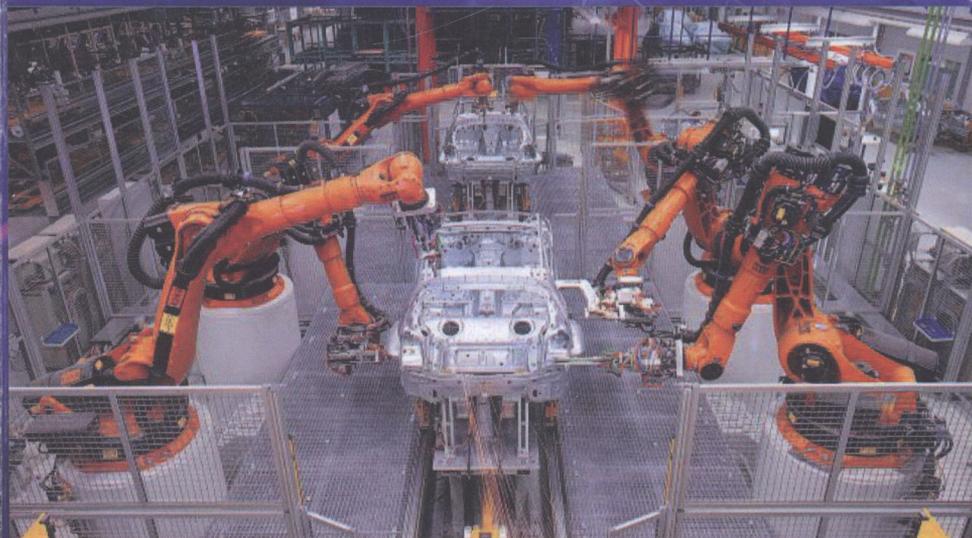


Косенко В. А.
Добровольський О. Г.
Красовський А. П.
Баліцький Л. С.
Малишев В. В.

Зварювання в автомобілебудуванні: металознавство та технології



19 621.791:629.33(075)
3-42

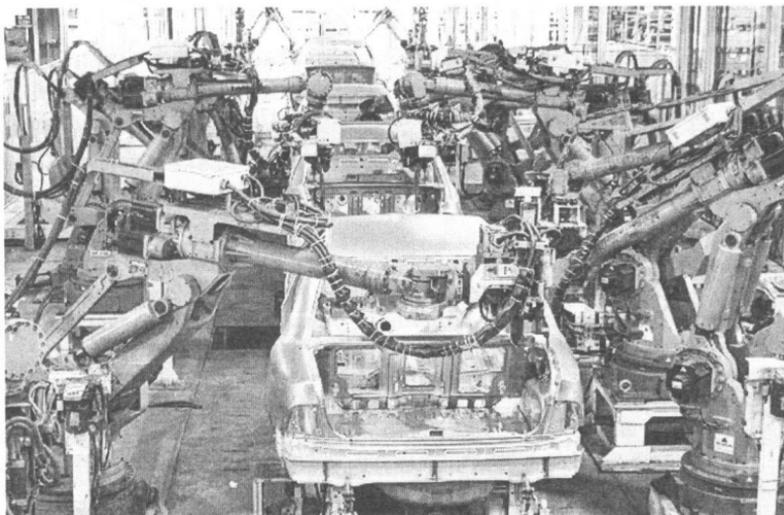
Міністерство освіти та науки України

Університет «Україна»
Інженерно-технологічний інститут

Косенко В.А., Добровольський О.Г.,
Красовський А.П., Баліцький Л.С., Малишев В.В.

Зварювання в автомобілебудуванні: металознавство та технології

Навчальний посібник



Київ
Університет «Україна»
2018

КНИГОСХОВИЩЕ

621.791.73:691 (1629.55) 695.01
УДК 621.791.73:691; 656.078:629.33:678

3-42

Рекомендовано до друку
науково-методичною радою Університету «Україна»
(Протокол № 2 від 21 грудня 2017 р.)

