю і характерною особливістю дугового зварювання в захисних газах є захист розплавленого і нагрітого до високої температури основного та електродного металу від шкідливого впливу повітря захисними газами, які забезпечують фізичну ізоляцію металу та зони зварювання від повітря і задану атмосферу в зоні зварювання.

Як захисні гази використовують інертні та активні гази, а також їх суміші.

Інертними називаються гази, які хімічно не взаємодіють з металом і не розчиняються в ньому. Як інертні гази використовують аргон (Ar), гелій (He) та їх суміші. Інертні гази застосовують для зварювання хімічно активних металів (титан, алюміній, магній та ін.), а також у всіх випадках, коли потрібно дістати зварні шви, однорідні за складом з основним та прикладжувальним металом (високолеговані сталі та ін.). Інертні гази забезпечують захист дуги та зварюваного металу, не спричиняючи на нього металургійної дії.

Аргон і гелій поставляють в балонах місткістю 40 л під тиском 15 МПа. Балон для аргону пофарбований у сірий колір, напис зеленого кольору; балон для гелію – коричневий, напис білого кольору.

Активними захисними газами називають гази, які вступають у хімічну взаємодію із зварюваним металом і розчиняються в ньому (вуглекислий газ, водень, пара води та ін.). Основним активним захисним газом є вуглекислий газ.

Вуглекислий газ зберігають і транспортують у рідкому вигляді переважно в сталевих балонах місткістю 40 л під тиском 6.0...7.0 МПа. У балоні знаходиться 60...80 % рідкої вуглекислоти, а решта – газ. Колір балона чорний, напис жовтого кольору.

Суміші газів мають у ряді випадків кращі технологічні властивості, ніж окремі гази. Наприклад, суміш вуглекислого газу з киснем (2...5 %) сприяє дрібнокрапельному переносу металу, зменшенню розбризкування (на 30...40 %), поліпшенню формування шва. Суміш із 70 % He і 30 % Ar збільшує продуктивність зварювання алюмінію, поліпшує формування шва і дозволяє зварювати за один прохід метал великої товщини.

За способом захисту розрізняють місцевий і загальний захист зварювального вузла (зварювання в контрольованій атмосфері). Основним способом місцевого захисту є струминний захист шва. За цього способу захисне середовище в зоні зварювання створюється газовим потоком у випадку центральної, бокової або комбінованої подачі газу. За центральної подачі газу дуга (рис. 61, а), що горить між електродом і основним металом, з усіх боків оточена газом, який подається під невеликим надлишковим тиском із сопла пальника, розташованого концентрично із віссю електрода. Цей спосіб захисту найпоширеніший.

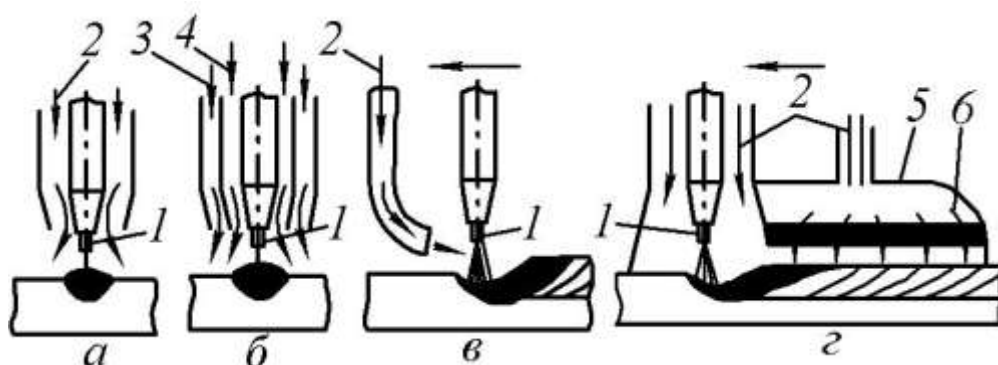


Рисунок 61 – Подача захисних газів у зону зварювання:

а – центральна одним концентричним потоком; *б* – центральна двома концентричними потоками; *в* – бічна; *з* – у рухому камеру (насадку);
1 – електрод; *2* – захисний газ; *3, 4* – зовнішній та внутрішній потоки захисних газів; *5* – насадка; *6* – розподільна сітка

У ряді випадків з метою економії інертних газів, а також одержання оптимальних технологічних і металургійних властивостей захисного середовища застосовують пальники, конструкція яких забезпечує комбінований захист двома концентричними потоками газів (рис. 61, б). Наприклад, внутрішній потік утворюється аргоном, а зовнішній – вуглекислим газом. Під час зварювання високоактивних металів (*Ti, Zr, Ta, Nb, Mo, W*) потрібно захищати не тільки розплавлений метал, але й зону металу, що нагрівається в процесі зварювання до температури більше як $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ з лицьового та зворотного боку шва. Для розширення струменевого захисту з лицьового боку шва застосовують додаткові ковпаки-приставки, які надягають на сопло пальника (рис. 61, з). Захист зворотного боку шва забезпечується піддуванням захисного газу. Бокову подачу газу застосовують обмежено (рис. 61, в).

Найефективніший захист металу шва та зони термічного впливу забезпечується під час зварювання в камерах з контрольованою атмосферою. Камери попередньо продувають або вакуумують, а потім заповнюють захисним (інертним) газом заданого складу під невеликим тиском.

Перевагами зварювання в захисних газах є:

- висока продуктивність (приблизно в 2.5 раза вища, ніж за ручного дугового зварювання покритими електродами) ;
- простота механізації та автоматизації;
- можливість зварювання в різних просторових положеннях;
- мала зона термічного впливу та відносно невеликі деформації виробу в зв'язку з високим ступенем концентрації дуги;
- висока якість захисту, немає потреби зачищати шов за багат шарового зварювання;
- доступність спостереження за процесом зварювання;

- можливість зварювання металу різної товщини (від десятих часток міліметра до десятків міліметрів).

Недоліками зварювання в захисних газах є відкрита дуга, що підвищує небезпеку ураження зору світловим випромінюванням і потреба захисту зони зварювання від протягу (за струменевого захисту), що утруднює застосування цього виду зварювання в монтажних умовах на відкритому повітрі

4.6.2 Аргонодугове зварювання

Аргонодугове зварювання – дугове зварювання, за якого як захисний газ використовують аргон. Застосовують аргонодугове зварювання неплавким вольфрамовим і плавким електродами. Аргонодугове зварювання вольфрамовим електродом може бути ручне та автоматичне. Зварювання можливе без подачі та з подачею присаджувального дроту. Цей процес призначений переважно для металів завтовшки менше ніж 3...4 мм. Більшість металів зварюють на постійному струмі прямої полярності. Зварювання алюмінію, магнію та берилію ведуть на змінному струмі.

За *прямой полярності* (плюс на виробі, мінус на електроді) кращі умови термоелектронної емісії, вища стійкість вольфрамового електрода, дуга на прямій полярності легко запалюється і горить стійко за напруги 10...15 В у широкому діапазоні густин струму.

За *зворотної полярності* зростає напруга дуги, зменшується стійкість її горіння, різко зменшується стійкість електрода, підвищується його нагрів та витрата. Ці особливості дуги зворотної полярності роблять її непридатною для безпосереднього використання в зварювальному процесі. Проте дуга зворотної полярності має важливі технологічні властивості: при її дії з поверхні зварюваного металу видаляються окиси та бруд. Це явище пояснюється тим, що за зворотної полярності поверхня металу бомбардується важкими позитивними іонами аргону, які, переміщуючись під дією електричного кола від плюса (електрод) до мінуса (виробу), руйнують оксидні плівки на зварюваному металі, а електрони, що виходять з катода (поверхні виробу), сприяють видаленню зруйнованих оксидних плівок. Цей процес видалення оксидів називається катодним розпиленням. Зазначену властивість дуги зворотної полярності використовують під час зварювання *Al, Mg, Be* та їх сплавів, які мають міцні оксидні плівки. Але тому, що за постійного струму зворотної полярності стійкість вольфрамового електрода низька, для цього використовують змінний струм. У цьому випадку видалення плівки, тобто катодне розпилення, відбувається, коли зварюваний виріб буде катодом. Отже, під час зварювання неплавким електродом на змінному струмі певною мірою реалізуються переваги дуги прямої та зворотної полярності, тобто забезпечується і стійкість електрода, і руйнування оксидних плівок.

Найпростіші електричні та газові схеми для аргоно-дугового зварювання наведено на рис. 62, а, б.

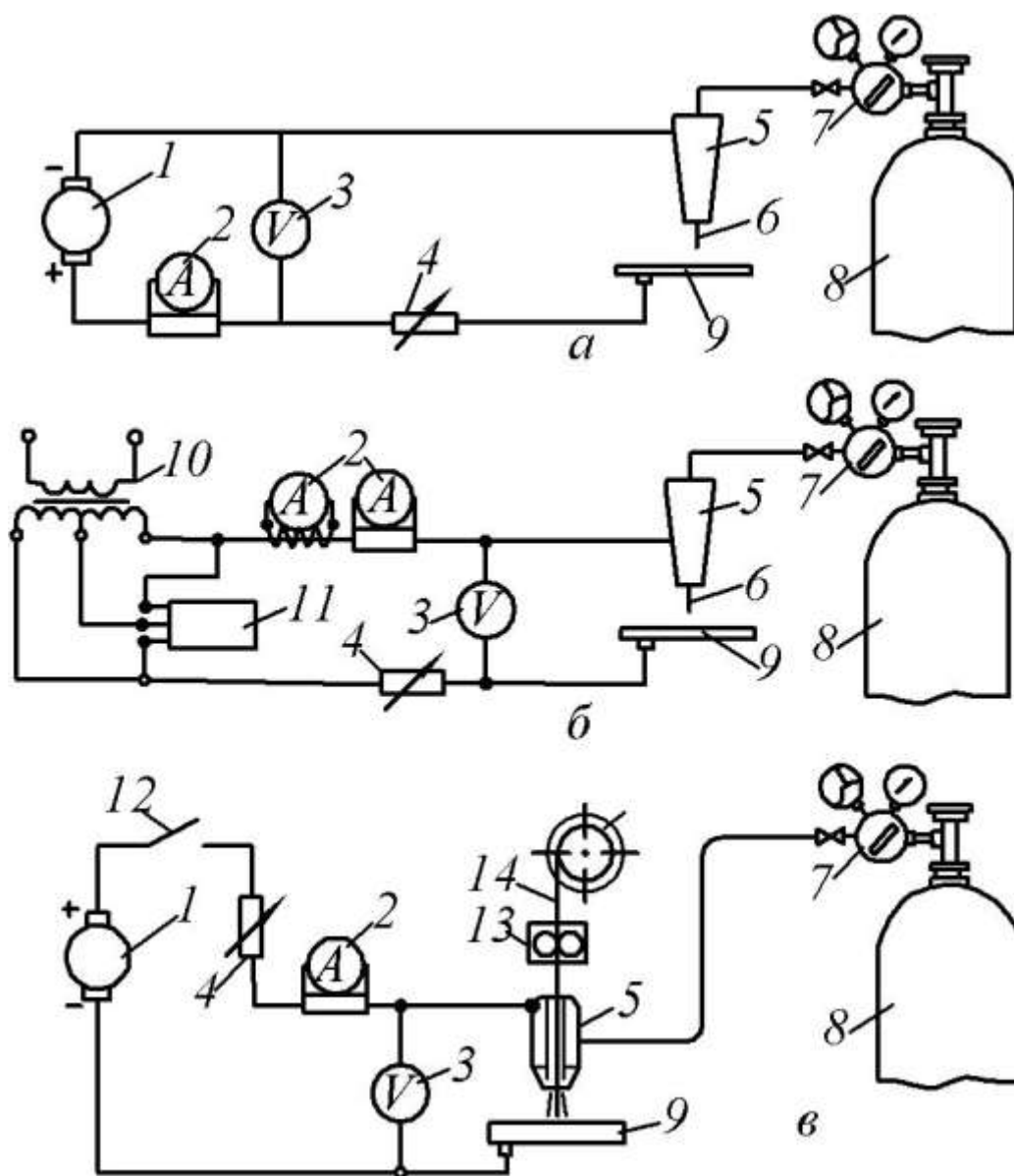


Рисунок 62 – Електрична та газова схеми зварювання в захисних газах:

а – неплавким електродом в інертних газах на постійному струмі прямої полярності; *б* – те саме, на змінному струмі; *в* – плавким електродом на постійному струмі зворотної полярності;

1 – зварювальний перетворювач; *2* – амперметр, *3* – вольтметр; *4* – баластний реостат; *5* – пальник; *6* – вольфрамовий електрод; *7* – редуктор-витратомір для захисного газу; *8* – балон із захисним газом; *9* – виріб; *10* – зварювальний трансформатор; *11* – осцилятор; *12* – контактор; *13* – механізм подачі дроту; *14* – плавкий зварювальний дріт; *15* – котушка з дротом

Аргонодугове зварювання плавким електродом застосовують для зварювання кольорових металів (*Al*, *Mg*, *Cu*, *Ti* та їх сплавів) і легованих корозієстійких сталей (рис. 62, *в*)

Зварювання виконують на постійному струмі високої густини (не менше 100 А/мм^2) за зворотної полярності, який одержують від джерел з жорсткою або зростальною зовнішньою характеристикою.

4.6.3 Зварювання у вуглекислому газі

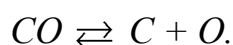
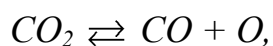
Зварювання здійснюється з використанням плавкого електрода та захисного вуглекислого газу, що подається в зону дуги. Це зварювання механізоване, його виконують напівавтоматами і автоматами. Схему поста для зварювання в захисних газах плавким електродом наведено на рис. 62, в.

Стійке горіння забезпечується за високої густини постійного струму (100 А/мм^2 і вище).

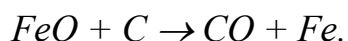
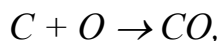
Висока густина зварювального струму зумовлює застосування електродного дроту малого діаметра (звичайно $d_e = 0.8 \dots 2.5 \text{ мм}$). Зварювання звичайно виконують на постійному струмі зворотної полярності за безперервної подачі електродного дроту.

Основною особливістю зварювання у вуглекислому газі плавким електродом є потреба застосування електродних дротів з підвищеним вмістом елементів-розкислювачів – кремнію та марганцю, що компенсують їх вигорання в зоні зварювання та запобігають додатковому окисненню металу під час зварювання і утворенню пор. Для вуглецевих сталей переважно використовують зварювальні дроти суцільного перерізу Св-10ГС, Св-08Г2С, а також порошкові дроти, що містять порошки феросплавів $FeSi$, $FeMn$.

Причини окислення та утворення пор під час зварювання у вуглекислому газі такі. В процесі зварювання вуглекислий газ дисоціює в зоні дуги з утворенням атомарного кисню за реакцією



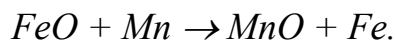
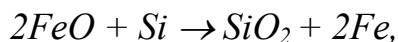
Атомарний кисень окислює залізо та легувальні домішки, що містяться в сталі, $Fe + O \rightarrow FeO$. Внаслідок цього метал зварювальної ванни насичується киснем, а його властивості погіршуються. Під час охолодження розплавленого металу вуглець, що міститься в сталі, окислюючись, сприятиме утворенню оксиду вуглецю за реакцією:



Під час кристалізації металу шва CO , що утворюється, виділяється у вигляді бульбашок, частина з яких, не встигаючи видалитися, затримується в металі шва, утворюючи пори.

В тому разі, коли зварювальний дріт легований Si та Mn , оксиди заліза розкислюються не за рахунок вуглецю, а переважно за рахунок Si та Mn

із зварювального дроту, таким чином запобігається утворення оксиду вуглецю під час кристалізації і утворення пор. Розкислення оксидів заліза йде за реакцією:



Оксиди кремнію та марганцю у вигляді шлаку накопичуються на верхній зварювальній ванні.

Зварювання у вуглекислому газі можна також здійснювати *порошковим дротом*. Порошковий дріт являє собою трубчастий (часто із складним внутрішнім перерізом) дріт, заповнений порошкоподібним наповнювачем (рис. 63). Оболонку порошкового дроту виготовляють із стрічки низьковуглецевої сталі завтовшки 0.2...0.5 мм. Наповнювач - це суміш порошків з газо-, шлакоутворюючих та легуючих компонентів, які забезпечують захист зони зварювання та потрібні властивості зварного шва.

Зварювання порошковими дротами всіх типів звичайно виконують на постійному струмі зворотної полярності з використанням джерел живлення з жорсткими зовнішніми характеристиками.

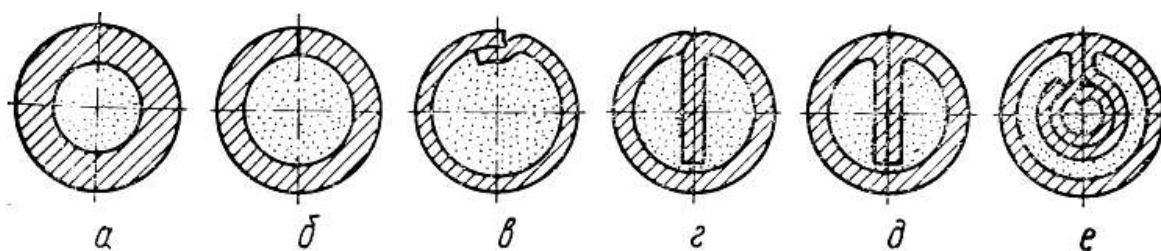


Рисунок 63 – Конструкції порошкового дроту:

а – в – прості трубчасті; *г* – з одним загином оболонки;

д – з двома загинами оболонки; *е* – двошарова

4.7 ПЛАЗМОВЕ ЗВАРЮВАННЯ

Плазмове зварювання – зварювання плавленням, за якого нагрівання здійснюється стиснутою дугою.

Стиснута дуга – дуга, стовп якої стиснутий за допомогою сопла плазмового пальника чи потоку газів (аргону, азоту та ін).

Плазма – це газ, що складається з позитивно та негативно заряджених частинок, загальний заряд яких дорівнює нулю. Плазма генерується в каналі сопла, обтискується та стабілізується його водоохолоджуваними стінками та холодним плазмоутворювальним газом. Обтискання та охолодження зовнішньої поверхні стовпа дуги викликає його концентрацію, що призводить до різкого збільшення числа зіткнень між частинками плазми, збільшення ступеня іонізації та різкого підвищення кінетичної енергії плазми і температури стовпа дуги (до 10 000...20 000 К), що використову-

ється для зварювання і різання. Пристрій для створення спрямованого потоку плазми, який рухається з великою швидкістю і має великий запас енергії, називається плазмотроном або плазмовим пальником.

Є кілька схем пристроїв для створення плазмових дуг і струменів:

- для одержання плазмової дуги, коли сопло і канал суміщені, плазмовий струмінь збігається із стовпом дуги, одним з електродів є оброблюваний матеріал (рис. 64, а);
- з одержанням плазмового струменя, виділеного із стовпа дуги за роздільних сопла та каналу (рис. 64, б);
- те саме, але із суміщеним соплом і каналом (рис. 64, в).

Плазмовий струмінь створюється дуговим розрядом 4, який збуджується між електродом 1 та ще одним електродом, яким може слугувати виріб 6, роздільне сопло 7 або стінки каналу 2.

Зварювання плазмовою дугою здійснюється змінним або постійним струмом прямої полярності. Збуджують дугу за допомогою осцилятора. Для полегшення збудження дуги прямої дії використовують чергову дугу, що горить між соплом пальника та електродом. Для живлення плазмоутворювальної дуги потрібні джерела живлення зварювального струму з робочою напругою до 120 В, а в деяких випадках і вищою.