Рецензенти: *Лободюк В. А.*, доктор техн. наук, професор, провідний науковий Інституту металофізики ім.Г.В.Курдюмова НАН України;

Астахов Є. А., доктор техн. наук, провідний науковий співробітник Інституту електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України;

Гарнець В. М., к.т.н, професор кафедри основ професійного навчання КНУБА.

Авторський колектив: *Косенко В. А., Добровольський О. Г., Красовський А. П., Баліцький Л.С., Малишев В. В.*

3-42 **Зварювання в автомобілебудуванні: металознавство та технології: навчальний посібник / Косенко В.А., Добровольський О.Г., Красовський А.П., Баліцький Л.С., Малишев В.В. – К.: Університет «Україна», 2018 – 239 с.**

ISBN 978-966-388-555-1

Розглянуто основні питання металознавства та способи зварювання і термічного різання металів, сучасні види зварювального обладнання й апаратура, які використовують в автомобілебудуванні. Значну увагу приділено зварюванню конструкційних сталей. Розглянуто також зварювання чавунів, кольорових сплавів й інших матеріалів, які застосовуються при виготовленні і ремонті автомобілів.

Призначено для студентів навчальних закладів I – II ступенів акредитації, які навчають майбутніх кваліфікованих робітників та техніків-механіків для обслуговування та ремонту автомобілів і двигунів.

УДК 621.791.73:691; 656.078:629.33:678

482140

© Косенко В. А., Добровольський О. Г.,
Красовський А. П., Баліцький Л.С.,
Малишев В.В., 2018

ISBN 978-966-388-555-1

© Університет «Україна», 2018

НТБ ВНТУ
м. Вінниця

ЗМІСТ

Вступ.....	6
1. Основні положення металознавства	8
1.1. Кристалічна будова металів.....	8
1.2. Пружність та пластична деформація металів.....	11
1.3. Основні відомості з теорії сплавів	17
1.4. Основні властивості конструкційних матеріалів	27
1.4.1. Характеристики властивостей конструкційних матеріалів.....	27
1.5. Сплави заліза з вуглецем.....	29
1.5.1. Будова та властивості заліза	29
1.5.2. Діаграма стану залізо-вуглець.....	31
1.5.3. Вплив хімічних елементів на структуру та властивості сталі....	34
1.6. Основи термічної і хіміко-термічної обробки сталей.....	39
1.6.1. Теорія термічної обробки сталей.....	39
1.6.2. Види термічної обробки	47
1.6.2.1. Відпалювання та нормалізація	48
1.6.2.2. Гартування і відпускання сталей.....	50
1.6.3. Загартуваність і прогартуваність сталей.....	54
1.6.4. Поверхнєве гартування сталей.....	54
1.6.5. Термомеханічна обробка сталей.....	57
1.6.6. Старіння сплавів.....	58
1.6.7. Хіміко-термічна обробка сталей	60
1.6.8. Дефекти термообробки.....	62
1.7. Сталі та чавуни.....	64
1.7.1. Класифікація сталей	64
1.7.2. Вуглецеві сталі	65
1.7.3. Конструкційні леговані сталі.....	67
1.7.4. Конструкційні будівельні сталі.....	69
1.7.5. Конструкційні машинобудівельні сталі.....	75
1.7.6. Сталі та сплави з особливими властивостями.....	88
1.7.7. Чавуни, їх класифікація та властивості.....	90
1.8. Сплави кольорових металів.....	97
1.8.1. Загальна характеристика сплавів кольорових металів.....	97
1.8.2. Алюміній та сплави на його основі.....	98
1.8.3. Мідь та сплави на її основі	100
1.8.4. Титан і його сплави.....	103

1.8.5. Магній та його сплави	105
2. Загальна характеристика зварювання.....	106
2.1. Сутність зварювання.....	106
2.2. Класифікація зварних з'єднань.....	109
2.3. Загальна характеристика зварних з'єднань.....	109
2.4. Зварювання плавленням.....	115
2.4.1. Будова зварного з'єднання.....	116
2.4.2. Зварність металів і сплавів.....	120
2.5. Дугове зварювання.....	128
2.5.1. Сутність і способи дугового зварювання.....	128
2.5.2. Електрична зварювальна дуга.....	131
2.5.3. Джерела живлення зварювальної дуги	134
2.5.4. Ручне дугове зварювання.....	142
2.5.5. Автоматичне зварювання.....	154
2.5.6. Механізоване зварювання.....	159
2.5.7. Механізоване зварювання під шаром флюсу.....	165
2.5.8. Дугове зварювання порошковим дротом.....	166
2.5.9. Дугове зварювання в захисних газах	168
2.6. Плазмове зварювання.....	173
2.7. Електрошлакове зварювання.....	175
2.8. Лазерне зварювання.....	177
2.9. Газове зварювання.....	181
2.10. Зварювання тисненням.....	188
2.10.1. Контактне зварювання.....	189
2.10.2 Зварювання тертям	195
2.11. Особливості зварювання різних матеріалів.....	199
2.11.1. Особливості зварювання сталей.....	199
2.11.2. Зварювання низьковуглецевих і низьколегованих конструкційних будівельних сталей.....	199
2.11.3. Зварювання середньо- і високовуглецевих сталей.....	201
2.11.4. Зварювання високолегованих сталей	202
2.12.5. Зварювання чавуну.....	204
2.12.6. Зварювання арматурних будівельних сталей.....	206
2.12.7. Особливості зварювання алюмінієвих сплавів.....	212
2.12.8. Особливості зварювання мідних сплавів.....	213
2.12.9. Особливості зварювання титанових сплавів.....	215

2.12.10. Особливості зварювання полімерів.....	216
2.13. Термічне різання металів.....	218
2.14. Робототехнологічні комплекси для зварювальних робіт при виробництві автомобілів	225
2.15. Дефекти і контроль за якістю зварних з'єднань.....	227
2.16. Техніка безпеки під час зварювання.....	230
Використані та рекомендовані джерела посилань.....	232
Додатки.....	234

Вступ

Специфіка виробництва автомобілів та їх ремонту пов'язана з процесами зварювання і потребує використання надійних матеріалів, які застосовуються в умовах значного діапазону температур, вологості, запиленості й агресивних середовищ. Пошук оптимальних рішень у виборі економічно та конструктивно найбільш вигідних матеріалів і методів зварювання завжди був та залишається і сьогодні. Сучасні автомобільні конструкції виготовляють шляхом з'єднання окремих металевих частин методом зварювання. Під час зварювання можуть виникати проблеми, пов'язані з погіршенням механічних та інших характеристик всієї конструкції (з'являються викривлення, крихкість, зменшуються витривалість, міцність, корозійна стійкість тощо). Для надійного з'єднання окремих частин загальної конструкції треба знати закономірності і способи зварювання, обладнання та його застосування. Але для того, щоб визначити оптимальний метод зварювання й не погіршити механічні властивості конструкції в цілому, необхідно знати властивості матеріалів, а в більшості випадків такими є металеві сплави. У зв'язку з цим доцільно спочатку розглянути як властивості металевих сплавів залежать від структури та складу, тобто дати основні положення металознавства, а вже потім дати основні положення та технологію зварювання. Конкуренція на автомобільному ринку вимагає від автомобілебудівників використовувати такі марки конструкційних матеріалів, які б надійно працювали в досить жорстких експлуатаційних умовах. В першу чергу, це динамічні навантаження, які виникають у камері згорання циліндрів двигунів із-за тиску газів, ударної взаємодії поверхонь спряжених деталей, гальмівних зусиль, ударів коліс об перешкоди. Багато деталей сприймають систематичні знакоперемінні навантаження і за невдалої конструкції, неправильної технології виготовлення чи відновлення деталей вони можуть наражатись на втомлене руйнування.

До таких деталей необхідно відносити повздовжні балки і поперечини рам, ресорні листи, поворотні цапфи, напівосі, колінчаті вали, ведені вали коробок передач тощо.