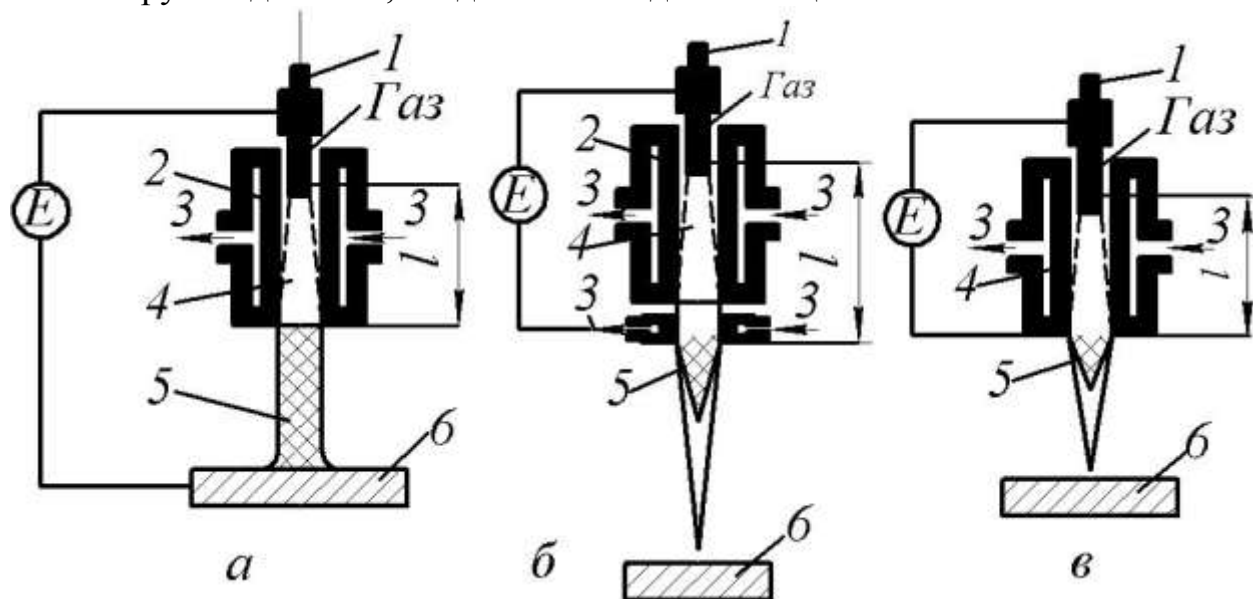


Рисунок 64 – Схеми зварювання плазмовою дугою (а) та плазмовим струменем (б, в):

1 – електрод; 2 – канал; 3 – охолодна вода; 4 – стовп дуги;

5 – плазмовий струмінь; 6 – виріб; 7 – сопло;

E – джерело струму; l – довжина робочої частини каналу

Плазмовою дугою та плазмовим струменем можна зварювати практично всі метали, а також деякі неметалеві матеріали. Як плазмоутворювальний газ використовують аргон і гелій, які також можуть бути і захисними.

4.8 ГАЗОВЕ ЗВАРЮВАННЯ ТА РІЗАННЯ МЕТАЛІВ

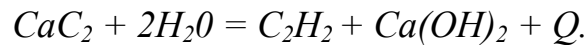
4.8.1 Загальні відомості

За газополуменевої обробки (зварювання, різання, поверхневої обробки, паяння) як джерело теплоти використовують газове полум'я – полум'я горючого газу, який спалюють для цього в кисні у спеціальних пальниках.

Як горючі гази використовують ацетилен, водень, природні гази, нафтовий газ, пару бензину, гасу та ін. Найвищу температуру порівняно з полум'ям інших газів має ацетиленокисневе полум'я, тому воно найчастіше й застосовується.

Основною сировиною для добування ацетилену є карбід кальцію (CaC_2).

Ацетилен (C_2H_2) добувають в спеціальних апаратах – ацетиленових генераторах в процесі взаємодії води з карбідом кальцію:



Під час розкладання 1 кг карбіду кальцію утворюється 0.25—0.3 м³ ацетилену.

Ацетиленокисневе полум'я складається з трьох зон (рис. 65): ядра 1 полум'я, середньої відновлювальної зони 2, факела полум'я – окислювальної зони 3.

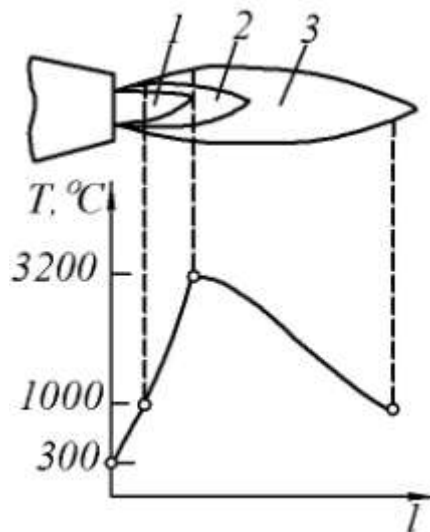


Рисунок 65 – Схема нормального ацетиленокисневого полум'я та розподілу температур

Газове полум'я є розосередженим джерелом теплоти. Найбільший тепловий потік на осі ацетиленокисневого полум'я звичайного зварювального пальника в 8...12 разів менший, ніж у відкритій зварювальній дугі приблизно однакової ефективної потужності, тому газове полум'я нагріває метал повільніше і плавніше, ніж зварювальна дуга.

Газове зварювання використовують під час виготовлення та ремонту виробів із тонколистової сталі завтовшки 1...3 мм, зварювання чавуну, алюмінію, міді, латуні, наплавлення твердих сплавів, виправлення дефектів лиття та ін.

До переваг газового зварювання належать: простота способу, нескладність обладнання, відсутність джерела електричної енергії.

4.8.2 Технологія газового зварювання

Газове зварювання – це зварювання плавленням, за якого метал у зоні з'єднання нагрівають до розплавлення газовим полум'ям (рис. 66). У разі нагрівання газовим полум'ям 4 кромки зварюваних заготовок 1 розплавляються разом із присаджувальним металом 2, який може додатково вводитися в полум'я пальника 3. Після тверднення рідкого металу утворюється зварний шов 5.

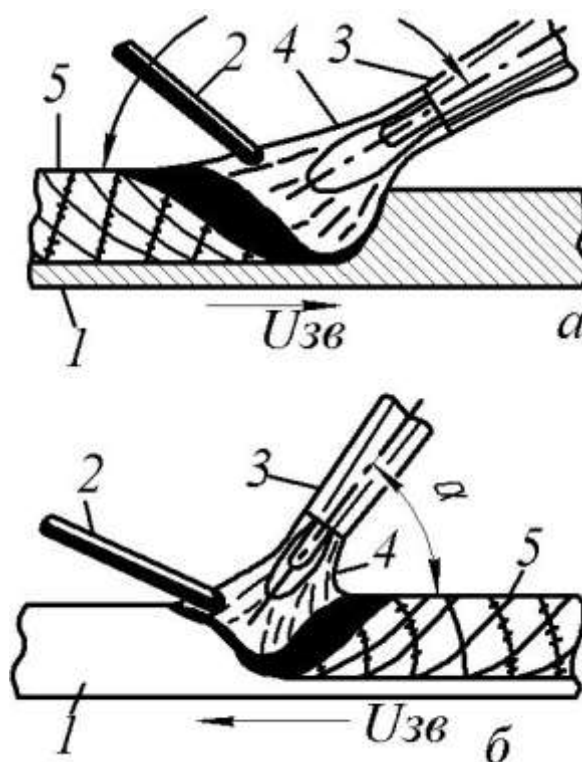


Рисунок 66 – Схема газового зварювання:

а – правим; *б* – лівим способом

Обладнання поста для газового зварювання показано на рис. 67. До недоліків газового зварювання належать: менша продуктивність, складність механізації, більша зона нагрівання та нижчі механічні властивості зварних з'єднань, ніж за дугового зварювання.

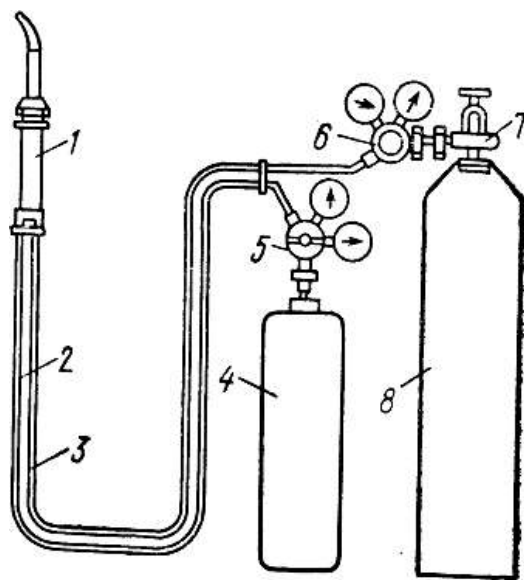


Рисунок 67 – Обладнання поста для газового зварювання:

- 1 – пальник; 2 – шланг для підведення ацетилену;
 3 – шланг для підведення кисню; 4 – ацетиленовий балон;
 5 – ацетиленовий редуктор; 6 – кисневий редуктор; 7 – кисневий вентиль;
 8 – кисневий балон

Для зварювання різних металів потрібен певний вид полум'я – нормальний ($\beta = 1 \dots 1.3$), окислювальний ($\beta > 1.3$) або науглецювальний ($\beta < 1$), де β – відношення об'єму кисню до об'єму ацетилену в суміші.

Нормальним полум'ям зварюють більшість сталей. Окислювальним полум'ям, яке має блакитнуватий відтінок і загострену форму ядра, користуються у разі зварювання латуні. Навуглецювальне полум'я, яке стає кіптявим, подовжується й має червонуватий відтінок, використовують переважно під час зварювання чавуну для компенсації вуглецю, що вигорає.

Присаджувальний матеріал для газового зварювання використовують у вигляді дроту, литих прутків і гранульованого порошкоподібного металу (за наплавлення твердими сплавами).

Зварювальний дріт для газового зварювання та наплавлення постачається за тими самими технічними умовами, що й для дугового зварювання.

Для захисту розплавленого металу від окислення та видалення з нього окисів, що утворюються під час газового зварювання, застосовують легкоплавкі зварювальні флюси: буру, борну кислоту, оксиди та солі барію, калію, літію, натрію, фтору та ін. Наприклад, в процесі зварювання чавуну найчастіше як флюс використовують порошкоподібну прожарену буру ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) або суміш її з іншими легкоплавкими солями лужних металів.

Техніка зварювання. В практиці застосовують два способи зварювання – правий і лівий (див. рис. 66). У разі правого способу зварювання ведуть зліва направо, зварювальне полум'я спрямовують на зварену ділянку шва, а присаджувальний дріт переміщують услід за пальником. Оскільки

ки за правого способу полум'я спрямоване на зварний шов, то забезпечуються кращий захист зварювальної ванни від кисню та азоту повітря, велика глибина проплавлення, уповільнене охолодження металу шва в процесі кристалізації. За правого способу продуктивність на 20...25 % вища, а витрата газів на 15...20 % менша, ніж за лівого. Правий спосіб доцільно застосовувати під час зварювання металу завтовшки більше ніж 5 мм і металів з великою теплопровідністю.

За лівого способу зварювання ведуть справа наліво, зварювальне полум'я спрямовують на ще незварені кромки металу, а присаджувальний дріт переміщують поперед полум'я. За лівого способу зварник добре бачить зварюваний метал, тому зовнішній вигляд шва кращий, ніж за правого способу; попереднє підігрівання кромок зварюваного металу забезпечує добре перемішування зварювальної ванни. Завдяки цим властивостям лівий спосіб найпоширеніший і застосовується для зварювання тонколистових матеріалів і легкоплавких металів.

Потужність зварювального пальника за правого способу вибирають із розрахунку 120...150 $\text{дм}^3/\text{год}$ ацетилену, а за лівого – 100...130 $\text{дм}^3/\text{год}$ на 1 мм товщини зварюваного металу.

Діаметр присаджувального дроту вибирають залежно від товщини зварюваного металу та способу зварювання. За правого способу зварювання діаметр присаджувального дроту $d = S/2$ мм, але не більше 6 мм, за лівого $d = S/2 + 1$ мм, де S – товщина зварюваного металу, мм.

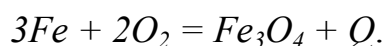
Газовим зварюванням можна виконувати нижні, горизонтальні (на вертикальній площині) вертикальні та стельові шви. Горизонтальні та стельові шви звичайно виконують правим способом зварювання, вертикальні знизу вгору – лівим способом.

4.8.3 Технологія кисневого різання

Кисневим різанням називають спосіб відокремлення металу, що ґрунтується на використанні для його нагрівання до температури займання теплоти газового полум'я та екзотермічної реакції окислення металу, а для видалення оксидів – кінетичної енергії різального кисню.

За характером і спрямованістю кисневого струменя розрізняють три основних види різання: роздільне, за якого утворюються наскрізні розрізи; поверхневе, за якого знімається поверхневий шар металу; кисневим способом, що полягає в пропалюванні в металі глибоких отворів.

На рис. 68 показано схему роздільного різання. Метал 3 нагрівається в початковій точці розрізу до температури займання (у кисні для сталі до 1000...1200 °C) підігрівальним ацетиленокисневим полум'ям 2, потім спрямовується струмінь різального кисню 1, і нагрітий метал починає горіти з виділенням значної кількості теплоти за реакцією:



Теплота Q від горіння заліза разом із підігрівальним полум'ям розігріває шари, що лежать нижче, і поширюється на всю товщу металу. Чим менша товщина розрізуваного металу, тим більша роль підігрівального полум'я (за товщини 5 мм – до 80 % загальної кількості теплоти, що виділяється під час різання, за товщини більше ніж 50 мм – лише 10%). Оксиди 5, що утворюються, а також частково розплавлений метал видаляються із зони розрізу 4 під дією кінетичної енергії струменя кисню. Безперервне підведення теплоти та різального кисню забезпечують безперервність процесів.

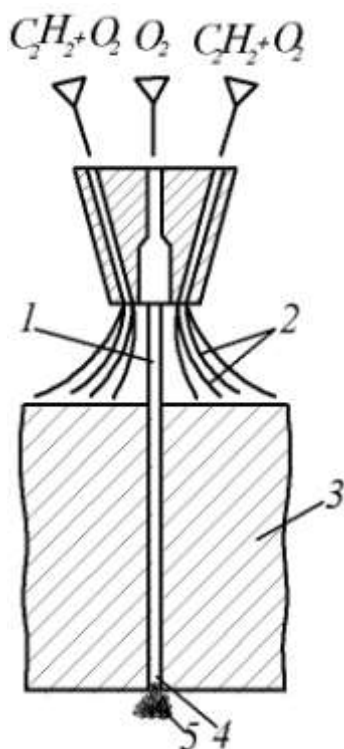


Рисунок 68 – Схема газокисневого різання

Умови різання та розрізуваність. Для забезпечення нормального процесу різання мають бути виконані такі умови.

- Джерело теплоти має бути потрібної потужності, щоб забезпечити нагрівання металу до необхідної температури реакції згоряння металу, а кількість теплоти, що виділяється під час згоряння металу в кисневому струмені, має бути достатньою для підтримання безперервного процесу різання.
- Температура плавлення металу має бути вищою за температуру його окислення (горіння) у кисні, інакше метал в процесі нагрівання плавтиметься і примусово видалятиметься з розрізу без характерного для процесу різання окислення, що є головним джерелом теплоти.
- Температура плавлення металу має бути вищою за температуру плавлення оксидів, що утворюються в процесі різання, інакше тугоплавкі оксиди ізолюють метал від контакту з киснем і утруднюють процес різання.

- Оксиди та шлаки, що утворюються, мають бути рідкотекучими й легко видуватися струменем різального кисню, інакше контакт кисню з рідким металом буде уповільненим або зовсім неможливим.

Усі перелічені умови задовольняє вуглецева сталь, тому її можна різати киснем.

Першу умову за газового різання не задовольняє мідь через її високу теплопровідність, що сильно утруднює початок процесу різання, і низьке тепловиділення під час окислення. Тому потужності газових різаків недостатньо для різання міді, і мідь можна різати, застосовуючи потужніше теплове джерело – електричну дугу.

Другу та четверту умови не задовольняє чавун. Із підвищенням вмісту вуглецю в залізі процес різання значно погіршується внаслідок зниження температури плавлення та підвищення температури займання. А чавун, як відомо, містить більше ніж 2.14% вуглецю, кисневим різанням не оброблюється. Крім того, в'язкість шлаку значно зростає у випадку збільшення вмісту кремнію, який обов'язково міститься в чавуні, що також є однією з причин неможливості вести кисневе різання чавуну.

Третя умова не задовольняється у разі різання алюмінію, магнію та їх сплавів, а також сталей з великим вмістом хрому та нікелю. Під час нагрівання цих сплавів у процесі різання на їх поверхні утворюється плівка тугоплавкого оксиду, що перешкоджає надходженню кисню до неокисленого металу.

Киснево-флюсове різання. Для різання хромистих, хромонікелевих нержавіючих сталей, чавуну та кольорових металів, які не задовольняють умови кисневого різання, застосовують спосіб киснево-флюсового різання, суть якого полягає в тому, що в зону розрізу разом з різальним киснем вводиться спеціальний порошкоподібний флюс, під час згоряння якого виділяється додаткова теплота і підвищується температура в зоні розрізу. Крім того, продукти згоряння флюсу, взаємодіючи з тугоплавкими оксидами, легко видаляються із зони розрізу, не перешкоджаючи нормальному перебігу процесу.

Основним компонентом порошкоподібних флюсів, застосовуваних під час різання металів, є залізний порошок, який, згоряючи, виділяє велику кількість теплоти. Найкращі результати в процесі зварювання нержавіючих сталей досягають за додавання до залізного порошку 10...15 % алюмінієвого порошку. Для поверхневого та роздільного різання нержавіючих сталей використовують як флюс суміш алюмінієво-магнієвого порошку з феросиліцієм або силікокальцієм. Алюмінієво-магнієвий порошок, який входить до складу флюсової суміші, згоряючи в струмені кисню, підвищує

температуру полум'я, а феросиліцій або силікокальцій діють на оксиди хрому як флюсувальна домішка.

Основне завдання флюсу під час різання чавуну полягає в розчиненні флюсу залізом на ділянці розрізу, зниженні в сплаві вмісту вуглецю, а також розрідженні шлаку, в якому міститься багато кисню. До складу флюсів для різання чавуну входять залізний та алюмінієвий порошки, кварцовий пісок і ферофосфор.

Кольорові метали й сплави піддають киснево-флюсовому різанню лише із застосуванням флюсів.

4.8.4 Обладнання та апаратура для газового зварювання й різання

Ацетиленові генератори. Ацетиленовим генератором називається апарат, що слугує для добування ацетилену під час розкладання карбіду кальцію водою.

Ацетиленові генератори для зварювання та різання класифікуються за такими ознаками:

- за продуктивністю – від 0.5 до 150 $\text{м}^3/\text{год}$;
- за тиском вироблюваного ацетилену – низького тиску до 10 кПа та середнього тиску від 70 до 150 кПа ;
- за способом застосування – пересувні з продуктивністю 0.5 – 3 $\text{м}^3/\text{год}$ та стаціонарні – 5 – 160 $\text{м}^3/\text{год}$;
- залежно від взаємодії карбіду кальцію з водою – генератори системи КВ («карбід у воду»), в яких розкладання карбіду кальцію здійснюється під час подачі певної кількості карбіду кальцію у воду, що знаходиться в реакційному просторі, генератори системи ВК («вода на карбід»), в яких розкладання карбіду кальцію відбувається в процесі подачі певної кількості води в реакційний простір, де знаходиться карбід кальцію; генератори системи ВВ («витиснення води»), в яких розкладання карбіду кальцію здійснюється під час зіткнення його з водою залежно від зміни рівня води, що знаходиться в реакційному просторі і витісняється газом, що утворюється; комбіновані генератори.

Усі ацетиленові генератори незалежно від їх системи мають такі основні частини: газоутворювач, газозбірник, запобіжний затвор, автоматичне регулювання вироблюваного ацетилену залежно від його витрати.

Схеми ацетиленових генераторів різних систем показано на рис. 69.

Запобіжні затвори – пристрої, що захищають ацетиленові генератори та газопроводи від попадання в них вибухової хвилі під час зворотних ударів полум'я із зварювального пальника чи різачка.