Деякі деталі сприймають дуже високі питомі навантаження (шийки та вкладиші колінчастих валів, кулачки розподільного валу, хрестовини кардана та інші). Особливо високі навантаження виникають на контактних поверхнях зубчастих вінців шестерень, деталей агрегатів трансмісії автомобілів. У зв'язку з цим дуже важливо знайти оптимальний метод та технологію зварювання деталей конструкцій автомобілів, щоб не ослабити конструкцію в цілому.

Що стосується процесів зварювання, то після того, як у 1802 році винахідник В. В. Петров відкрив явище горіння електричної дуги і вказав на можливість її використання для розплавлення металів, цей винахід постійно вдосконалюється. Так російський інженер Н. Н. Бенардос у 1882 р. вперше використав це явище для зварювання і різання металів, якому дав назву "електрогефест". Н. Н. Бенардос розробляв способи зварювання переважно вугільним електродом. Йому належать також винаходи, що стосуються зварювання в захисних газах, точкового контактного зварювання і конструкцій зварювальних автоматів. Спосіб електродугового зварювання плавким електродом у 1888 р. запропонував інженер Н. Г. Слав'янов. Цей спосіб, нині вдосконалений, є найпоширенішим у зварюванні. Способи зварювання, що були розроблені Н. Н. Бенардосом і Н. Г. Слав'яновим, свого часу були запатентовані в багатьох країнах світу. Але широке їх застосування почалося лише з 20-х років минулого сторіччя.

На початку 1900 р. основним був газовий спосіб зварювання, тому що на той час для його розвитку було розроблене промислове виробництво кисню, водню і ацетилену. Крім того, за його допомогою було отримано найбільша міцність зварних з'єднань. В подальшому, коли були розроблені високоякісні електроди для дугового зварювання, автоматичний і механізований види дугового зварювання, зварювання в захисних газах та інші, газове зварювання поступово почало поступатися більш продуктивним й ефективним способам, проте досі застосовується в сучасній промисловості.

У 1934 році під керівництвом Є. О. Патона була створена перша у світі науково-дослідна установа з проблем зварювання – Інститут електрозварювання АН УРСР. Наукові напрацювання цього інституту дали змогу розробити і впровадити чимало нових прогресивних видів зварювання: автоматичне під флюсом, дугове у вакуумі, в захисних газах, порошковим дротом, електрошлакове, контактне, плазмове, лазерне, електронно-променеве, дифузійне, тертям, ультразвуком тощо. Нині розробляють і вдосконалюють способи зварювання в багатьох наукових та науково-промислових центрах країн світу.

Після винаходу автомобілів люди намагаються оптимізувати, механізувати, автоматизувати і застосувати роботи на всі технологічні процеси у виробництві автомобілів, які призводять до підвищення якості та продуктивності і, відповідно, - до збільшення прибутку. В зв'язку з цим на даний час розроблені і широко застосовуються високопродуктивні методи зварювання, що відповідають цим вимогам (наприклад, контактна, лазерна та інші способи зварювання).

1. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ МЕТАЛОЗНАВСТВА

Матеріалознавство – галузь знань і практичної діяльності, що ґрунтується на використанні матеріалів різного призначення у взаємозв'язку з їх властивостями, складом, обробкою та будовою. Відомості з цієї дисципліни мають важливе практичне значення у майбутній інженерній діяльності студентів – майбутніх спеціалістів автомобільного транспорту. Вони потрібні і при проектуванні та виборі обладнання для автомобільного транспорту, для забезпечення його ефективного використання.

В автомобільній промисловості використовується широка гамма конструкційних і різноманітних допоміжних матеріалів (сплави чорних і кольорових металів, порошкові спечені матеріали, пластмаси, ущільнювальні, мастильні матеріали тощо). Рациональне використання їх потребує поглибленого вивчення умов та особливостей експлуатації обладнання, знання експлуатаційних характеристик і вимог до матеріалів. Вирішення цих завдань неможливе без розуміння логічного ланцюга склад–будова–властивості–використання.

1.1. Кристалічна будова металів

Усі метали у твердому стані мають кристалічну будову. Найхарактернішими для металів є три типи кристалічних решіток: об'ємно-центрована кубічна (о.ц.к.), гранецентрована кубічна (г.ц.к.) і гексагональна щільноупакована (г.щ.у.).(рис. 1.1)

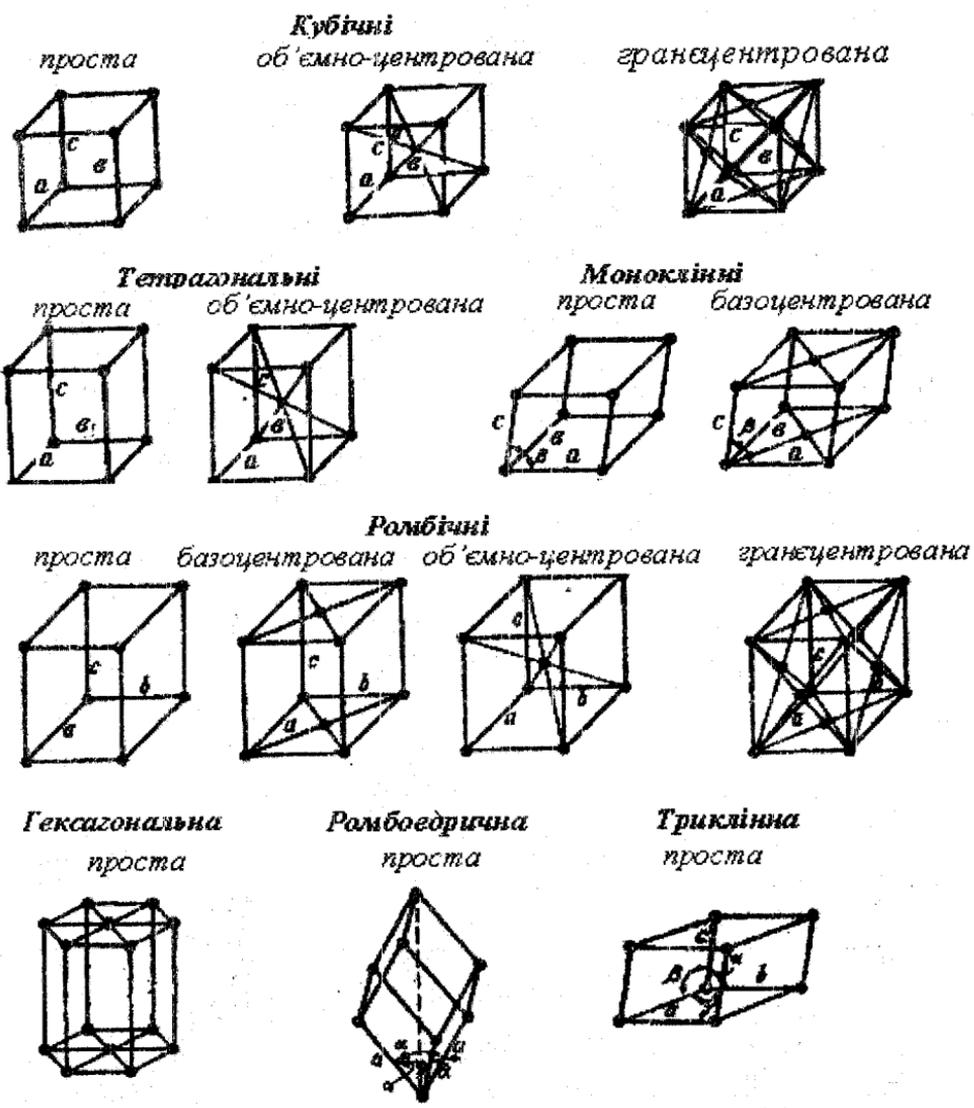


Рис. 1.1. Схематична будова 7-ми кристалографічних систем (сингоній) та 14 просторових решіток

Необхідно зазначити, що будова реальних кристалів металів буде відрізнятись.