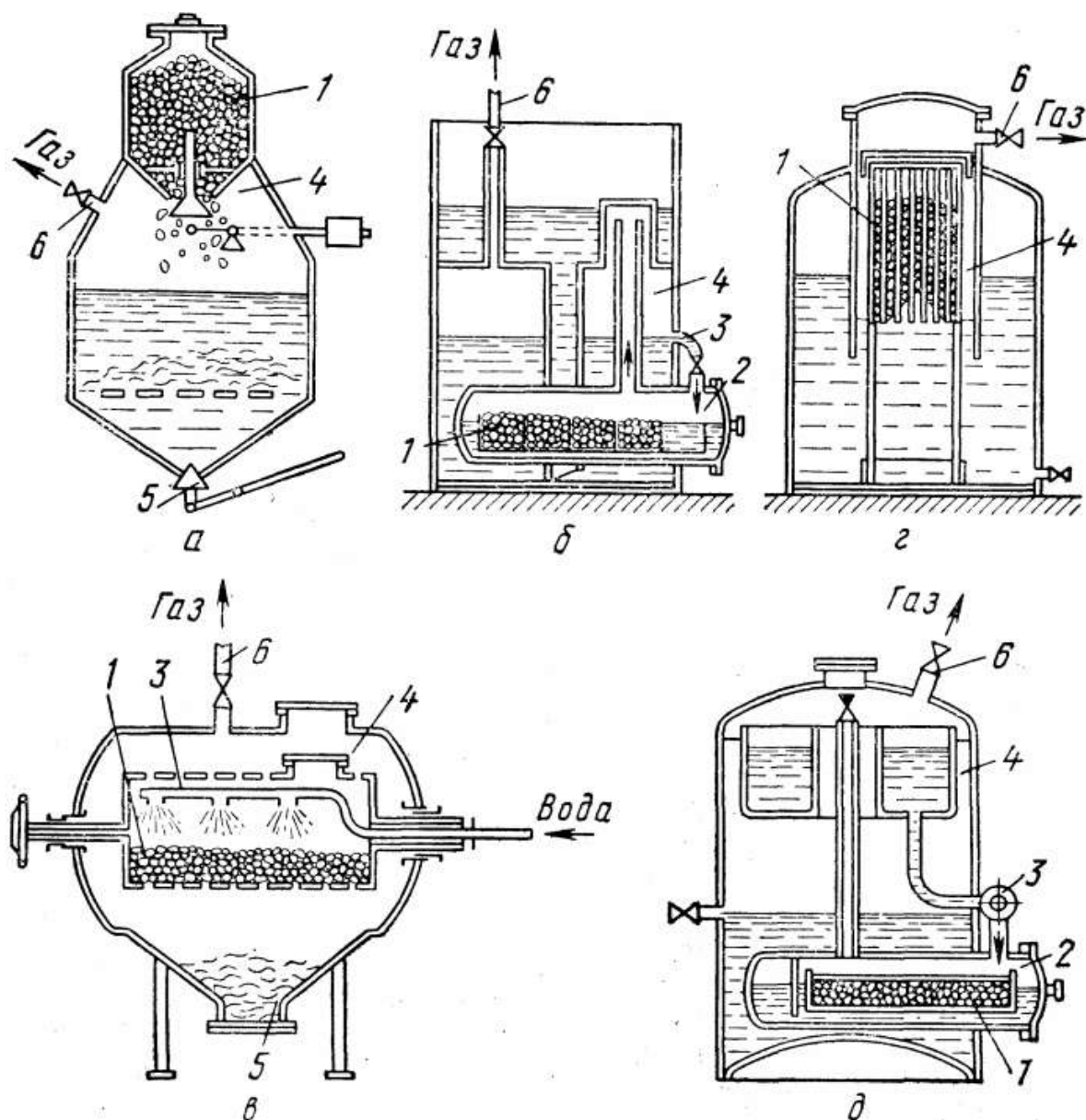


Рисунок 69 – Схеми ацетиленових генераторів:

а – «карбід у воду»; *б* – «вода в карбід»; *в* – «сухого розкладання»; *г* – «витиснення»; *д* – комбінована система «вода в карбід» і «витиснення»;
 1 – бункер або барабан з карбідом кальцію; 2 – реторта; 3 – система подачі води; 4 – газозбірник; 5 – випуск мулу; 6 – відбирання газу

Зворотним ударом називається займання горючої суміші в каналах пальника чи різака й поширення полум'я по шлангу горючого газу. Горюча суміш газів під час зворотного удару спрямовується по ацетиленовому каналу пальника чи різака в шланг і за відсутності запобіжного затвора – в ацетиленовий генератор, що може призвести до вибуху ацетиленового генератора. Зворотний удар може відбутися тоді, коли швидкість витікання горючої суміші стане меншою від швидкості її згоряння й від перегріву та засмічення каналу мундштука пальника.

Запобіжні затвори бувають рідинні та сухі. Рідинні затвори заливають водою, сухі – заповнюють дрібнопористою металокерамічною масою. Затвори класифікують за пропускною здатністю – 0.8; 1.25; 2.0; 3.2 м³/год; за граничним тиском – низького тиску, в яких граничний тиск ацетилену не перевищує 10 кПа, середнього тиску – 70 і високого тиску – 150 кПа.

Запобіжні затвори встановлюють між ацетиленовим генератором або ацетиленопроводом (у разі багатопостового живлення) і пальником або різак.

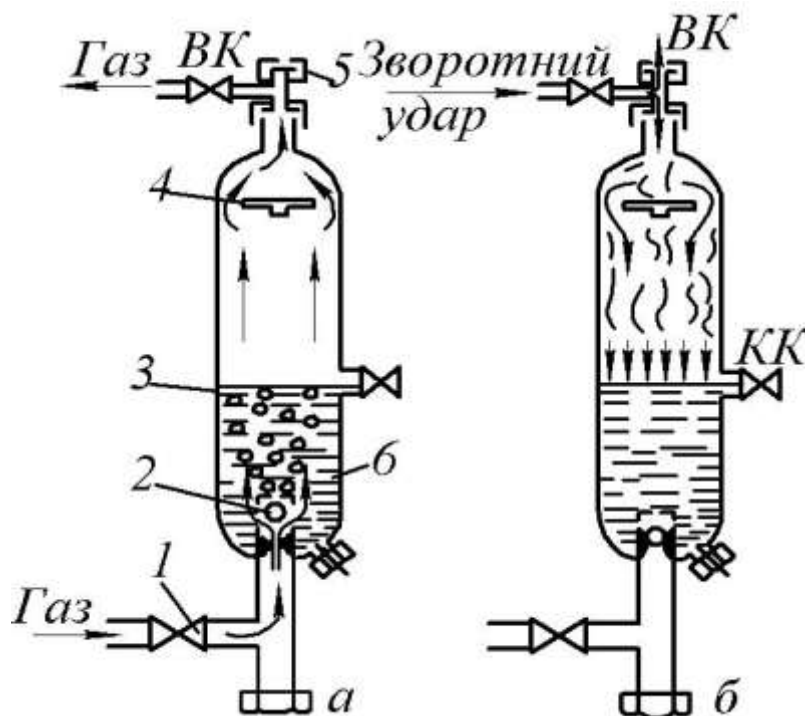


Рисунок 70 – Схема водяного затвора:
а – за нормальної роботи; б – за зворотного удару

Принцип дії водяного затвора показано на рис. 70. Корпус 3 затвора заповнюють водою до рівня контрольного крана КК. Ацетилен підводиться по трубі 1, проходить крізь зворотний клапан 2, розташований у нижній частині корпусу. У верхню частину корпусу газ проходить крізь відбивач 4. Ацетилен відводиться до місця споживання через видатковий кран ВК. У верхній частині корпусу є трубка, закрита мембраною 5 з алюмінієвої фольги. Під час зворотного удару мембрана розривається і вибухова суміш виходить назовні. Тиск вибуху через воду 6 передається газу від генератора. Після видалення вибухової суміші мембрану замінюють.

Балони для стиснутих газів. Для зберігання й транспортування стиснутих, зріджених і розчинених газів, що перебувають під тиском, застосовують сталеві балони місткістю від 0.4 до 55 дм³.

Під час газового зварювання та різання найчастіше використовують балони місткістю 40 дм³. Балони являють собою сталеві циліндричні посу-

дини, в горловині яких є конусний отвір з різьєю, куди вкручується запорний вентиль різної конструкції для горючих газів і кисню.

Кожному газу відповідає свій умовний колір балона та колір назви газу, наприклад, кисневі балони фарбують у блакитний колір, напис роблять чорною фарбою; ацетиленовий – відповідно у білий і червоною фарбою; водневий – у темно-зелений і червоною фарбою; пропан – у червоний і білою фарбою. Кисень наповнюють у балони до тиску 15 МПа. Балон місткістю 40 дм³ за тиску газу 15 МПа містить 6 м³ газу. Живлення постів газового зварювання та різання від ацетиленових генераторів пов'язане з рядом незручностей, тому значного поширення набуло живлення ацетиленом від ацетиленових балонів. Ацетиленові балони заповнюють пористою масою (деревне вугілля, пемза, інфузорна земля), що утворює мікропорожнини, потрібні для безпечного зберігання ацетилену. Масу в балоні просочують ацетоном (225...300 г на 1 дм³ місткості балону), в якому добре розчиняється ацетилен. За нормальних умов в одному об'ємі ацетону розчиняється 23 об'єми ацетилену. Тиск розчиненого ацетилену в наповненому балоні не має перевищувати 1.9 МПа за 20 °С. Для зменшення втрат ацетону з балона ацетилен потрібно відбирати із швидкістю не більше як 1700 дм³/год.

Балони мають *вентилі* – запірні пристрої, які дозволяють зберігати в балоні стиснутий або зріджений газ.

Редуктор для газоплазмової обробки – прилад для зниження тиску газу, за якого він перебуває в балоні чи магістралі, до величини робочого тиску та для автоматичного підтримування цього тиску сталим. Він має клапан, який керується гнучкою мембраною, на яку з одного боку діє сила пружини, а з іншого – тиск газу. Регулюванням сили пружини забезпечуються заданий тиск і витрата газу.

Редуктори класифікують за принципом дії (прямої та зворотної), призначенням і місцем встановлення, за схемами редукування та родом редукованого газу.

Зварювальний пальник. Основним інструментом газозварника є зварювальний пальник, тобто пристрій, який слугує для змішування горючого газу чи пари горючої рідини з киснем і утворення зварювального полум'я. Кожний пальник дозволяє регулювати потужність, склад і форму зварювального полум'я. Зварювальні пальники згідно з ГОСТ 1077-79 класифікуються за способом подачі горючого газу та кисню в змішувальну камеру – інжекторні та безінжекторні; за родом застосовуваного газу; за призначенням – універсальні та спеціалізовані; за числом полум'я – однополумєні та багатополумєні; за потужністю – малої потужності (витрата ацетилену 25...400 дм³/год), середньої потужності (400...2800 дм³/год), великої потужності (2800...7000 дм³/год); за способом застосування – ручні та машинні.

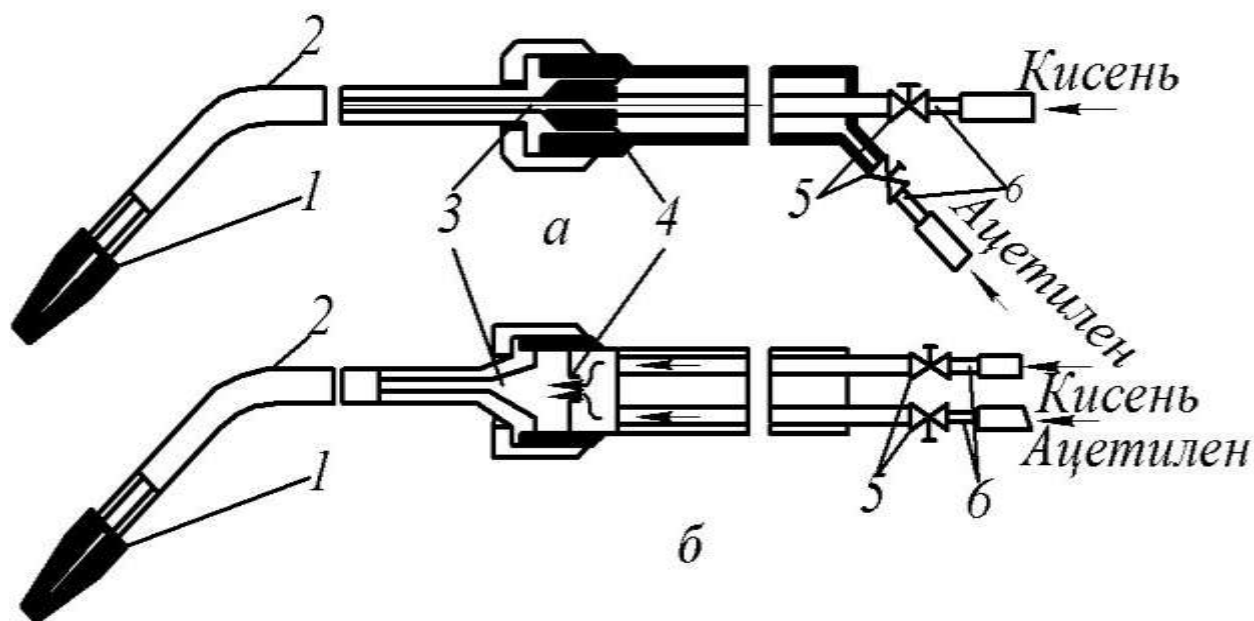


Рисунок 71 – Схеми ацетиленових пальників:
а – інжекторні; б – безінжекторні

Найбільше застосування мають інжекторні пальники, що працюють на суміші ацетилену з киснем. У інжекторних пальниках горючий газ підсмоктується в змішувальну камеру струменем кисню, що подається в пальник із більшим тиском, ніж горючий газ. Цей процес підсмоктування називається інжекцією. Схема інжекторного пальника показана на рис. 71, а. Кисень під тиском надходить до пальника і крізь приєднувальний штуцер 6 та регулювальний вентиль 5 подається до інжектора 4. Виходячи з великою швидкістю з вузького каналу інжекторного конуса, кисень створює значне розрідження в камері 3 і засмоктує горючий газ, який надходить крізь ацетиленові канали пальника до камери 3 змішувача, де й утворюється горюча суміш. Потім горюча суміш надходить по наконечнику 2 до мундштука 1, на виході з якого під час згоряння утворює зварювальне полум'я.

Пальники цього типу мають змінні наконечники з різними діаметрами вихідних отворів інжектора та мундштука, що дозволяє регулювати потужність ацетиленово-кисневого полум'я.

У безінжекторних пальниках горючий газ і кисень подають приблизно під однаковим тиском до 100 кПа. В них інжектор замінено простим змішувальним соплом, яке вкручується в трубку наконечника пальника.

Різаки для газового різання. Різаки слугують для змішування горючого газу з киснем для утворення підігрівального полум'я та подачі до розрізаного металу струменя різального кисню.

Ручні різаки для газового різання класифікують за такими ознаками:

- родом горючого газу, на якому вони працюють – для ацетилену, газів-замінників, рідкого пального;

- принципом змішування горючого газу та кисню – на інжекторні та безінжекторні;
- призначенням – універсальні та спеціальні;
- видом різання – для роздільного, поверхневого, киснево-флюсового, списового.

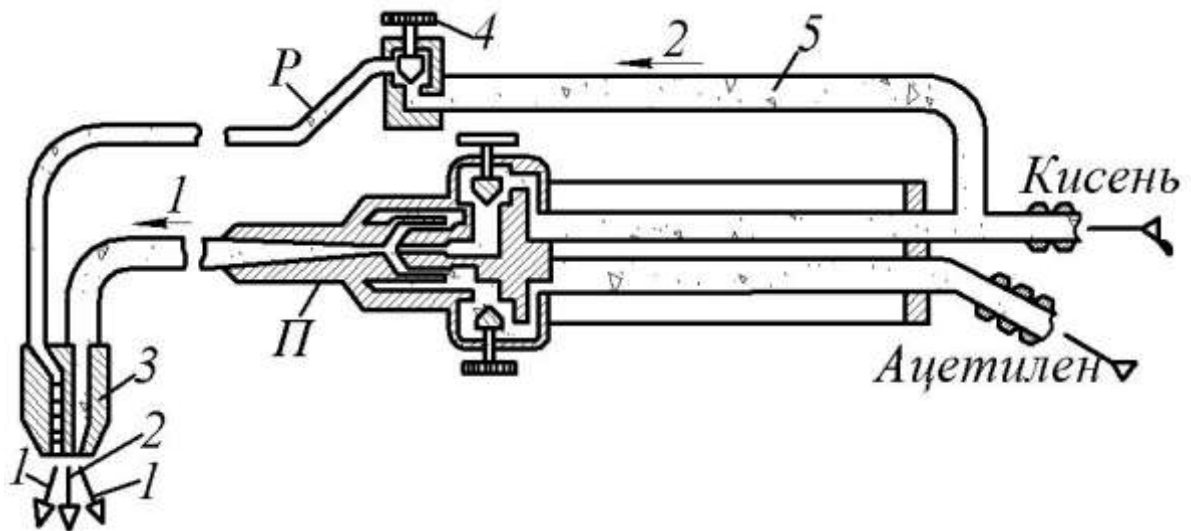


Рисунок 72 – Схема газокисневого різака:
 Р – різальна частина; П – підігрівальна частина

Зараз широкого застосування набули інжекторні різакі, що дозволяють різати сталь завтовшки від 3 до 300 мм. У різакі конструктивно об'єднані підігрівальна та різальна частини. Підігрівальна частина аналогічна за будовою до зварювального пальника. Різальна частина складається з додаткової трубки 5 для подачі різального кисню та вентиля 4 для регулювання подачі. У мундштуку 3 є два концентрично розташованих отвори для виходу підігрівального полум'я 1 та різального струменя 2. Газу в мундштук подають і регулюють за допомогою відповідних вентилів.

4.9 ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЇ КОНТАКТНОГО ЗВАРЮВАННЯ

4.9.1 Фізичні основи та види контактного зварювання

Контактне зварювання – зварювання із застосуванням тиску, за якого нагрівання виконується теплотою, що виділяється під час проходження електричного струму через з'єднувані частини, що перебувають у контакті. Контактне зварювання – основний вид зварювання тиском термомеханічного класу.

Основною ознакою всіх видів зварювання тиском (контактне, дифузійне, холодне, тертям та ін.) є пластична деформація металу в зоні контакту з'єднуваних деталей, яка потрібна для утворення зварних з'єднань. Під час зварювання відбувається примусове утворення міжатомних зв'язків між кристалічними ґратками з'єднуваних деталей. Виділяють три основні

стадії процесу утворення зварного з'єднання в процесі зварювання тиском: формування фізичного контакту, утворення хімічних зв'язків, розвиток наступних процесів на межі одержаного з'єднання та в об'ємі деталей.

На *першій стадії* забезпечується зближення атомних поверхонь. Усуваються нерівності та поверхневі плівки, формується фізичний контакт, тобто такий контакт тіл, за якого атоми перебувають на відстані, достатній для початку міжатомної взаємодії.

На *другій стадії* відбувається об'єднання електронних оболонок, виникають хімічні (для металів – металеві) зв'язки і утворюється зварне з'єднання.

На *третьій стадії* через межу з'єднання починається взаємна дифузія атомів, розвиваються різні супровідні зварюванню процеси, пов'язані з деформуванням металу, його нагріванням, із структурними змінами в зоні з'єднання та прилеглих ділянках.

Основними параметрами технологічного процесу під час зварювання тиском є величина тиску (деформація), температура нагріву, час зварювання, а також величина та швидкість взаємного переміщення зварюваних деталей і середовище (склад газової фази), в якому відбувається зварювання.

Місце з'єднання у разі контактного зварювання розігрівається електричним струмом, що проходить по металу (рис. 73). Кількість теплоти Q (Дж), що виділяється, визначається законом Джоуля-Ленца:

$$Q = I^2 R t,$$

де I – зварювальний струм, А;

R – повний опір між електродами зварювальної машини, Ом;

t – час проходження струму, с.

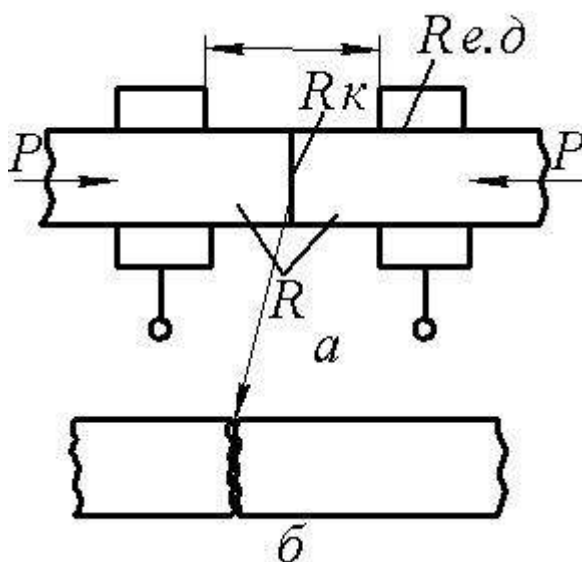


Рисунок 73 – Принципова схема контактної зварювання:

a – схема зварювання; b – фізичний контакт у стику; P – зусилля стиску

Повний опір R складається з опору деталей R_{δ} , опору між електродом і деталлю $R_{e,\delta}$ та опору зварювального контакту R_k між деталями, тобто

$$R = 2R_{\partial} + R_{e,\partial} + R_k.$$

Опір зварювального контакту R_k є найбільшим, бо поверхні стику заготовок навіть після ретельної обробки мають мікронерівності і дотикаються лише в окремих точках (рис. 73, б). Завдяки цьому справжній переріз контакту, через який проходить струм, різко зменшується, опір різко збільшується і в зоні контакту виникають великі густини струму. Крім того, на поверхні зварюваного металу є плівки окислів і забруднення з малою електропровідністю ρ , які також збільшують опір R_k у процесі зварювання.

Внаслідок високої густини струму в точках контакту метал нагрівається до термопластичного стану або до оплавлення. За безперервного стикування нагрітих деталей утворюються нові точки дотику, і так доти, доки не відбудеться повного зближення до міжатомних відстаней, тобто зварювання.

Контактне зварювання здійснюється без розплавлення та з розплавленням металу. В першому випадку з'єднання відбувається за деформації металу із створенням фізичного контакту між частинками з'єднаних поверхонь і наступним утворенням спільної структури за рахунок термопластичної деформації, в другому випадку можливе перемішування розплаву в замкненому об'ємі (точкове зварювання) і часткове його витиснення (стикове зварювання оплавленням) з наступною кристалізацією розплаву та пластичної деформації металу, що закристалізувався.

Великі швидкості нагрівання, пластичної деформації та охолодження істотно впливають на структуру металу та властивості зварного з'єднання: підвищується твердість та міцність. З'єднання з високою твердістю та несприятливою структурою, що не задовольняють після зварювання експлуатаційні вимоги, піддають термообробці.

Місцева термообробка ділянки зварювання може здійснюватися безпосередньо в зварювальній машині.

Завдяки високій продуктивності, надійності з'єднань, високому рівню механізації та автоматизації контактне зварювання знаходить застосування в промисловості. Вважається, що близько 30 % усіх зварних з'єднань дістають за допомогою контактного зварювання.

Залежно від профілю зварюваних матеріалів (лист, профільний прокат, труба), типу зварного з'єднання, товщини та металу застосовують різні види контактного зварювання.

Основними видами контактного зварювання є стикове, точкове і шовне.

4.9.2 Технологія стикового контактного зварювання

Стикове контактне зварювання — вид контактного зварювання, за якого з'єднання зварюваних частин відбувається по поверхні торців, що стикуються (рис. 74). Стиковим зварюванням з'єднують дріт, стержні, труби, штаби, рейки, ланцюги та інші деталі.

За стикового зварювання заготовки *1* закріплюють у затискачах *2* стикової машини. Один із затискачів – рухомий, інший нерухомий. Живлення електричним струмом здійснюється від зварювального трансформатора *3*, вторинна обмотка якого з'єднана з плитами гнучкими шинами, а первинна живиться від мережі змінного струму через вмикальний пристрій. За допомогою механізму осадки рухома плита переміщується, зварювані деталі стискаються під зусиллям *P*.

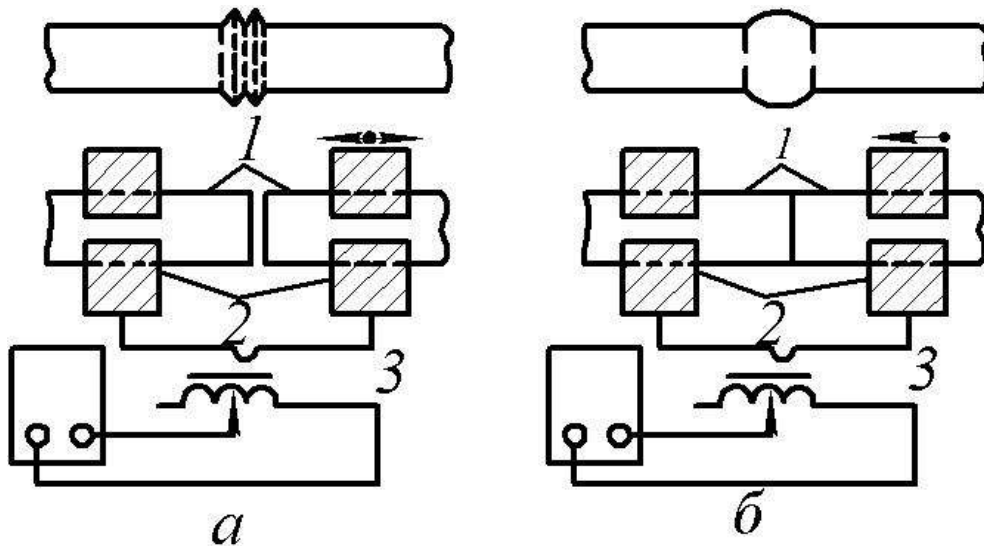


Рисунок 74 – Контактне дугове зварювання:

а – опором; *б* – оплавленням;

1 – деталь; *2* – затискачі; *3* – зварювальний трансформатор

Розрізняють стикове зварювання опором (рис. 74, *а*) і оплавленням (рис. 74, *б*).

Зварюванням опором називається стикове зварювання з розігрівом стику до пластичного стану з наступною осадкою.

Зварюванням оплавленням називається стикове зварювання з розігрівом стику до оплавлення і наступною осадкою. Розрізняють зварювання безперервним і переривчастим (імпульсним) оплавленням, а також оплавленням з підігрівом.

Параметрами режиму контактного зварювання є струм (I , A) та його густина (j , A/mm^2), зусилля стискання зварюваних деталей (P , $Па$), час проходження струму (t , $с$), установочна довжина (l , $мм$). Установочною довжиною називають відстань від торця заготовки до внутрішнього краю електрода стикової машини, виміряну до початку зварювання.

Для правильного формування зварного з'єднання та високих механічних властивостей з'єднання потрібно, щоб процес проходив у певній послідовності. Сумісне графічне зображення зміни параметрів під час зварювання називається циклограмою зварювання. Цикл контактного стикового зварювання показано на рис. 75.

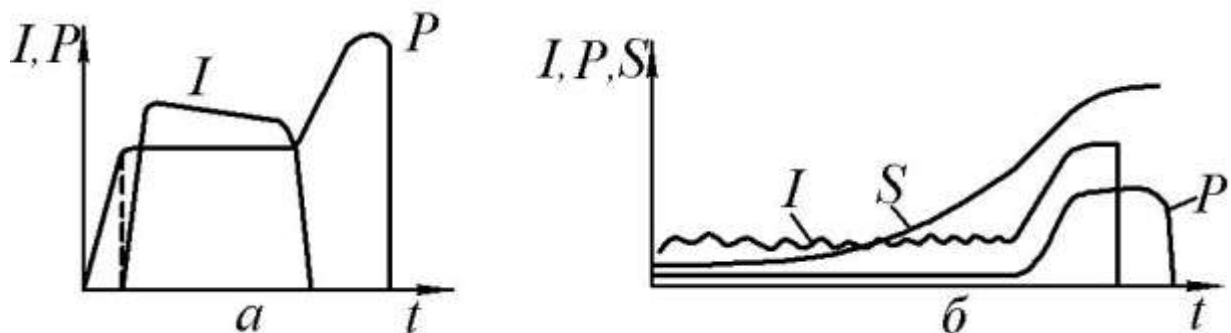


Рисунок 75 – Циклограми стикового контактного зварювання:

a – опором; $б$ – оплавленням;

I – зварювальний струм; P – зусилля стиску; S – переміщення рухомої плити; t – час

Підготовка деталей під стикове зварювання складається з таких операцій, як надання певної форми контактним поверхням деталей, випрямлення зварюваних деталей, обробка кінців та очищення контактних ділянок.

Рівномірне підігрівання деталей без ретельної їх підготовки чи імпульсного вмикання струму під час зварювання опором утруднене. Тому торці роблять з виступами (кільцевими, конусними, сферичними), наявність яких локалізує нагрівання, полегшує зварювання опором і видалення окисів. Оплавленням добре зварюються спеціально підготовлені деталі з паралельними торцями. Для зварювання оплавленням придатні деталі після механічного чи термічного різання з очищенням поверхонь від задирок і шлаку. Перекіс контактних поверхонь має бути не більший, ніж 15 % від допуску на оплавлення. Окалину видаляють металевим шротом, травленням, нагріванням газовим полум'ям, різанням. Дрібні деталі очищають у галтувальних барабанах. Зачищення на багатьох виробництвах автоматизоване. Іржу також видаляють, бо вона розкладається в зоні нагріву, підвищує окислювальну здатність середовища і призводить до дефектів зварювання.

Під час зварювання опором чисто оброблені поверхні зварюваних деталей приводять до зіткнення, щільно стискають, потім вмикають зварювальний струм. Проходження струму через деталі призводить до поступового нагрівання металу в стику до температури, близької до температури плавлення. Потім збільшують зусилля (осаджують деталі). Далі відбувається пластична деформація металу в стику і утворення з'єднання в твердому стані. Під час зварювання опором не забезпечується достатньо повне видалення окисних плівок, важко домогтися рівномірного нагріву деталей по всьому перерізу, тому зварювання опором використовується обмежено для виробів відносно невеликого перерізу (до 200... 250 мм).

Найширше застосовують стикове зварювання оплавленням під час створення різноманітних конструкцій як малих, так і великих перерізів (до 100000 мм^2 і більше). Типовими виробами, які зварюють стиковим зварюванням, є елементи трубчастих конструкцій, колеса, кільця, рейки, залізобетонна арматура та ін.

Безперервним оплавленням зварюють деталі компактного перерізу до 1000 мм^2 , а також листи і труби до 10000 мм^2 . Під час програмування напруги та використання регуляторів можливе зварювання деталей компактного перерізу до 20000 мм^2 . Підігрів, знижуючи потрібну потужність, дозволяє зварювати вироби великої площі. Імпульсним оплавленням зварюють деталі компактного перерізу площею до 400000 мм^2 і більше.

В процесі зварювання безперервним оплавленням деталі наближають за увімкненого зварювального струму і дуже малого зусилля. Деталі дотикаються спочатку до окремих невеликих ділянок, через які проходить струм високої густини, що викликає оплавлення деталей внаслідок безперервного утворення та руйнування контактів-перемичок між їх торцями. Як результат оплавлення на торці утворюється шар рідкого металу, який під час осадження разом із забрудненнями та окисними плівками витискається із стику. З'єднання утворюється в твердому стані.

Під час переривчастого оплавлення затиснуті заготовки наближають під струмом з повільно зростаючою швидкістю за зворотно-поступального руху.

Режим стикового зварювання оплавленням визначається установочною довжиною зварюваних деталей $l_1 + l_2$, припусками на оплавлення $\Delta_{\text{опл}}$ та осадку $\Delta_{\text{ос}}$, швидкостями оплавлення $v_{\text{опл}}$ та осадки $v_{\text{ос}}$, струмами оплавлення $I_{\text{опл}}$ та осадки $I_{\text{ос}}$ (або напругою на зварювальному контурі), тривалістю осадки під струмом $t_{\text{ос.с}}$ та зусиллям затиску $P_{\text{зат}}$. Підігрів задають температурою T_n або тривалістю t_n та кількістю імпульсів і пауз.

Використовують два різновиди процесу: за обмеженої потужності W та тривалого часу оплавлення $t_{\text{опл}}$ або за обмеженого $t_{\text{опл}}$ і великої W . У першому випадку зварюють деталі компактного перерізу, товстостінні труби та профілі, а в другому – смуги, труби малого діаметра, стержні та інші деталі масового виробництва. Точний розрахунок параметрів режиму зварювання утруднений. Тому параметри вибирають за дослідними даними з наступною перевіркою якості з'єднання.

Для низьковуглецевої сталі короткочасне безперервне оплавлення тонкостінних деталей здійснюється орієнтовно за:

- потужності $0.15 \dots 0.25 \text{ кВ} \cdot \text{А/мм}^2$;
- густини струму оплавлення $j_{\text{опл}} = 10 \dots 20 \text{ А/мм}^2$;
- струму осадки $j_{\text{ос}} = 40 \dots 60 \text{ А/мм}^2$.

Припуски на підігрів і оплавлення мають бути достатніми для рівномірного розігріву деталей та створення на торцях шару розплаву. Швидкість $v_{\text{опл}}$ і тривалість оплавлення $t_{\text{опл}}$ залежать від напруги на зварювальному контурі, потрібної густини струму, ступеня підігріву, марки матеріа-

лу. Швидкість поступово зростає, досягаючи іноді 6...10 мм/с. Середня $v_{опл}$ для низьковуглецевої сталі становить 1...2.5 мм/с, для легованої – 2.5...3.5 мм/с й більше. У разі продуктивної роботи $t_{опл}$ деталей компактного перерізу становить 1 с на 30 мм², а листів і труб – 2...4 с на 1 мм товщини. Швидкість осадження $v_{ос}$ вибирають, виходячи з умов запобігання кристалізації та окислення розплаву. За продуктивної роботи початкова $v_{ос}$ для низьковуглецевої сталі становить 30...60 мм/с, для високолегованих сталей – 80...100, алюмінію та інших металів, які легко окислюються, та сплавів – 100...200 мм/с. Орієнтовний тиск $P_{ос}$ під час зварювання низьковуглецевої сталі безперервним оплавленням становить 50...100 МПа, за зварювання з підігрівом – 40...60 МПа, для високолегованої сталі – відповідно 120... 200, 100...140 МПа.

Імпульсне оплавлення локалізує нагрів і розширює високотемпературну зону, запобігаючи цим швидку кристалізацію розплаву. Після оплавлення всього перерізу вимикають струм і осаджують заготовки. Імпульсне оплавлення зменшує потрібну для оплавлення потужність у 10...15 разів до 0.02...0.03 кВ·А/мм² і припуск на оплавлення в 5...6 разів. Імпульсне оплавлення здійснюється за густини струму $j_{опл} = 5...10$ А/мм², а для розширення зони нагріву у деталей великого перерізу – за $j_{опл} = 1$ А/мм². Збільшення густини струму локалізує нагрів. Імпульсне оплавлення в 1.5...2 рази швидше, ніж безперервне. Імпульсним оплавленням зварюють як звичайні вуглецеві, так і різні леговані сталі та сплави.

Для захисту металу від взаємодії з газами під час стикового зварювання хімічно активних металів використовують захисні середовища (інертні гази).

Серйозною проблемою стикового зварювання є необхідність видалення задирок – металу, видавленого осадкою. Задирки зачищають вручну або механічними пристроями – задиркознімачами – відразу після зварювання, після охолодження з'єднання або після термообробки.

4.9.3 Технологія точкового контактного зварювання

Точкове контактне зварювання – контактне зварювання, за якого з'єднання елементів відбувається на ділянках, обмежених площею нагріву електродів, які проводять струм і передають зусилля стиску (рис. 76).

Точковим контактним зварюванням звичайно з'єднують листові конструкції з однорідних або різнорідних чорних і кольорових металів однакової та різної товщини або листи з катаними, пресованими, кованими чи обробленими різанням деталями. Точкове зварювання використовують під час виготовлення деталей автомобілів і тракторів, вузлів сільськогосподарських машин, холодильників, залізничних вагонів, деталей мікроелектроніки, предметів домашнього вжитку та ін.

За кількістю одночасно зварюваних точок точкове зварювання може бути одно-, дво- та багатоточковим. За точкового зварюванні деталі складають внапусток, затискають між електродами, з'єднаними із зварюваль-

ним трансформатором, під час вмикання якого деталі нагріваються короткочасним (0.01...0.5 с) імпульсом струму до появи розплавленої зони в місці контакту деталей або ядра точки. Зусилля після вимкнення струму зберігається деякий час для того, щоб кристалізація розплавленого металу точки відбувалася під тиском, що запобігає появі усадочних дефектів – тріщин і дірчастості. Точкове зварювання залежно від розташування електродів відносно зварюваних деталей може бути двостороннім і одностороннім. У разі двостороннього зварювання (рис. 76, а) дві чи більшу кількість заготовок 1 і 2 стискають між електродами точкової машини. У випадку одностороннього зварювання (рис. 76, б) струм розподіляється між верхнім і нижнім листами 3 і 4, причому нагрів здійснюється струмом, що проходить через нижній лист. Для збільшення цього струму передбачається струмопровідна мідна підкладка 5. Одностороннім зварюванням можна з'єднувати деталі одночасно двома точками.

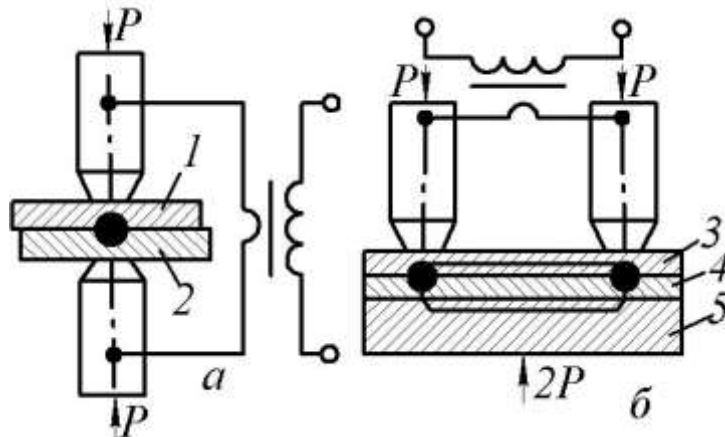


Рисунок 76 – Схема точкового контактного зварювання:
а – двостороннього; б – одностороннього

Підготовка деталей до зварювання має велике значення для забезпечення стабільності процесу зварювання і одержання якісних з'єднань. Деталі перед зварюванням зачищають, випрямляють, підганяють і складають у пристрої чи прихвачують. Деталі з низьковуглецевих сталей знежирюють ацетоном, бензином чи іншими органічними розчинниками масел і обробляють повстяними чи вулканітовими шліфувальними кругами, щітками, абразивним полотном або травлять. Товсті окисні плівки можуть видалятися роликками із косозубою насічкою, дробоструминною чи дробометальною обробкою, нагріванням полум'ям, накернюванням ділянок зварювання, а також вакуум-дробинною обробкою. Підготовлені поверхні пасивують.

У масовому виробництві зазвичай використовують травлення, а у дрібносерійному і у разі повторного зварювання дефектних ділянок – зачищення щітками або наждачним папером.

Деталі зачищають повністю або на ділянці напуску. Після механічного зачищення з поверхонь видаляють пил, абразивні включення та оксиди. Деталі з металевими покриттями звичайно не зачищають і прихвачують на

зварювальних режимах. Невеликі деталі та вузли, які жорстко фіксуються в пристроях, зварюють без прихватки. Відстань між прихватками у сталі 50...80 мм, у легких сплавів – 70...150 мм. Великі вузли іноді прихватують дуговим зварюванням з наступним вирубуванням прихвачених місць. Спарені деталі випрямляють на пресах або місцевим нагрівом, за допомогою якого усувають випини.

Параметрами режиму точкового зварювання є: зусилля стиску, густина струму та час проходження струму. Одну з циклограм точкового зварювання показано на рис. 77.

Весь цикл зварювання складається з таких стадій:

- стискання зварюваних деталей між електродами;
- вмикання струму та розігрівання місця контакту до температури плавлення з утворенням литого ядра точки;
- вмикання струму та збільшення зусилля стиску для поліпшення структури зварної точки;
- знімання зусилля з електродів.

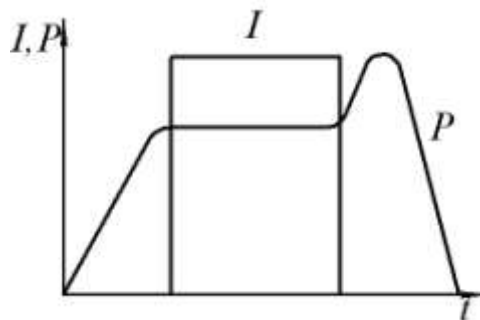


Рисунок 77 – Циклограма точкового зварювання:

I – зварювальний струм; P – зусилля стиску; t – час

Параметри режиму вибирають з урахуванням обладнання, що є за технологічною картою, таблицями орієнтовних режимів, номограмами або дослідним шляхом.

Точкове зварювання проводять на м'яких і жорстких режимах. М'який режим характеризується відносно малою густиною струму (70...160 А/мм²), великою тривалістю циклу (0.5...3 с) за порівняно малого тиску (15...40 МПа). Жорсткий режим характеризується великими густинами струму (160...400 А/мм²), великими тисками (до 150 МПа) та малою тривалістю циклу зварювання (0.1...1.5 с). М'які режими застосовують переважно під час зварювання вуглекислих і низьколегованих сталей, алюмінієвих і мідних сплавів.

Різновидом точкового зварювання є рельєфне зварювання (рис. 78), коли початковий контакт деталей відбувається по завчасно підготовлених виступах (рельєфах). У випадку рельєфного зварювання заготовки 2 і 4 за-тискають між плоскими електродами 5 і 1. У початковий період зварювання наявність рельєфу 3 дає змогу забезпечити концентроване нагрівання у

місці контакту за великих густин струму. Далі рельєфи поступово деформуються і на певній стадії відбувається плавлення та утворення ядра точки.

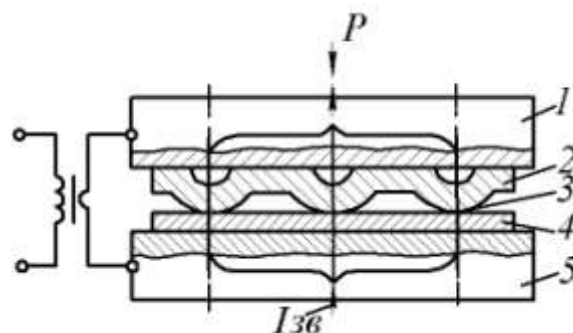


Рисунок 78 – Схема рельєфного зварювання

4.9.4 Технологія шовного контактного зварювання

Шовне контактне зварювання – контактне зварювання, за якого з'єднання елементів виконується внапусток обертовими дисковими електродами у вигляді безперервного або переривчастого шва. Під час шовного зварювання утворення безперервного з'єднання (шва) відбувається послідовним перекриттям точок однієї за одною. У разі шовного зварювання електроди виконують у вигляді обертових дискових роликів, за допомогою яких відбувається передача зусилля деталям, підведення струму та переміщення деталей (рис. 79). Як і при точковому зварюванні, деталі, звичайно, складають внапусток і нагрівають струмом без застосування спеціальних засобів захисту металу, що нагрівається, від взаємодії з атмосферою. Шовне зварювання, так само як і точкове, можна виконувати за одностороннього і двостороннього положення електродів (роликів).

Шовне зварювання застосовують у масовому виробництві під час виготовлення місткісних виробів з товщиною стінки 0.3...3 мм, де потрібні герметичні шви – бензобаки, труби, бочки, сифони і т. п.

На практиці застосовують такі способи шовного зварювання: безперервне, переривчасте з безперервним обертанням роликів, переривчасте з періодичним обертанням роликів.