Реальна будова металів. Реальні метали відрізняються від ідеальних тим, що в їх кристалічних ґратках є багато різних дефектів. Дефект як структурний фактор впливає на властивості матеріалів.

Дефекти кристалічних ґраток бувають точковими, лінійними, поверхневими (рис. 1.2).

До *точкових* належать дефекти, які утворюються за відсутності атома у вузлі кристалічної ґратки (дефект має назву "дірка") або в разі розміщення атома не у вузлі, а між вузлами (дислоційований атом). Точкові дефекти утворюються також за наявності домішок (рис. 1.2, а).

До *лінійних* дефектів належать *дислокації* атомів. Такі дефекти є незначними у двох напрямках ґратки і мають велику протяжність у третьому напрямку (вимірі). На рис. 1.2, б відображено крайову дислокацію, а на рис. 1.2, в – гвинтову дислокацію.

Поверхневі дефекти – це дефекти між зернами – на межах зерен (рис. 1.2, г). Серед усіх дефектів вони є найзначнішими. Наявність дефектів може впливати на механічні та інші властивості матеріалів. На рис. 1.3 показано, що міцність бездефектних кристалів (ділянка 1) на три-чотири порядки вища, ніж у реальних полікристалічних матеріалів. Дуже тонкі волокна, які мають назву "вуса", є майже бездефектними, тому їх міцність (ділянка 2) близька до міцності ідеальних кристалів. Найменша міцність – у незміцнених металів, отриманих методами лиття (ділянка 3).

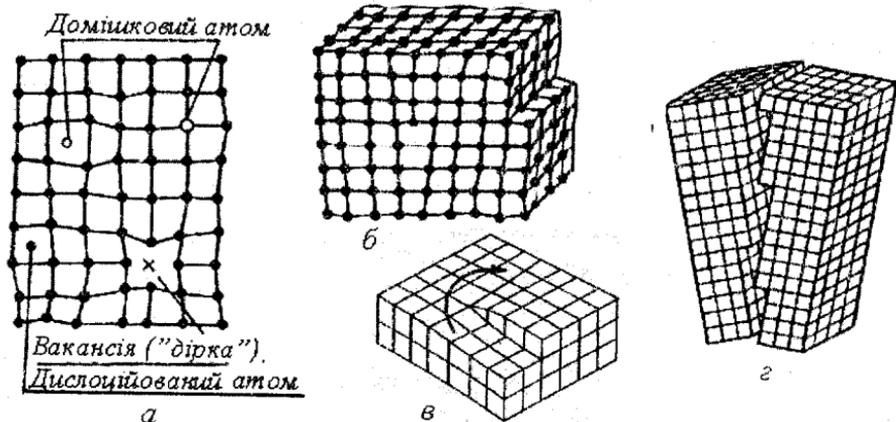
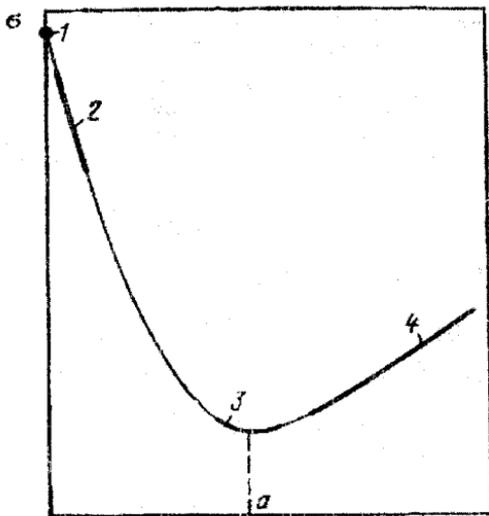


Рис. 1.2. Дефекти кристалічних ґраток:
а) точкові; б,в) лінійні (дислокації); г) поверхневі



Щільність дефектів ρ

Рис. 1.3. Схематична залежність міцності металів σ від щільності дефектів ρ :

1 – теоретична міцність; 2 – міцність "вусів"; 3 – незміцнені метали;
4 – сплави, зміцнені легуванням, наклепом, термічною, термомеханічною та іншими видами обробки

На ділянці 4 (рис. 1.3) відбувається підвищення міцності металів завдяки легуванню, термічній обробці, наклепу тощо, які збільшують кількість дефектів у кристалічних ґратках матеріалів.