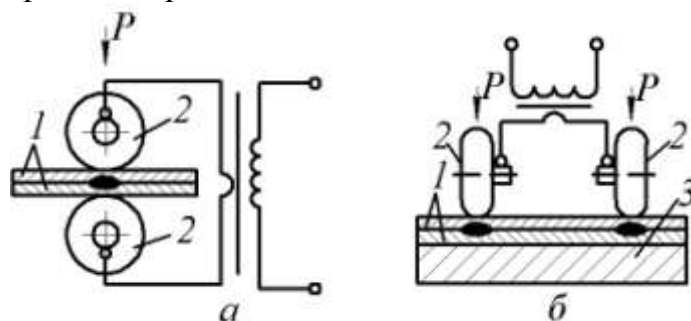


Рисунок 79 – Схема шовного зварювання:

а – двостороннього; б – одностороннього;

1 – заготовки; 2 – електроди; 3 – мідна підкладка

Безперервне шовне зварювання виконують суцільним швом за постійного тиску роликів на зварювані деталі і постійно ввімкненого зварюва-

льного струму протягом усього процесу зварювання. Недоліками способу є підвищені вимоги щодо підготовки поверхні, однорідності товщини та хімічного складу металу зварюваних деталей.

Переривчасте зварювання з безперервним обертанням роликів також виконують за постійного тиску стиску, а зварювальний струм подають періодично, у цьому випадку шов формується у вигляді зварних точок, які перекривають одна одну. Шов матимемо високої якості.

Під час переривчастого зварювання з періодичним обертанням роликів зварювальне коло замикається в момент зупинення роликів (крокове зварювання). Такий спосіб забезпечує найякісніший шов, бо формування зварної точки відбувається під тиском стискання. Проте машини для такого способу зварювання дуже складні і менш продуктивні.

4.9.5 Конденсаторне зварювання

Недоліком контактного зварювання є значна короткочасна потужність, яка споживається з електромережі в момент зварювання, що створює важкі умови для живильної мережі. Розроблено види *зварювання запасеною енергією*. Це зварювання, за якого енергія накопичується в спеціальних пристроях з подальшим використанням для нагріву з'єднуваних частин. Після накопичення у будь-якому приймачі енергія через зварювальний трансформатор або безпосередньо короткочасно витрачається на зварювання. Після циклу зварювання йде процес накопичення енергії і знову зварювання.

Існує чотири види запасеної для зварювання енергії: електростатична (або конденсаторна), електромагнітна, інерційна та акумуляторна. Енергія відповідно накопичується в батареї конденсаторів, магнітному полі спеціального зварювального трансформатора, обертових частинах генератора або акумуляторній батареї.

Найбільшого застосування набуло конденсаторне зварювання – *зварювання запасеною енергією*, накопиченою в електричних конденсаторах. Енергія в конденсаторах накопичується під час їх заряджання від джерела постійної напруги (генератора чи випрямляча), а потім у процесі розряджання перетворюється на теплоту, що використовується для зварювання. Накопичену в конденсаторах енергію A можна регулювати зміною ємності та напруги зарядки $A = CU^2/2$, де C – ємність конденсаторів, Φ ; U – напруга зарядки, B .

Існують два види конденсаторного зварювання: безтрансформаторне, коли конденсатори розряджаються безпосередньо на зварювані деталі, і трансформаторне, коли конденсатор розряджається на первинну обмотку зварювального трансформатора, у вторинному колі якого знаходяться попередньо стиснуті зварювані заготовки. *Безтрансформаторне конденсаторне зварювання* призначене переважно для стикового зварювання, *трансформаторне* – для точкового та шовного, але може бути використане й для стикового. Перевагами конденсаторного зварювання є: точкове дозу-

вання кількості енергії, що не залежить від зовнішніх умов, зокрема від напруги в мережі; малий час проходження струму ($0.001 \dots 0.0001$ с) за високої густини струму, що забезпечує малу зону термічного впливу; можливість зварювання матеріалів дуже малих товщин (до кількох мікрон); невисока споживна потужність ($0.2 \dots 2$ $\text{kB} \cdot \text{A}$). Конденсаторне зварювання застосовують переважно у приладобудуванні.

4.9.6 Дифузійне зварювання

Дифузійне зварювання – зварювання тиском, яке здійснюється за рахунок взаємної дифузії атомів частин, що контактують, за відносно тривалої дії підвищеної температури і за незначної пластичної деформації.

Основні параметри дифузійного зварювання – температура нагріву, тиск, час нагріву, середовище, в якому проводять зварювання.

Температура для однорідних металів, як правило, має становити $0.5 \dots 0.8$ температури плавлення металу чи сплаву, а у разі зварювання різнорідних – $0.5 \dots 0.7$ температури легкоплавкішого металу. Така температура прискорює взаємну дифузію атомів матеріалів через поверхню стику і полегшує зняття нерівностей поверхні та пластичне деформування металу.

Нагрівання здійснюється переважно індукційними струмами, можна використати й інші джерела нагріву: звичайні опори, електричний струм, який пропускають по самих деталях, електронний промінь та ін.

Тиск у контакті з'єднуваних деталей залежно від температури та роду зварюваних матеріалів може змінюватися від $3 \dots 5$ до 100 МПа . Час зварювання становить від кількох до десятків хвилин. Видалення поверхневих плівок і запобігання можливості їх утворення в процесі зварювання досягається використанням вакуумного захисту, ретельним попереднім зачищенням зварюваних поверхонь. Зварювання виконують в умовах безокислювального нагріву, для чого в зварювальній камері підтримується розрідження ($10^{-1} \dots 10^{-3}$) Па .

Особливим видом дифузійного зварювання є зварювання в контрольованій атмосфері, за якої як захисні гази використовуються H_2 , Ar , He .

Схему дифузійного зварювання показано на рис. 80. Установка для дифузійного зварювання складається з вакуумної камери, в якій виконують зварювання, спеціальних насосів для створення вакууму, нагрівального пристрою з джерелом живлення та пристрою для передачі тиску.

Орієнтовні параметри режиму зварювання, наприклад, для титанових сплавів: температура нагріву $T = 800 \dots 1000$ $^{\circ}\text{C}$, тиск $p = 5 \dots 10$ МПа , час нагріву $t = 5 \dots 10$ хв; для нікелю, відповідно, $T = 1000 \dots 1170$ $^{\circ}\text{C}$, $p = 15 \dots 20$ МПа , $t = 6 \dots 20$ хв.

Перевагами дифузійного зварювання є можливість зварювання різнорідних матеріалів, одержання рівномірних з'єднань без помітної зміни фізико-хімічних властивостей, відсутність присаджувальних матеріалів, висока якість захисту.

Дифузійне зварювання дозволяє створювати міцні з'єднання не лише однорідних, але й різнорідних металів і сплавів, зокрема й таких, які різко відрізняються за своїми властивостями: малопластичних, тугоплавких, таких, що не розчиняються один в одному або утворюють між собою крихкі з'єднання. За допомогою дифузійного зварювання дістають з'єднання таких пар металів і сплавів, безпосередньо з'єднати які іншими видами зварювання дуже складно (наприклад, титан із корозійностійкою сталлю, титан з алюмінієм, сталь з чавуном, мідь з молібденом, вольфрам з ніобієм та ін.).

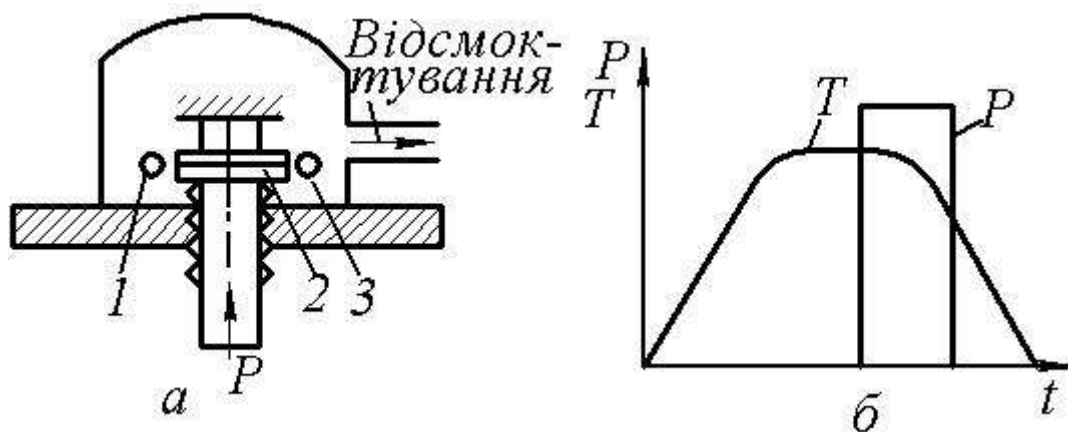


Рисунок 80 – Дифузійне зварювання:

а – схема зварювання; *1* – нагрівач; *2* – заготовки; *3* – камера;
б – циклограма зварювання; *P* – зусилля, стиску; *T* – температура; *t* – час

4.9.7 Ультразвукове зварювання

Ультразвукове зварювання – зварювання тиском, яке здійснюється внаслідок ультразвукових коливань. За цього виду зварювання нерознімне з'єднання утворюється внаслідок сумісної дії на зварювані деталі механічних коливань високої (ультразвукової) частоти та відносно невеликих стискальних зусиль. Зварювання відбувається внаслідок взаємного тертя зварюваних поверхонь, нагріву та тиску. Сили тертя виникають під час дії на заготовки, стиснуті осьовою силою, механічних коливань ультразвукової частоти (20...30 кГц). Щоб дістати таку частоту, використовують магнітострикційний ефект, який полягає в зміні розмірів деяких металів, сплавів і керамічних матеріалів під дією змінного магнітного поля.

На рис. 81 показано найпростішу схему ультразвукового зварювання. Зварювані заготовки *5* розміщують на опорі *б*. Наконечник *3* з'єднаний з магнітострикційним перетворювачем *1* через трансформатор пружних коливань *2*, які разом з робочим інструментом *4* являють собою хвилевод (на рисунку показано, як змінюється амплітуда коливань по довжині хвилеводу). Ультразвук випромінюється безперервно в процесі зварювання. Елементом коливальної системи, що збуджує пружні коливання, є електромеханічний перетворювач *1*, який використовує магнітострикційний ефект. Змінна напруга створює в обмотці перетворювача намагнічувальний

струм, який збуджує змінне магнітне поле в матеріалі перетворювача. В процесі зміни величини напруженості магнітного поля в матеріалі виникає періодична зміна розмірів, у цьому разі частота пружних коливань дорівнює подвійній частоті струму. Амплітуда коливань на кінці хвилепроводу становить на холостому ході $\sim 20\ldots 40$ мкм. Зварювання відбувається під дією тертя, що викликається мікроскопічним зворотно-поступальним переміщенням частинок на третьових поверхнях.

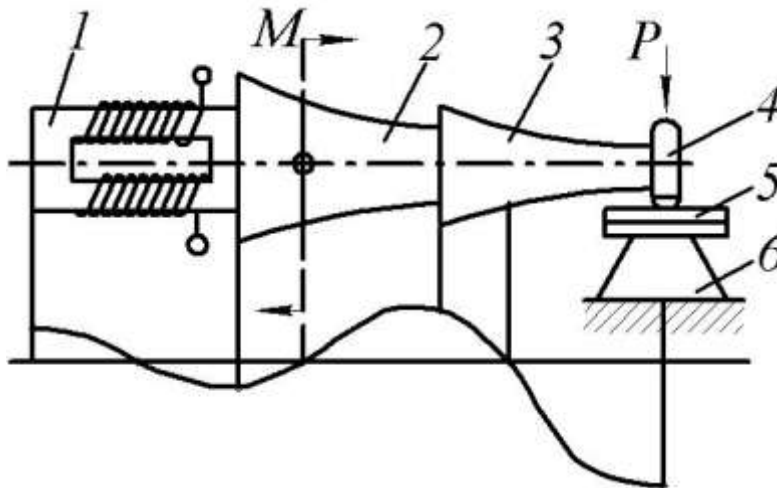


Рисунок 81 – Схема ультразвукового зварювання

Отже, внаслідок ультразвукових коливань у тонких шарах поверхонь, що контактують, створюються зсувові деформації, які руйнують поверхневі плівки. Із руйнуванням плівок утворюються вузли схоплювання, приповерхневі шари металу нагріваються, трохи розм'якшуються і під дією стискального зусилля пластично деформуються, зварювані поверхні наближаються до відстані дії міжатомних сил, створюється міцне зварне з'єднання.

Порівняно невелика теплова дія на зварювані метали забезпечує мінімальну зміну їх структури та властивостей. Наприклад, для *Si* температура в зоні контакту не перевищує $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, за зварювання *Al* – $200\ldots 300\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Параметрами ультразвукового зварювання є потужність генератора коливань, амплітуда коливань, тиск і час зварювання. Ультразвукове зварювання застосовують, щоб дістати точкові та шовні з'єднання металів і сплавів невеликої товщини (як правило, менше 1 мм) і для зварювання пластмас.

4.9.8 Зварювання тертям

Зварювання тертям – зварювання тиском, за якого нагрівання здійснюється тертям, яке викликається відносним переміщенням зварюваних поверхонь.

Особливості процесу:

- нагрівання стиснутих деталей здійснюється внаслідок тертя з'єднуваних поверхонь під час їх обертання або зворотно-поступального переміщення однієї відносно іншої, водночас механічна енергія безпосередньо переходить в теплову в місці стику;
- строго локалізоване тепловиділення в приповерхневих шарах зварюваних деталей;
- зварювання відбувається в твердому стані без розплавлення металу зварюваних деталей;
- зварне з'єднання утворюється внаслідок сумісної пластичної деформації під час нагрівання та стискання за рахунок виникнення металевих зв'язків між чистими контактуючими поверхнями зварюваних деталей; окисні плівки, що є на металевих поверхнях у місці з'єднання, руйнуються внаслідок тертя і видаляються за рахунок пластичної деформації в радіальному напрямі.

Принципові схеми зварювання тертям показано на рис. 82. Найпростіша та найпоширеніша схема процесу показана на рис. 82, *а*. Дві деталі, які потрібно зварити, встановлюють співвісно в затискачах машини; одна з них нерухома, інша приводиться в обертання навколо їх спільної осі. На спряжених торцевих поверхнях деталей, притиснутих одна до одної осьовими зусиллями P , виникають сили тертя.

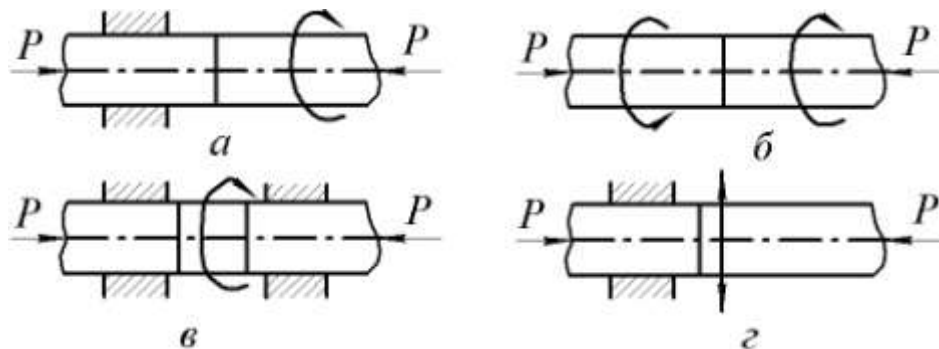


Рисунок 82 – Схема зварювання тертям:

- а* – за обертання однієї деталі; *б* – за обертання обох деталей;
в – за нерухомих деталей з обертовою вставкою;
г – за зворотно-поступального руху однієї деталі

Робота, що витрачається під час обертання на переборення цих сил тертя, перетворюється на теплоту, яка виділяється на поверхнях тертя і нагріває прилеглі до них тонкі шари металу до температур, потрібних для утворення зварного з'єднання (1000... 1300 °С – під час зварювання чорних металів). Нагрівання закінчується за швидкого (практично миттєвого) припинення відносного обертання. Підготовлений таким чином до зварювання метал піддають сильному стиску – проковуванню, внаслідок чого утворюється міцне зварне з'єднання.

Основними параметрами процесу зварювання тертям є швидкість обертання зварюваних деталей, величина осьового зусилля за нагрівання та проковування, величина осадки під час нагрівання, тривалість прикладання зусилля проковування. Приблизний режим за зварювання заготовок з вуглецевої сталі діаметром 50 мм: частота обертання 400 об/хв, осьове зусилля в процесі нагрівання 100 кН, осьове зусилля під час проковування 200 кН, час нагрівання 20 с, час проковування 2.0 с, вживана потужність 25 кВт, машинний час процесу – 22 с. Перевагами зварювання тертям є висока продуктивність процесу, малі витрати енергії (в 5...10 разів менші, ніж за стикового контактного зварювання), висока якість зварних з'єднань, можливість зварювання металів і сплавів у різних поєднаннях, простота механізації та автоматизації.

Недоліками зварювання тертям є неуніверсальність процесу (з його допомогою можна зварювати такі пари деталей, з яких хоч би одна має бути тілом обертання), громіздкість обладнання, наявність задирок після зварювання.

Зварювання тертям застосовують для з'єднання деталей впритул (стержнів, труб) і для утворення Т-подібних з'єднань. У промисловому виробництві зварювання тертям використовують для з'єднання деталей перерізом 50...10 000 мм² з однойменних і ряду різнойменних конструкційних матеріалів.

4.9.9 Холодне зварювання

Холодне зварювання – зварювання тиском за значної пластичної деформації без зовнішнього нагрівання з'єднуваних поверхонь. Фізична суть процесу полягає в наближенні за рахунок пластичної деформації зварюваних поверхонь до утворення металевих зв'язків між ними і одержання таким чином міцного зварного з'єднання. Відмітною особливістю холодного зварювання є необхідність значної об'ємної пластичної деформації та малого ступеня її локалізації в зоні контакту з'єднуваних матеріалів. Це пов'язано з необхідністю руйнування та видалення окисних плівок із зони контакту механічним шляхом, тобто за рахунок інтенсивної сумісної деформації. Велике зусилля стиску забезпечує розрив окисних плівок, їх подрібнення та утворення чистих поверхонь, здатних до схоплювання.

Зварюваність металів під час холодного зварювання залежить від їх пластичності та якості підготовки поверхні. Чим пластичніші метали, рівніші й чистіші їх поверхні, тим якісніше вони зварюються. Добре зварюються пластичні сплави алюмінію, міді, нікелю, срібла, золота та інші подібні метали і сплави в однорідних і різнорідних поєднаннях. У не досить пластичних металах за великих деформацій можуть утворюватися тріщини. Високоміцні метали та сплави холодним зварюванням не зварюються.

Найбільше застосування холодне зварювання знайшло у виробництві виробів домашнього вжитку з алюмінію та його сплавів, в електротехнічній промисловості та транспорті для з'єднання мідних і алюмінієвих дро-

тів. Холодним зварюванням виконують точкові, шовні, стикові з'єднання. Перед зварюванням поверхні, які потрібно зварювати, очищають від забруднення знежиренням, обробкою обертовою дріткою, шабруванням. Під час зварювання дротів встик обрізують лише торці. Для холодного зварювання використовують стандартне пресове та прокатне обладнання, яке укомплектовують спеціальним інструментом відповідно до зварюваних деталей, застосовують також спеціалізовані машини.

Холодним зварюванням з'єднують метали та сплави завтовшки 0.2...15 мм. Головними характеристиками процесу є тиск і величина деформації. Залежно від складу та товщини зварюваного металу тиск становить 150... 1000 МПа, ступінь відносної деформації 50...90%, яка має такі значення для різних металів, %: *Au* – 35...40; *Al* – 55...60; *Ti* – 70...75; *Pb* і *Ag* – 80...85; *Sn*, *Ni*, *Cu* – 85...90; алюмінієві сплави – 75...80.

Листи завтовшки 0.2...15 мм зварюють внапусток втискуванням у товщу металу з одного чи з двох боків пуансонів. З'єднання виконують у вигляді окремих точок чи безперервного шва. Ширину або діаметр пуансона d_n вибирають залежно від товщини S зварюваного матеріалу, $d_n = (1...3)S$. Герметичне шовне з'єднання можна дістати втискуванням пуансона по всій довжині шва або обкочуванням ролика.

Стержні, штаби, профілі та проводи з'єднують впритул стискуванням зварюваних елементів. Тиск за холодного зварювання встик становить для *Al* 700...800 МПа, *Cu* – 2000...2500, *Cu* з *Al* – 1500...2000 МПа. Величина пластичної деформації залежить від довжини випущених із затискачів кінців зварюваних стержнів, які потім повністю витискаються із зони стику в процесі зварювання. Для забезпечення міцності з'єднання, що залежить від величини пластичної деформації, довжина вильоту стержня становить для *Al* – $(1...1.2)d$, для *Cu* – $(1.25...1.5)d$, де d – діаметр стержня. При зварюванні *Al* з *Cu* виліт мідного стержня має бути на 30...40 % більший, ніж алюмінієвого.

Ступінь потрібної деформації за умови зварювання різнорідних металів визначається властивостями того із зварюваних металів, для якого потрібна менша деформація. Цим користуються під час зварювання малопластичних металів, застосовуючи прокладки з пластичних металів або прошарки, які наносять електролітичним способом.

Різновидом зварювання тиском, близьким за фізичною суттю до холодного зварювання, є термокомпресійне зварювання, яке відрізняється від холодного зварювання тим, що місце з'єднання підігрівають до температури нижче температур утворення рідинних фаз, а потім стискають. Основними параметрами процесу є зусилля стиску, температура підігріву та тривалість витримки.

4.9.10 Зварювання вибухом

Зварювання вибухом – зварювання, за якого з'єднання утворюється за рахунок сумісної пластичної деформації внаслідок викликаного вибухом

співударяння швидко рухомих деталей. Кінетична енергія співударяння з'єднуваних частин витрачається на роботу сумісної пластичної деформації шарів металу, які контактують, що призводить до утворення зварного з'єднання. У цьому випадку частина роботи пластичної деформації переходить у теплоту, яка може розігрівати метал у зоні з'єднання до високих температур, аж до плавлення локальних об'ємів.

Більшість видів зварювання вибухом ґрунтується на використанні напрямленого (кумулятивного) вибуху (рис. 83). З'єднувані поверхні двох заготовок 3 та 4 (у найпростішому випадку пластини), одна з яких (4) нерухома і є основою, розміщують паралельно або під кутом α одну до одної на відстані h_0 . На рухому заготовку 3 кладуть ВР (вибухову речовину) 2 завтовшки H , а з боку, що знаходиться над вершиною кута, встановлюють детонатор 1. Під час збудження за допомогою детонатора заряду ВР по ньому поширюється фронт детонаційної хвилі із швидкістю детонації $D = 2000 \dots 8000 \text{ м/с}$ (детонація – процес розкладання вибухової речовини з виділенням газів і тепла). Газоподібні продукти вибуху, що утворюються позаду фронту детонації, в початковий період створюють тиск $100 \dots 200 \text{ ГПа}$, зберігаючи протягом короткого часу за інерцією попередній об'єм ВР, а потім із швидкістю $0.5 \dots 0.75D$ розширюються, надаючи ділянці металу, що перебуває під ними, імпульс руху. Під дією цього імпульсу об'єми заготовки послідовно залучаються в прискорений рух до поверхні нерухомої частини металу і з великою швидкістю співударяються з нею. У разі установленого процесу рухома пластина на якійсь довжині двічі перегинається, її похила ділянка під кутом γ рухається із швидкістю D за фронтом детонаційної хвилі. Під час співударяння з вершини кута виносяться тонкі поверхневі шари, оксиди та забруднення. Високошвидкісне співударяння рухомої частини металу з нерухомою пластиною викликає течію металу в їх поверхневих шарах. Поверхні наближаються до відстані дії міжатомних сил зчеплення і відбувається скріплення по всій площі з'єднання з характерною хвилеподібною межею поділу з'єднуваних деталей. Тривалість зварювання вибухом не перевищує кількох мікросекунд.

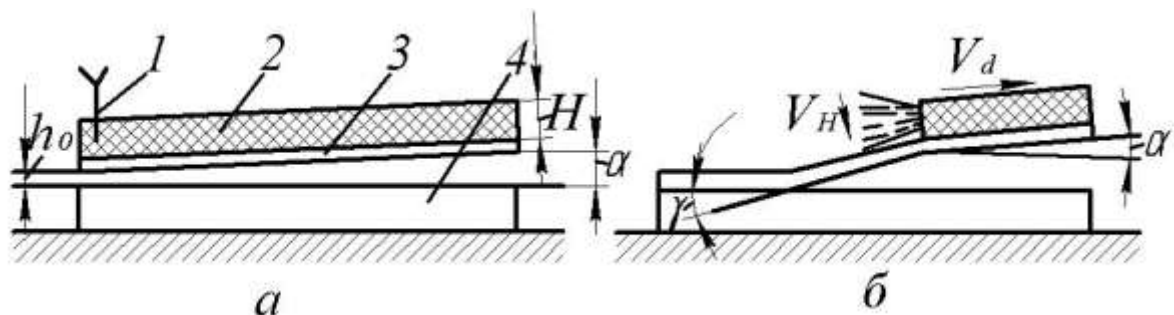


Рисунок 83 – Принципова схема зварювання вибухом:

а – перед зварюванням; *б* – під час зварювання

Міцність з'єднань, виконаних зварюванням вибухом, вища міцності з'єднаних матеріалів. Це пояснюється зміцненням тонких шарів металу, прилеглих до з'єднаних поверхонь за їх пластичної деформації.

Зварювання вибухом використовують під час виготовлення заготовок біметалу, для плакування поверхонь конструкційних сталей металами та сплавами з особливими фізичними та хімічними властивостями, під час зварювання заготовок з різнорідних матеріалів.

Різновидом зварювання вибухом є магнітоімпульсне зварювання. У разі магнітоімпульсного зварювання співударяння зварюваних деталей забезпечується імпульсним магнітним полем від розряду батарей конденсаторів. Тривалість імпульсу та швидкості співударяння за цього способу наближається до зварювання вибухом. Перевагою магнітоімпульсного зварювання порівняно із зварюванням вибухом є лише керування параметрами процесу

4.9.11 Зварюваність металів і сплавів

Зварюваність – властивість металу чи сполучення металів утворювати за встановленої технології зварювання з'єднання, що відповідає вимогам, обумовленим конструкцією та експлуатацією виробу.

Розрізняють *фізичну* та *технологічну* зварюваність. *Фізична зварюваність* – властивість матеріалів створювати монолітне з'єднання з хімічним зв'язком; таку зварюваність мають практично всі технічні сплави та чисті метали, а також ряд сполучень металів із неметалами.

Технологічна зварюваність – технологічна характеристика металу, що визначає його реакцію на дію зварювання та здатність утворювати зварне з'єднання із заданими експлуатаційними властивостями.

Зварюваність металу залежить від його хімічних і фізичних властивостей, кристалічної ґратки, ступеня легування, домішок та інших факторів. Основні показники (критерії) зварюваності металів та їх сплавів:

- окислюваність металу під час зварювального нагрівання, що залежить від його хімічної активності;
- чутливість металу до теплової дії зварювання, яка характеризується схильністю металу до зростання зерна, структурними та фазовими змінами у шві та зоні термічного впливу, зміною міцнісних і пластичних властивостей;
- опірність утворенню гарячих тріщин;
- опірність утворенню холодних тріщин під час зварювання;
- чутливість до утворення пор;
- відповідність властивостей зварного з'єднання заданим експлуатаційним вимогам; до них належать: міцність, пластичність, витривалість, повзучість, в'язкість, жаростійкість та жароміцність, корозійна стійкість та ін.

Крім перелічених основних показників зварюваності є ще показники, від яких залежить якість зварних з'єднань. До них належать якість форму-

вання зварного шва, власні напруги, деформації й жолоблення зварюваних матеріалів і виробів.

Чутливість металу до теплової дії зварювання є одним з головних показників зварюваності. Метал у будь-якій зоні зварного з'єднання зазнає нагрівання та наступного охолодження. Зміна температури металу під час зварювання називається термічним циклом зварювання. Максимальна температура нагрівання в різних зонах з'єднань різна: у шві перевищує її, в зоні плавлення – близька, в зоні термічного впливу – менша температури плавлення, поступово зменшується із віддаленням від шва.

Під час нагрівання в металі відбуваються такі структурні та фазові перетворення:

- розчинення фаз у металі в твердому стані, наприклад, карбідів (з'єднань металів із вуглецем) у нагрітому металі;
- поліморфне перетворення, тобто перетворення низькотемпературної модифікації матеріалу у високотемпературну;
- плавлення металу в ділянках, що нагріваються вище температури плавлення.

Під час охолодження структурні та фазові перетворення йдуть у зворотному порядку:

- кристалізація;
- поліморфне перетворення, тобто перехід із високотемпературної фази в низькотемпературну;
- випадання з металу різних вторинних фаз – карбідів, інтерметалідів та ін.

Крім названих перетворень у металі в низькотемпературній зоні під час зварювання відбуваються структурні зміни, що викликають знеміцнення основного металу – рекристалізацію, старіння та ін.

Зварюваність різних металів і сплавів залежить від ступеня легування, структури та вмісту домішок. Найбільше впливає на зварюваність сталей вуглець. Із збільшенням вмісту вуглецю, а також ряду інших легувальних елементів зварюваність сталей погіршується. Основними труднощами під час зварювання конструкційних низьковуглецевих, низьколегованих, а також середньолегованих сталей є:

- чутливість до загартуваності та утворення холодних тріщин;
- схильність до утворення гарячих тріщин;
- забезпечення рівномірності зварного з'єднання.

Чим вищий вміст вуглецю в сталі, тим вища небезпека холодних і гарячих тріщин та важче забезпечити рівномірність зварного з'єднання. Орієнтовним кількісним показником зварюваності сталі відомого хімічного складу є еквівалентний вміст вуглецю, який визначається за формулою

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15},$$

де вміст вуглецю та легувальних елементів подано в процентах.

Залежно від еквівалентного вмісту вуглецю та пов'язаною з цим схильністю до загартування та утворення холодних тріщин сталі за зварюваністю поділяють на чотири групи: добре, задовільно, обмежено та погано зварювані сталі (табл. 1).

Сталі першої групи мають $C_e < 0.25 \%$, добре зварюються без утворення гартівних структур і тріщин у широкому діапазоні режимів, товщин і конструктивних форм. Сталі, що задовільно зварюються ($C_e = 0.25...0.35 \%$), не дуже схильні до утворення холодних тріщин за правильного добору режимів зварювання, в ряді випадків потрібне підігрівання. Обмежено зварювані сталі ($C_e = 0.36...0.45 \%$) схильні до тріщиноутворення, можливість регулювання опірності утворенню тріщин зміною режимів зварювання обмежена, потрібне підігрівання. Погано зварювані сталі ($C_e > 0.45 \%$) дуже схильні до загартування та утворення тріщин, потребують під час зварювання підігрівання, спеціальних технологічних прийомів зварювання та термообробки.

Таблиця 1 – Класифікація сталей за зварюваністю

Група зварюваності	Сталь	
	вуглецева	конструкційна легована
1. Добра	Ст1, Ст2, Ст3, Ст4, сталь 08, 10, 15, 20, 25, 12кп, 15кп, 16кп, 18кп, 20кп	15Г, 20Г, 15Х, 15ХА, 20Х, 15ХМ, 14ХГС, 10ХСНД, 10ХГСНД, 15ХСНД
2. Задовільна	Ст5, сталь 30, 35	12ХН2, 12ХН3А, 14Х2МР, 10Г2МР, 20ХН3А, 20ХН, 20ХГСА, 25ХГСА, 30Х, 30ХМ
3. Обмежена	Ст6, сталь 40, 45, 50	35Г, 40Г, 45Г, 40Г2, 35Х, 40Х, 45Х, 40ХН, 40ХМФА, 30ХГС, 30ХГСА, 30ХГСМ, 35ХМ, 20Х2Н4А, 4ХС, 12Х2Н4МА
4. Погана	Сталь 65, 70, 75, 80 85, У7, У8, У9, У10, У11, У12	50Г, 50Г2, 50Х, 50ХН, 45ХН3МФА, 6ХС, 7Х3, 9ХС, 8Х3, 5ХНТ, 5ХНВ

Розділ 5 КОНСТРУКЦІЙНІ ПОРОШКОВІ МАТЕРІАЛИ

Порошкові конструкційні матеріали на основі заліза і вироби з них знаходять широке застосування в різних галузях машинобудування і приладобудування.

Зараз у промислових масштабах виготовляються вироби масою від 5 до 1000 кг і більше різноманітних форм та розмірів. Постійно розширюється номенклатура порошкових деталей для автомобілів та сільськогосподарських машин. Так, із відновленого залізного порошку, до якого додають 1% вуглецю і 0.6% хрому, виготовляють шатуни, із матеріалів СП50, СП50Д2,5, СП50Д2П-3, СП50Д5-1 виготовляють деталі, які використовують у механізмах варіаторів швидкостей, мості керування коліс, підвісках грохотів, натяжних пристроях зернозбиральних комбайнів тощо. Це такі деталі як упорні кільця, розпірні втулки вузлів тертя, шайби, ковпаки підроциліндрів та ін.

Широке використання виробів із порошкових матеріалів зумовлене багатьма факторами: скороченням витрат матеріалів, вивільненням обладнання (зокрема металорізального), зниженням капітальних та експлуатаційних витрат, підвищенням термінів служби машин, підвищенням продуктивності праці, спрощенням виробничого циклу, зниженням трудомісткості внаслідок зменшення кількості операцій і скорочення їх тривалості. Коефіцієнт використання матеріалу під час виготовлення порошкових виробів досягає 95%

5.1 ЗАГАЛЬНА СХЕМА ВИРОБНИЦТВА ПОРОШКОВИХ ВИРОБІВ

Технологічний процес виготовлення порошкових конструкційних матеріалів і деталей складається з таких етапів:

Етап 1. Приготування шихти необхідного складу.

Етап складається з операцій:

- одержання порошків;
- відпалювання порошків;
- сепарація порошкових матеріалів;
- перемішування порошкових матеріалів;
- одержання сировинної субстанції (прес-порошок, шлікер).

Етап 2. Одержання компактованого напівфабрикату.

Етап складається з операцій:

- дозування сировинної субстанції (прес-порошку, гранул, шлікера);
- формування деталей або заготовок, здійснюване способами:
 - пресуванням;
 - екструзією;
 - прокатуванням;
 - шлікерним литтям;

- обробкою попередньо компактованого напівфабрикату різанням.

Етап 3. Спікання.

Спікання полягає в термообробці компактованого матеріалу за спеціальним режимом.

Етап 4. Вторинна обробка тиском.

Полягає у виконанні однієї з таких операцій: пресування, карбування, калібрування, видавлювання, кування, прокатка, штампування.

Етап 5. Механічна обробка заготовок різанням.

Етап 6. Термічна обробка порошкових виробів.

Етап 7. Нанесення декоративних, захисних або функціональних покриттів.

5.2 ВИРОБНИЦТВО ПОРОШКІВ

Методи одержання порошків поділяють на механічні, які, зазвичай, використовуються під час переробки відходів, і фізико-хімічні, що дають можливість одержати дуже чисті шихтові матеріали. За використання механічних методів матеріал подрібнюється в порошок без зміни хімічного складу. За фізико-хімічних методів змінюється хімічний склад вихідної сировини (відновлення оксидів металів газами або твердим відновником, електроліз водних розчинів солей або розпилених середовищ).

5.2.1 Здрібнювання вихідних матеріалів механічними способами

Розмелювання матеріалів

Здрібнювання механічними способами проводять у сухому й мокрому стані. Під час сухого помелу із зростанням дисперсності порошку ефективність здрібнення стає все менш помітною, тому що тонкі частинки, що утворюються, захищають великі від ударів. За мокрого помелу (у вигляді суспензії) відношення «тверда фаза – рідина» вибирається в межах 1:2...1:6. Рідина розклинює дефекти кристалів і перешкоджає зрощенню тріщин.

Як середовище для помелу застосовують воду й органічні речовини.

Найбільш грубе (попереднє) здрібнювання добутих у рудниках або отриманих в електропечах мінералів для виготовлення деталей з кераміки роблять у щокрових дробарках (рис. 84).

Обертання надається кривошип 1. Шатун 2 робить складний рух: він взаємодіє з двома розпірками 3. Одна з них зв'язана з опорою 4, а інша – із рухомою плитою 5, що робить зворотно-обертальний рух. У проміжок між рухомою 5 і нерухомою 6 плитами подаються шматки мінералу 7, що під дією динамічного навантаження подрібнюються і виходять із дробарки у вигляді частинок 8 розміром від 10 до 100 мм.

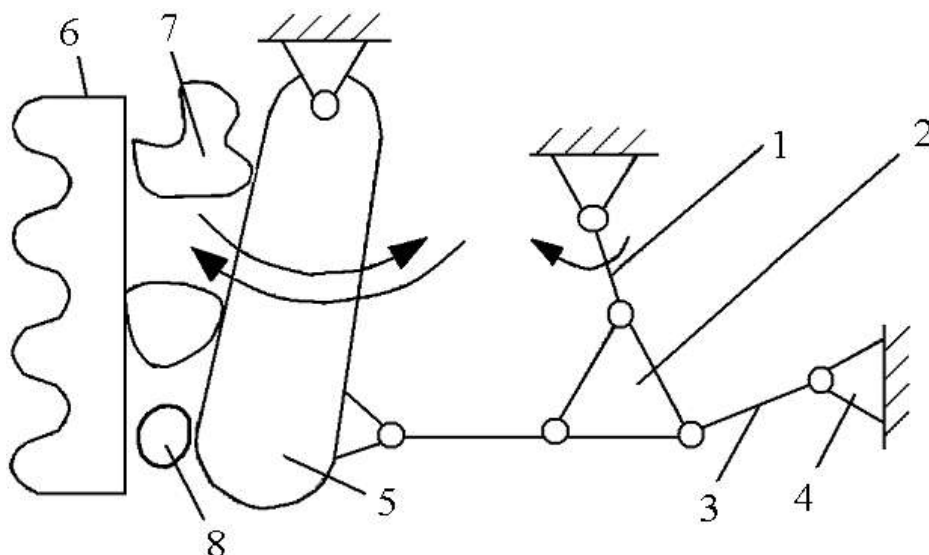


Рисунок 84 – Схема щоквої дробарки

Подальше здрібнювання здійснюється в молоткових дробарках (рис. 85).

Молоткові дробарки мають ротор 1, що обертається з великою швидкістю. На роторі встановлено молотки 2 із зносостійкого матеріалу. Частинки 4, що подрібнюються, подаються ротором на відбійну плиту 3 і за рахунок крихкого руйнування подрібнюються. Здрібнені частинки проходять через решітку 5 і збираються в ємності 6.

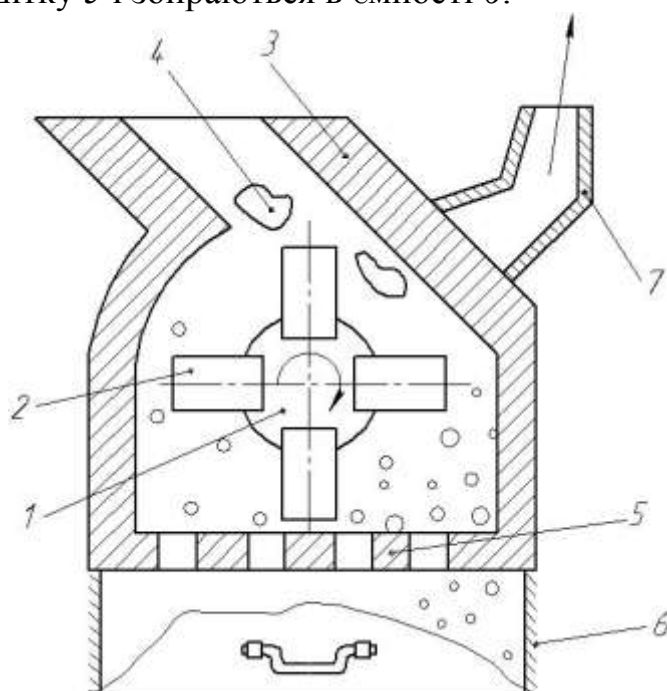


Рисунок 85 – Молоткова дробарка

Величина частинок під час подрібнення регулюється в межах 1–10 мм зміною кількості подаваного матеріалу, зазором між відбійною плитою і молотками, а також розміром і числом отворів у решітці. Крім

частинок зазначеної грануляції, молоткова дробарка дозволяє одержувати також тонкодисперсний порошковий матеріал (пил). Він відсмоктується через розтруб 7. Розмір частинок пилу становить 0.1-10 мкм.

Наступна стадія здрібнювання матеріалів до розмірів частинок 0.1–1 мм здійснюється на розмельному устаткуванні з катками – бігунах (рис. 86).

Матеріал 1, що подрібнюється, засипається в жолоб 2, по якому перекочуються два катки 3 масою по 1.5 – 2 т. Для забезпечення підйому катків обертання від шпинделя 4 передається на них через шарнірні механізми 5 і 6. Частота обертання вхідного вала 20–30 обертів за хвилину.

У разі наїзду катка на великі частинки він піднімається на деяку висоту, набуваючи відповідну потенційну енергію, що витрачається на здрібнення частинок під час опускання катка після з'їзду з великої частинки.

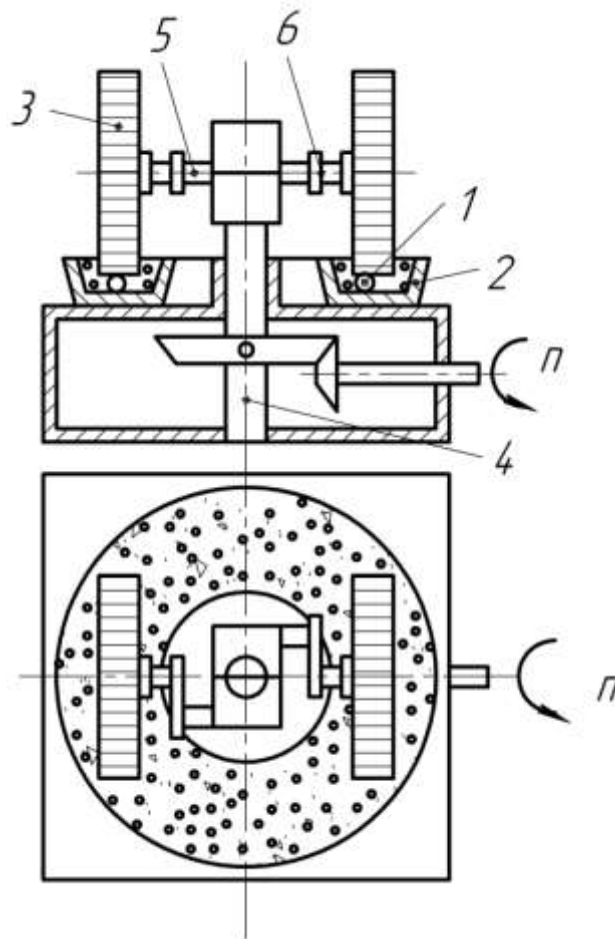


Рисунок 86 – Здрібнювання на бігунах

З механічних способів здрібнювання матеріалів для одержання найбільш тонкодисперсних порошків застосовують кульові млини (рис. 87).

Матеріал, що подрібнюється, засипається всередину барабана 1, де він піддається дії куль 2 із сталі або твердого сплаву. Барабан розміщуєть-

ся на двох гумових роликах 3 і 4, причому ролик 3 є ведучим, а ролик 4 установлюється на своїй осі вільно.

Крім куль і матеріалу, що подрібнюється, всередині циліндра є також рідина (вода зі спеціальними присадками).

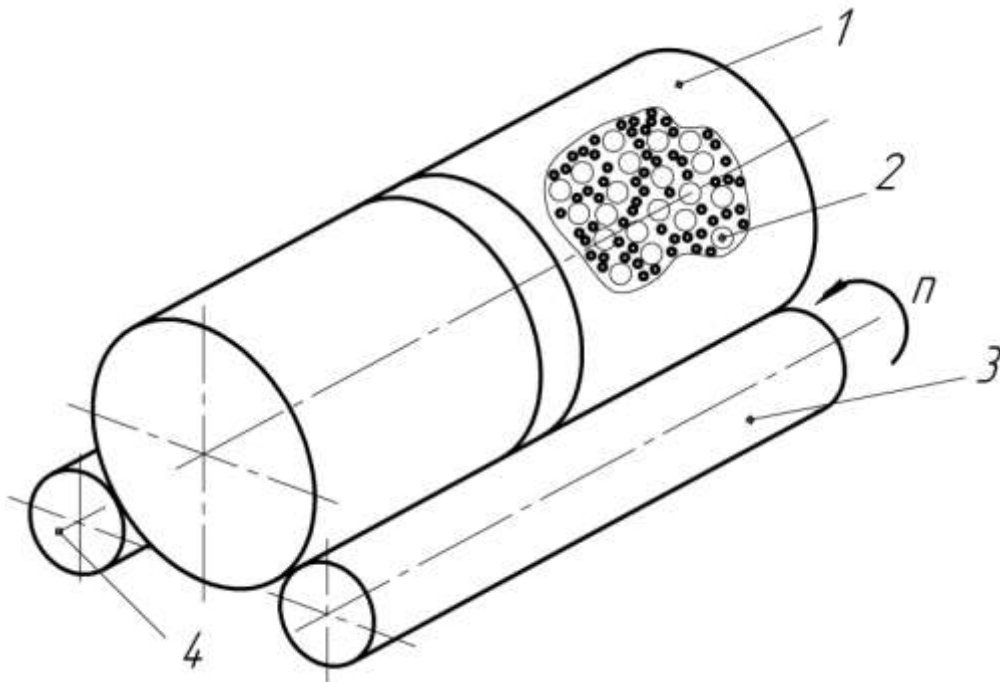


Рисунок 87 – Здрібнювання в кульових млинах

5.2.2 Здрібнювання вихідних матеріалів у рідкій фазі

Здрібнювання струменем рідини або газу

Одержання порошків здрібнюванням матеріалів у розплавленому стані струменем рідини або газу здійснюється таким чином.

На струмінь 1 рідкого матеріалу (рис. 88) направляється струмінь 2 води або стиснутого повітря з мережі високого тиску 3. У цьому випадку утворюються частиночки матеріалу правильної сферичної форми.

За відповідного підбору режимів цього процесу можливе одержання порожнистих мікросфер за рахунок захоплення повітря під час диспергування струменя.

Такі мікросфери можуть бути отримані з полімеру, металів, скла або навіть тугоплавких діелектриків – оксидів алюмінію, цирконію. Застосування порошків, що є порожнистими мікросферами, дозволяє істотно зменшувати масу деталей, що виготовляються з них, одержувати елементи конструкцій теплозахисту, забезпечувати гасіння коливань, зокрема в діапазоні ультразвукових і радіочастот.

Сферична форма частинок підвищує плинність порошку, що складається з цих частинок.

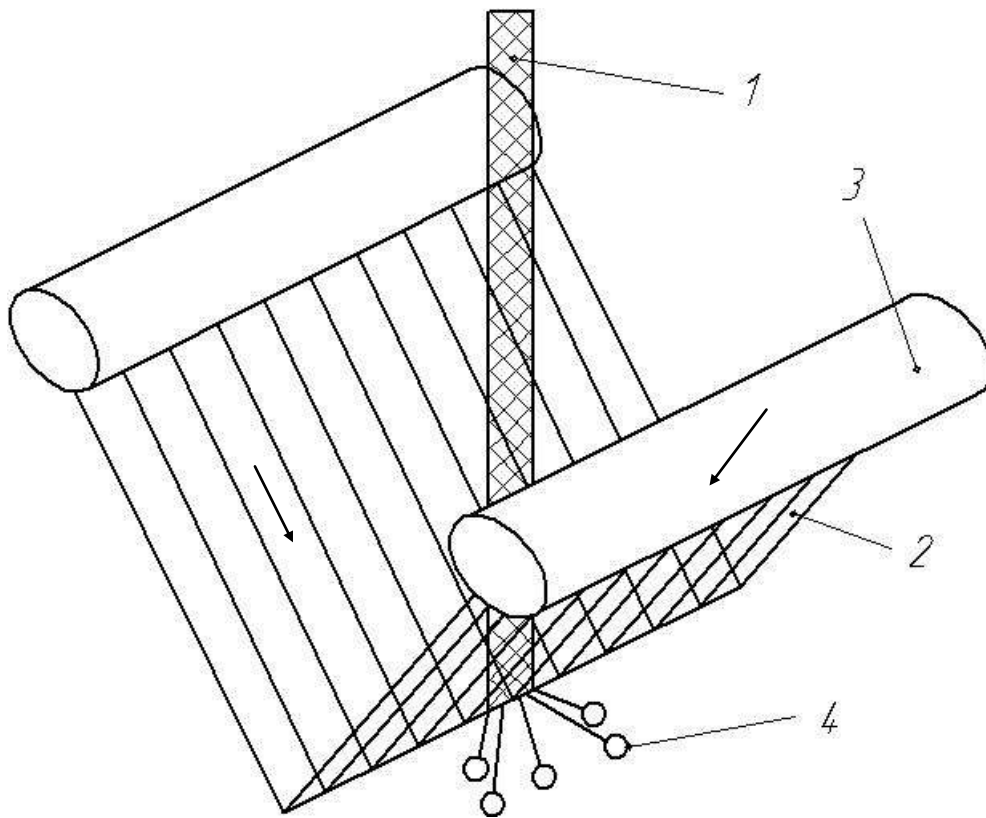


Рисунок 88 – Диспергування струменя матеріалу

Відцентрове здрібнювання матеріалів

Пристрій для одержання порошкових матеріалів способом відцентрового диспергування їхніх розплавів має тигель *1* (рис. 89), охолоджувальну пневмосистему *2*, а також диск *3*, що швидко обертається.

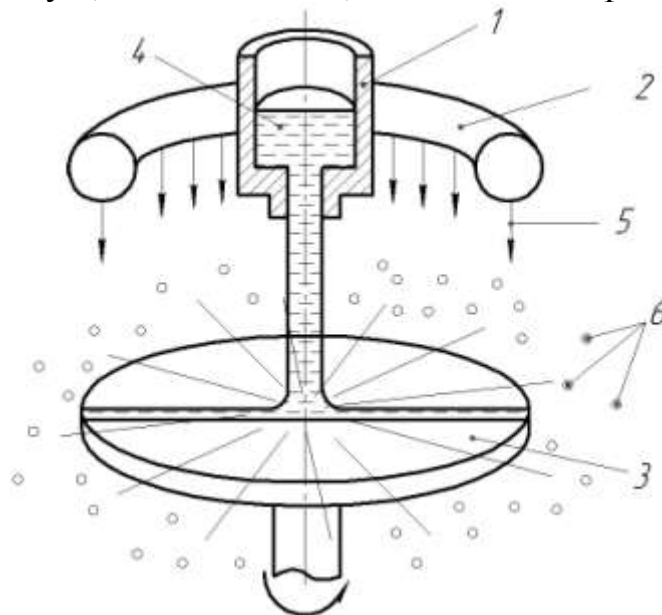


Рисунок 89 – Відцентровий спосіб отримання порошків

Потік розплавленого матеріалу, що витікає з тигля 4 попадає на торцеву поверхню диска 3, кутова швидкість обертання диска складає близько 15000 обертів за хвилину. Зона навколо контуру диска охолоджується потоками газу 5, що надходить з кільцевої пневмосистеми 3.

В результаті дії відцентрових сил утворюються застигли сферичні частиночки матеріалу 6.

5.2.3 Фізико-хімічні способи одержання порошкових матеріалів

Електроерозійний спосіб диспергування

Процес електроерозії полягає в диспергуванні металу за допомогою електричного розряду між металом і інструментом 1 (рис. 90), тобто за рахунок руйнування поверхонь електродів під час електричного пробоя міжелектродного проміжку.

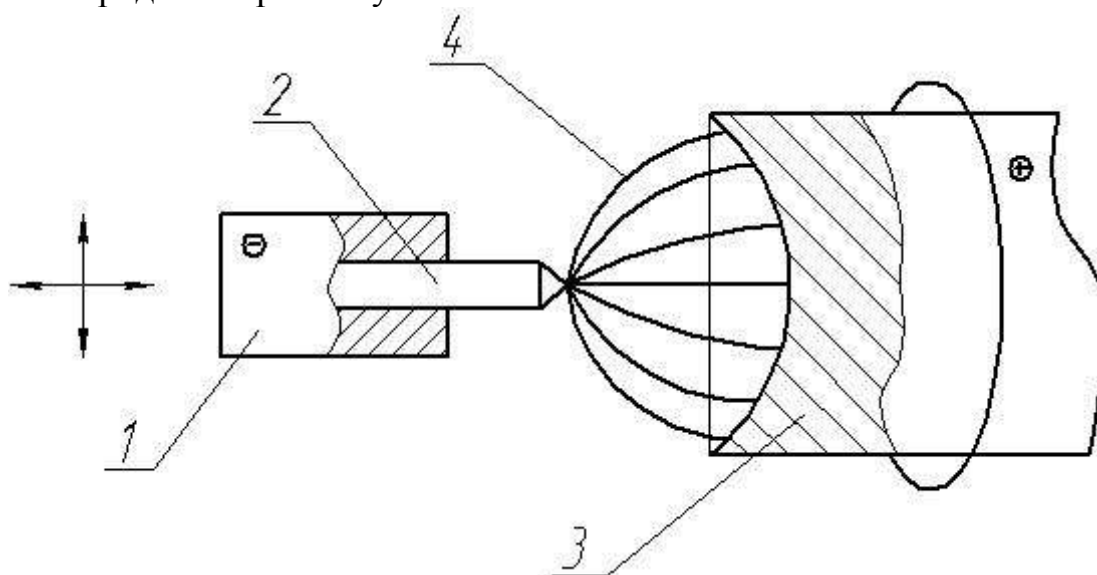
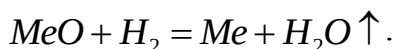


Рисунок 90 – Схема одержання порошків електроерозією

Інструмент 1 – це катод, що може переміщуватися. Він має вставку 2 з вольфраму. Між катодом 2 і анодом 3, виготовленим із матеріалу, що подрібнюється й обертається з великою швидкістю (близько 25000 оборотів за хвилину), створюється дуга 4. Під дією тепла електричної дуги поверхня анода розплавляється і під дією відцентрових сил відбувається утворення частинок порошку.

Спосіб відновлення металів з оксидів

Порошок руди або окалину піддають за підвищеної температури впливу великої кількості водню. Відбувається відновлення металу за реакцією:



Перевагою є можливість одержання шихти з природно легованих руд із кількох металів у своєму складі.

Електрохімічний спосіб одержання порошків

Електролізом одержують чистий і пухкий матеріал (метал), що осідає на катоді 3 (рис. 91), виділяючись з електроліту 1 або потрапляючи на катод внаслідок руйнування анода 2. Далі пухкий осад 4 знімають із катода і подрібнюють у порошок звичайними способами.

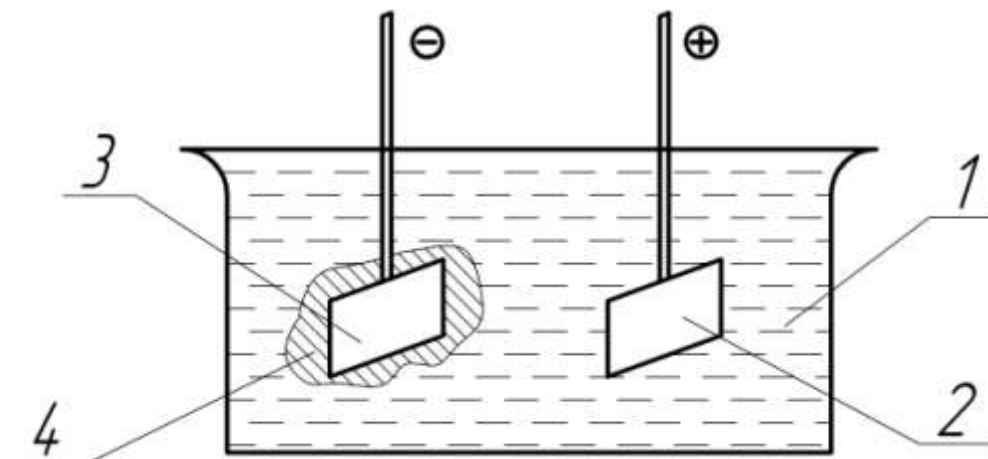


Рисунок 91 – Схема електрохімічного процесу

5.3 ПІДГОТОВКА ПОРОШКІВ ДО ФОРМУВАННЯ

Для виготовлення якісних деталей порошки відпалюють, розділяють за розмірами частинок, змішують.

Відпал порошків здійснюють для усунення наклепу, що стабілізує їх властивості та поліпшує пресування. Відпалюють зазвичай порошки, отримані механічним подрібнюванням.

Розсіювання порошків на окремі фракції за розмірами зерен (*сепарація*) здійснюють різними способами: на вібраційних ситах – за зернистості порошків понад 40 мкм, сепарацією в рідині, повітряною сепарацією (для порошків із розмірами частинок менше 40 мкм).

Змішування компонентів під час підготовки шихти зумовлено необхідністю використання рівномірної за складом суміші порошків постійного гранулометричного складу. Операцію змішування проводять у млинах і змішувачах різних конструкцій.

В процесі підготовки шихт із порошкових матеріалів різної густини для попередження сегрегації (розшаровування) сумішей проводять мокре змішування в присутності 0.5...1.5% за масою бензину, спирту або камфори.

Найчастіше змішують порошки з додаванням графіту, стеаринової кислоти, стеарата цинку чи інших речовин, які мають змочувальні властивості, для зменшення тертя між порошком і стінками матриці, що забезпечує зниження зусилля пресування і більш рівномірний розподіл щільності по об'єму виробу.

5.4 ФОРМУВАННЯ ЗАГОТОВОК

Формування деталей з порошкової шихти здійснюється пресуванням, видавлюванням (екструзією), прокатуванням, шлікерним литтям.

5.4.1 Пресування порошків

Формування деталей зазвичай здійснюється пресуванням. Його проводять у холодних або гарячих прес-формах на універсальних гідравлічних пресах, в установках для гідростатичного або газостатичного пресування.

Холодне пресування

Конструкція прес-форми для холодного одностороннього пресування деталі 6, що має конфігурацію плоского кільця, зображена на рис. 92.

До складу прес-форми входить матриця 3, в яку входить пресувальний пуансон 1. Циліндричний отвір деталі формується стрижнем 4, а цілісний стан матриці забезпечується обоймою 5. Кількість порошку, що засипається в матрицю, дозується ємністю завантажувальної камери 2.

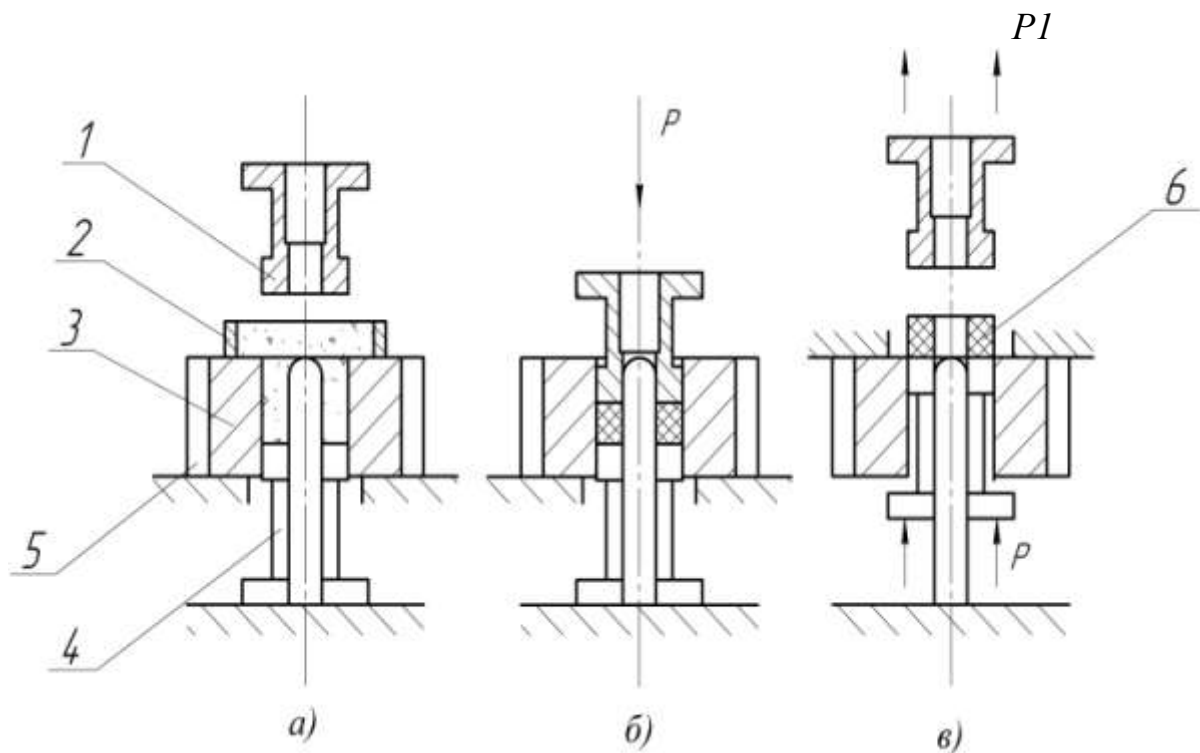


Рисунок 92 – Прес-форма для одностороннього пресування:

а) дозування; б) пресування; в) виштовхування (P - зусилля пресування $P1$ – зусилля виштовхування)

!

Прес-форму для двостороннього пресування показано на рис. 93.

Вона складається з матриці 3, пресувального пуансона 2, що закріплюється на верхньому штоку регульованої довжини 1, нижнього пуансона 6, нерухомо закріпленого на несучій плиті установки, стрижня 5 та завантажувальної камери 4.

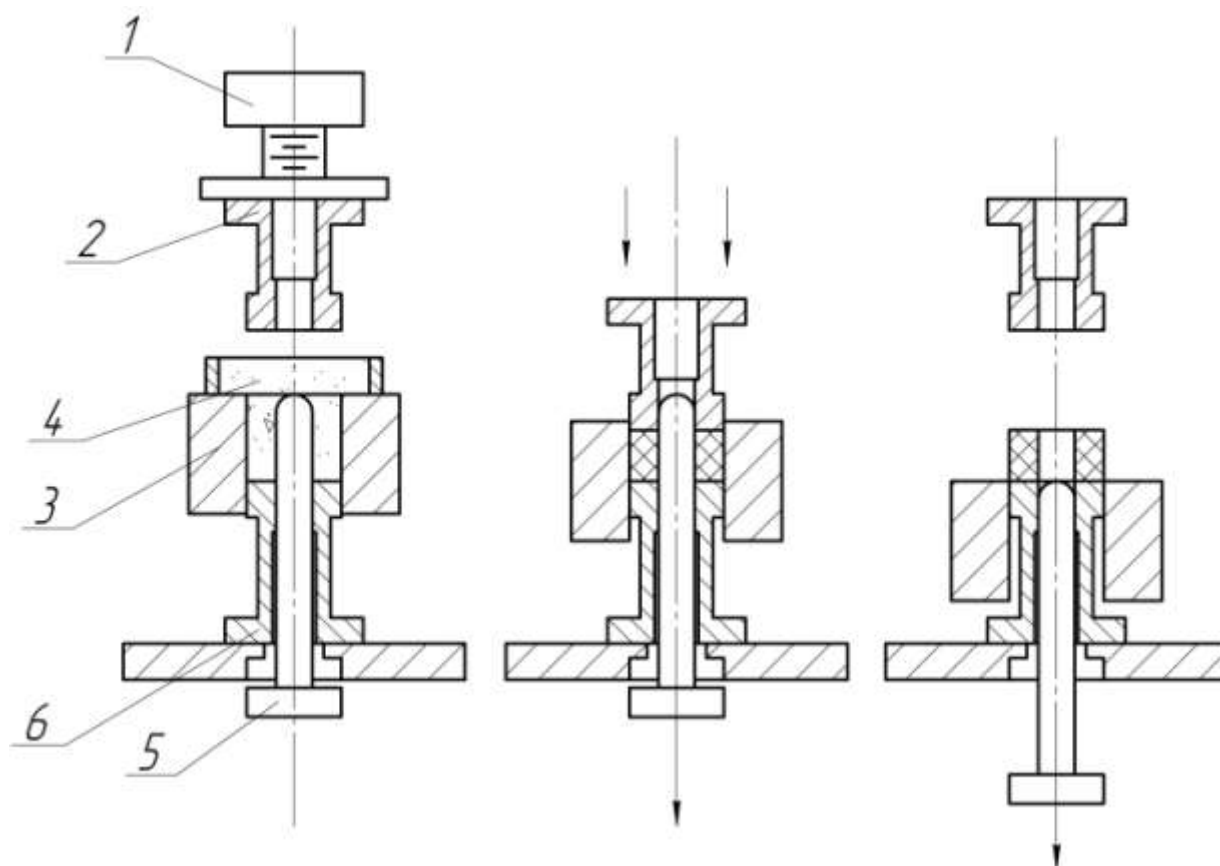


Рисунок 93 – *Схема двостороннього пресування*

Цикл роботи установки починається з того, що в порожнину, утворену завантажувальною камерою 4, матрицею 3, стрижнем 5 і нижнім пуансоном 6, засипається прес-порошок.

Після заповнення порожнини прес-форми порошком починається опускання верхнього штока 1 із пуансоном 2. Потім відбувається власне пресування, причому його двосторонній характер забезпечується одночасним рухом униз пуансона й матриці зі стрижнем. За нерухомого нижнього пуансона брикет допресовується.

Далі спресований брикет витягається з порожнини прес-форми. Для цього пресувальний пуансон починає рухатися вгору, а матриця разом із стрижнем переміщуються вниз за допомогою нижнього штока. Вивільнення брикету відбувається в крайньому нижньому положенні матриці зі стрижнем. Брикет залишається на нерухомому нижньому пуансоні, а потім видаляється із зони пресування.

Після повернення матриці зі стрижнем у крайнє верхнє положення починається новий цикл роботи установки.

Гаряче пресування

Гаряче пресування здійснюють у закритій прес-формі з графіту з індукційним або електроконтактним нагріванням. Температура пресування перевищує температуру рекристалізації матеріалу або однієї з його складових. Гаряче пресування суміщає операції пресування й спікання. Це дозво-

ляє за порівняно невисоких тисків отримувати практично безпористі вироби. Така щільність є недосяжною за холодного пресування з наступним спіканням.

Гарячим пресуванням найчастіше виготовляють вироби з тугоплавких матеріалів – боридів, карбідів, силіцидів, твердих сплавів, титану.

Гідростатичне пресування

Гідростатичне пресування полягає в тому, що герметично закрита еластична оболонка (з гуми чи тонкої жерсті) з порошком уміщується в камеру з рідиною (*гідростат*). У камері створюється тиск 200...500 МПа. Внаслідок всебічного тиску рідини на оболонку і відсутності зовнішнього тертя порошок в оболонці пресується практично в усьому об'ємі до щільності 96...98% .

Цей метод застосовується для виготовлення великогабаритних заготовок, призначених для подальшої переробки в поковки, труби, листи тощо.

Газостатичне пресування

Цей спосіб пресування полягає в тому, що металева, герметично заварена ампула з порошком, пройшовши попередньо гідростатичне ущільнення, піддається пресуванню в спеціальній камері (*газостаті*), заповненій аргоном або гелієм, за температури від 700 до 2300 °С і тиску від 70 до 210 МПа. Такий спосіб дає можливість пресувати будь-які металеві порошки практично до теоретичної густини матеріалу.

Метод газостатичного пресування застосовується для виготовлення напівфабрикатів і великогабаритних заготовок деталей складної форми, наприклад, турбінних дисків із лопатями. Розміри виробів визначаються габаритами газостатів. У сучасних установках внутрішній діаметр камер досягає 1200 мм, висота – понад 2000 мм. Вироби мають високу чистоту поверхні, рівномірні властивості, дрібнозернисту й гомогенну структуру.

5.4.2 Екструзія

Екструзія – це метод формування, який застосовується для виготовлення виробів або напівфабрикатів із суцільним і порожнистим перерізом шляхом видавлювання порошкового матеріалу крізь отвір у матриці. Методом екструзії можна отримувати довгі заготовки (прутки, труби, кутники тощо) з порошків заліза, міді, алюмінію, магнію, титану, молібдену і сплавів на їх основі.

5.4.3 Прокатування порошків

Суть процесу прокатування полягає в тому, що порошок із бункера зсипається в зону між валками прокатного стану і спресовується в пористу стрічку, довжина якої визначається кількістю порошку, що подається на прокатування.

Холодним прокатуванням можна отримувати не тільки листи та стрічку, але й інші профілі (прутки, дріт тощо). В цих випадках прокатується не порошок, а попередньо спресовані й спечені заготовки.

Застосовують також прокатування і нагрітого порошку (гаряче прокатування). Так, методом гарячого прокатування залізні порошки ущільнюються до 95...97 %.

5.4.4 Шлікерне лиття

Суть шлікерного лиття полягає в тому, що з порошкової шихти певного складу і рідини (водно-спиртові розчини полівінілу, вода з домішками хлориду заліза, соляної кислоти тощо) готують суспензію консистенції сметани і заливають її у пористу керамічну або гіпсову форму. З часом рідина виводиться з форми крізь пори, а частинки порошку механічно з'єднуються між собою, створюючи міцну заготовку з пористістю 30...60%. Після вилучення заготовки з форми її сушать і спікають.

5.5 СПІКАННЯ ЗАГОТОВОК

Спікання – це процес ущільнення і зміцнення пористих порошкових виробів під впливом термічної обробки, що супроводжується збільшенням щільності й усадкою, зменшенням пористості, зміною механічних і фізико-хімічних характеристик матеріалу й наближенням їх до характеристик компактного матеріалу. Відформована заготовка перед спіканням має пористість 25...60%, а після – 10 ...15 %.

Як результат спікання – зчеплення частинок порошку відбувається внаслідок взаємної дифузії атомів. Характерними ознаками спікання є:

- а) ефект зміцнення й зміна фізико-механічних властивостей, пов'язані зі зміною величини і якості контактних ділянок між частинками порошку;
- б) зміна мікроструктури деталі (зростання зерен, форми й числа пор і под.).

Температура спікання t_{cn} визначається за формулою:

$$t_{cn}=0.7t_{nl}$$

де t_{nl} – температура плавлення основного компонента сплаву, °C.

Температура спікання на 200 – 300 °C вища, ніж температура попереднього відпалу шихти.

Спікання є однією з найскладніших технологічних операцій, оскільки його супроводжують такі явища, як усадка або зростання пресувань, хімічні реакції, сплавлення складових шихти. Ці явища найбільше від температури спікання. Температури спікання для конструкційних виробів вибирають залежно від матеріалу (табл. 2).

Спікання пресованих заготовок (*пресовок*) здійснюють в електричних вакуумних печах або в печах із захисним середовищем. Використовуються захисні середовища п'яти типів:

- водень ($H_2 - H_2O$);

- дисоційований аміак ($H_2 - H_2O - N_2$);
- генераторний газ ($CO - CO_2 - N_2$);
- ендотермічний, екзотермічний, доменний і конвертований природний газ ($CO - CO_2 - H_2 - H_2O - N_2$);
- науглецьовувальний газ, отриманий за неповного спалювання вуглеводнів з наступним додаванням природного газу ($CO - CO_2 - H_2 - H_2O - CH_4 - N_2$).

Таблиця 2 – Температури спікання порошкових виробів

Метал	Температура спікання, °C	Метал	Температура спікання, °C
Алюміній	480...520	Мідь	850...950
Берилій	1050...1200	Молібден	1800...2100
Ванадій	1400...1500	Нікель	1050...1150
Вольфрам	2500...2700	Тантал	2200...2400
Залізо	1100...1200	Титан	1200...1300
Магній	480...520	Хром	130...1500
Марганець	900...1000	Цирконій	1300...1450

Останнім часом у промисловості намітилась тенденція спростити процес спікання, зробити його більш продуктивним і економічним, відмовившись від застосування захисних середовищ. Позитивні результати в цьому напрямку одержані за використання двох процесів – короточасного (30...40 с) спікання на повітрі шляхом високочастотного індукційного нагрівання виробів простої форми (втулки, поршневі кільця) і спікання у ваннах з розплавленим склом. Останній процес повністю виключає окислення пресованих виробів, навіть тоді, коли в їх складі містяться компоненти, що мають високу хімічну спорідненість із киснем (алюміній, хром).

5.6 ДОДАТКОВА ОБРОБКА ПРЕСОВАНИХ ЗАГОТОВОК

Для підвищення точності розмірів, ущільнення поверхневого шару або повного усунення пористості спечені заготовки піддають додатковій обробці – калібруванню та просоченню рідкими металами, сплавами чи неметалевими розплавами.

Калібрування порошкових виробів проводять для досягнення заданої розмірної точності (6...7 класів точності), високої чистоти поверхні (7 клас шорсткості і вище), усунення жолоблення та інших дефектів. Калібрування здійснюють у закритих прес-формах за схемою, аналогічною схемі холодного пресування.

Просочення пористих пресованих виробів рідкими металами і сплавами проводять для усунення пористості й отримання високоміцних

порошкових деталей. Так, пористі заготовки з заліза, залізграфіту чи залізо-марганцю просочують рідкою міддю або латунню, що забезпечує міцність таких деталей у межах 400...1000 МПа залежно від складу і термічної обробки.

Просочення здійснюють за такою технологією: пориста заготовка попередньо просочується наповнювачем – органічною чи неорганічною речовиною, температура плавлення якої нижча за температуру плавлення металу, призначеного для просочення. Потім вона занурюється у ванну з розплавленим металом, який і витісняє з пор виробу наповнювач. Для просочення пористих пресованих виробів із порошків заліза і його сплавів міддю та її сплавами як наповнювачі застосовують солі NaCl , KCl , ZnCl_2 та їх суміші, додаючи до них 0.5...1.0 % NH_4Cl для покращення їхньої рідкоплинності. Приклад режиму просочення пористого заліза латунню: занурення пористих заготовок у ванну з NaCl за 850 °C, витримка 1...1.5 хвилини, перенесення просочених сіллю деталей у ванну з розплавом латуні, витримка за 950...1000 °C протягом 15...20 с, вилучення просоченої латунню деталі з ванни на повітря, очищення в гарячому стані від металевих напливів дрітчастими щітками. Просочення за такою технологією можна здійснювати в одній ванні, де розплавлений шар наповнювача знаходиться над рідким металом. Пористу заготовку спочатку вміщують у верхній шар, а потім, після заповнення пор наповнювачем і прогрівання заготовки до потрібної температури, її опускають у рідкий метал.

Є й інші технологічні способи просочення пористих заготовок.

Просочення металевих заготовок неметалевими розплавами проводять для отримання корозійностійких безпористих виробів. Так, вироби з порошку нержавіючої сталі марки 20Х23Н18 просочують розплавом скла в атмосфері водню або у вакуумі методом повного чи неповного занурення деталі в розплавлене скло. Для очищення поверхні деталі від скла після просочення її загартовують у воді з температурою просочення.

Введення скла в процесі виробництва безпористих матеріалів сприяє також і підвищенню жаростійкості.

Багато порошкових деталей є деталями конструкційного призначення і мають протистояти корозійному руйнуванню. Цього можна досягти нанесенням на порошкові вироби гальванічних або хімічних покриттів. А як метод попередньої підготовки порошкових деталей перед нанесенням захисних покриттів є просочення цих деталей легкоплавкими металами, неорганічними розплавами, склами, смолами, пластмасами. Так, пористі вироби з залізного порошку заповнюють рідким склом, кремнійорганічними лаками, епоксидною смолою, гідролізованим технічним етилсилікатом, кремнійорганічними оксидними полімерами (силіконами), пластмасами та іншими речовинами, з яких найкращі результати дає просочення гідрофобною кремнійорганічною рідиною ГФЖ-136

Така технологія дозволяє отримувати нержавіючі матеріали, виробництво яких традиційними методами є взагалі неможливим.

5.7 КЛАСИФІКАЦІЯ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

В цьому підрозділі розглянемо найвикористовуваніші в сучасному машинобудуванні порошкові матеріали – конструкційні та зносостійкі.

5.7.1 Конструкційні порошкові матеріали

Основним видом продукції порошкової металургії є порошкові конструкційні деталі з матеріалів на залізній основі – порошкові сталі. Вони (як і литі сталі) можуть бути вуглецевими або легованими.

Марку порошкового конструкційного матеріалу характеризують індекси з літер і цифри. Перша літера «С» показує клас матеріалу (сталь), друга літера «П» – метод виробництва (порошкова). Після літери «П» записується середній вміст вуглецю в сотих частках процента. Легувальні елементи позначаються такими самими символами, як і в традиційно виготовлених легованих сталях. Цифри, що йдуть за символом елементів, показують середній вміст цього легувального елемента. Якщо його вміст менше 1% – цифра відсутня. Цифра після дефіса характеризує групу пористості. Порошковим конструкційним матеріалам на основі заліза присвоєні такі групи пористості: 1 – пористість 25...16% (густина 5.9... 6.6 г/см³); 2 – пористість 15...10% (густина 6.7...7.1 г/см³); 3 – пористість 9...2% (густина 7.125...7.70 г/см³); 4 – пористість менша 2% (густина більша 7.70 г/см³). Літера «А» (після групи пористості вказує на підвищену якість матеріалу (вміст сірки та фосфору обмежений значеннями 0.03 і 0.05%, відповідно).

Рекомендуються такі принципи вибору порошкових конструкційних матеріалів на основі заліза для різних умов експлуатації. Для виготовлення найбільш масової групи порошкових виробів – малонавантажених деталей – доцільно використовувати матеріали найбільш дешеві, тобто пористі вуглецеві сталі (пористість 16...25%). Це сталі таких марок: СП10-1, СП30-1, СП70-1, СП90-1, міцність яких становить 100...120 МПа, відносне подовження – 5...2%, ударна в'язкість 0.2...0.1 МДж/м², твердість HB50...80. Для підвищення надійності під час експлуатації таких матеріалів при виробі потрібно заповнювати легкоплавкими неорганічними речовинами або пластмасами з наступним нанесенням на їх поверхню захисних або декоративних покриттів. Деталі цієї групи отримують одноразовим холодним пресуванням і високотемпературним спіканням із наступним (за необхідності) калібруванням.

Для помірно навантажених деталей рекомендуються матеріали з пористістю 10...15% (СП10-2, СП30-2, СП70-2, СП90-2 з міцністю 120...200 МПа, відносним подовженням 10...4%, твердістю HB70...100), а також матеріали на їх основі з додаванням дешевих легувальних елементів – хрому, міді, нікелю, молібдену – в кількості до 2,0...3,0%. Це сталі таких марок: СП70Д-2, СП90Д3-2, СП60Н2Д3-2, СП50ХН-2, СП80НМ-2 та ін. З метою підвищення експлуатаційних властивостей помірно навантажені деталі піддають термічній обробці (гартування з 800...860 °С в маслі, відпуск

за 200 °C), після чого їх міцність становить 550...650 МПа, відносне подовження 1...2%, твердість *HRC*35...40. Готові вироби просочують кремнійорганічною рідиною ГФЖ-136 і наносять захисні або декоративні покриття.

Середньонавантажені деталі, що піддаються під час експлуатації значним статичним і помірним динамічним навантаженням, доцільно виготовляти з порошкових сталей з пористістю 2...9% (СП70-3, СП90-3, СП60Н2Д3-3, СП50ХНМ-3, СП40Г-3, СП80НМ-3, СПХН-3 та ін.). Деталі цієї групи отримують подвійним пресуванням за підвищених тисків і спіканням, а також холодним або гарячим штампуванням попередньо спечених заготовок. Деталі піддають термічній (гартування з відпуском) чи хіміко-термічній обробці (цементації, азотуванню, хромуванню, алітуванню, цинкуванню та ін.) з наступним нанесенням на їхню поверхню захисних чи декоративних покриттів. Після гартування в маслі за температури 820...860 °C і відпуску при 200...300 °C міцність таких сталей становить 650...1000 МПа, відносне подовження 2...5%, твердість *HRC*40...50.

Важконавантажені деталі для роботи в умовах значних статичних, ударних або циклічних навантажень потрібно виготовляти з порошкових сталей з пористістю менше 2% (СП70-4, СП90-4, СП80НМ-4, СП60ХН2М-4, СП40Х-4 та ін.). Їх виготовляють гарячим штампуванням попередньо спечених заготовок, гарячою екструзією тощо, піддають хімічній чи хіміко-термічній обробці а також остаточній механічній обробці (шліфуванню, доведенню). Практична безпористість їх може бути отримана просоченням заготовок міддю, латунню та іншими металами. Після гартування і відпуску міцність таких матеріалів досягає 900...1300 МПа, відносне подовження 4...10%, твердість *HRC*45...55.

Крім конструкційних матеріалів на основі заліза в багатьох галузях техніки (авіаційній, приладобудівній, електротехнічній та ін.) використовуються порошкові матеріали на основі кольорових металів і сплавів. Порошковою металургією можна виготовляти матеріали, аналогічні за складом і властивостями литим чи обробленим тиском, а також матеріали з особливими властивостями, наприклад, зміцнені дисперсними оксидними включеннями, виготовлення яких литтям неможливо.

Порошкові матеріали на основі кольорових металів зазвичай виготовляють з алюмінію, міді, магнію, титану та їхніх сплавів.

Марку таких порошкових матеріалів характеризують літерні індекси та цифри.

Перша літера показує клас матеріалу: АІ – алюміній, Бр – бронза, Л – латунь, Бе – берилій, В – вольфрам, Г – манган, Д – мідь, М – молібден, Мг – магній, Н – нікель, Т – титан, Х – хром, Ц – цинк, Цр – цирконій. Друга літера «П» показує метод виробництва (порошковий). Наступна літера – легувальний елемент, а цифра після неї – середній вміст цього елемента в процентах (для латуней цифра після індексу «П» вказує на вміст міді). Цифра в кінці марки (після дефісу) характеризує групу пористості. Приклади: АІПМг2Д2Ц11-4 — алюмінієвий порошковий матеріал пористі-

стю менше 2% з вмістом магнію 2%, міді 2%, цинку 11%. ЛП65Н5-3 – латунь порошкова пористістю 2...9%, вміщує 65% міді, 5% нікелю, решта – цинк.

5.7.2 Порошкові зносостійкі матеріали

Методами порошкової металургії можуть бути створені зносостійкі матеріали, синтез яких традиційними методами лиття й обробки тиском практично є неможливим. Це матеріали типу залізо – карбід бору, залізо – ферохром, залізо – феротитан, залізо – феромарганець, залізо – скло, залізо – графіт та інші.

Наприклад, залізоскляні матеріали ПС5ГШ, КЖ4Ф використовують для виготовлення навантажених деталей вузлів тертя (зубчастих коліс, кулачків, храпових коліс, ущільнювальних кілець тощо) у ткацьких верстаках, сільськогосподарських та інших машинах, які надійно працюють в умовах обмеженої подачі мастила, в різних газових середовищах, вакуумі.

ЛІТЕРАТУРА

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 друга. Конструкційні матеріали: властивості, класифікація, виробництво : навчальний посібник. Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. 154 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 друга. Конструкційні матеріали: заготівельне виробництво

Навчальний посібник

Рукопис оформлено *О. Шиліною*

Редактор *Т. Старічек*

Оригінал-макет виготовлено *Т. Старічек*

Підписано до видання 09.04.2025 р.
Гарнітура Times New Roman.
Зам. № P2025-063.

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.
Свідцтво суб'єкта видавничої справи серія
ДК № 3516 від 01.07.2009 р.