Будова сплавів складніша за будову чистих металів, тому і властивості сплавів значно відрізняються від властивостей чистих металів.

1.2. Пружна і пластична деформації металів

Деформацією називається зміна розмірів і форми тіла під дією навантажень. Розрізняють пружну і пластичну деформації.

Пружна деформація зникає після припинення дії навантажень, що її спричинили. Під час пружної деформації атоми кристалу зміщуються на відстані значно менші від величини параметра елементарної комірки, коли зі зростанням міжатомних відстаней сили взаємного притягання атомів збільшуються. Після зняття навантажень атоми під дією цих сил повертаються у положення рівноваги, а тіло відновлює свої початкові розміри й форму.

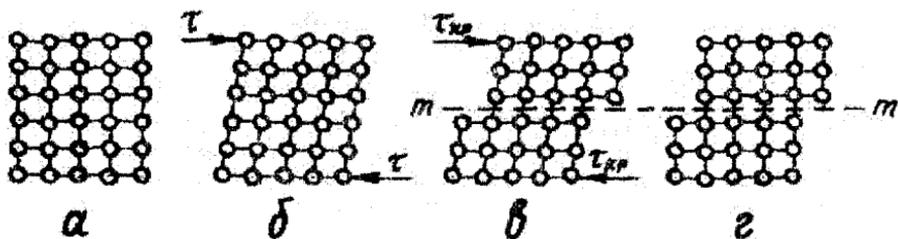


Рис. 1.4. Пружна (б) і пластична (в) деформації (в.г) металу під дією дотичного напруження

Пластичною або залишковою називається деформація, яка зберігається в тілі після зняття навантажень. На відміну від пружної, в процесі пластичної деформації окремі групи атомів металу *переміщуються на велику кількість* міжатомних відстаней. Після цього вони знову займають положення рівноваги, завдяки чому пластично деформований метал залишається суцільним. Пластична деформація настає після досягнення дотичними напруженнями критичного рівня m (рис. 1.4, в).

Внаслідок дії цих напружень деформація стає не оборотною: під час їх зняття зникає тільки пружна складова сумарної деформації (рис. 1.4, г), а пластична залишається.

Ковзання є головним механізмом пластичної деформації. Під час ковзання частина кристалу пересувається відносно іншої його частини вздовж площини ковзання mn під дією дотичних напружень, що досягли критичної величини. Найлегше ковзання здійснюється у кристало-графічних площинах, де густина атомів максимальна. Міжатомна відстань між такими площинами найбільша, а сили міжатомного притягання мінімальні.

Ковзання в реальному монокристалі відбувається в результаті послідовного переміщення дислокацій.

Під час ковзання генеруються все нові й нові дислокації. Внаслідок зростання їх кількості метал зазнає деформаційного зміцнення. Подальшому рухові дислокацій заважають такі перепони, як інакше орієнтовані дислокації, тверді складові структури, границі блоків і зерен тощо. Біля дислокацій виникає поле напружень, завдяки якому сусідні дислокації відштовхуються. Метал з великою кількістю дислокацій деформувати важче, ніж з їх малою кількістю. В місцях надто великого нагромадження дислокацій може утворитись навіть мікротріщина.

Ковзання в ідеальному кристалі без дислокацій повинно проходити

шляхом одночасного переміщення всіх атомів, що перебувають у площині ковзання. Як показали теоретичні розрахунки, таке одночасне переміщення атомів вимагає дуже високих напружень, величина яких називається теоретичною міцністю металу. Теоретична міцність більша за реальну в сотні й до тисячі разів.

В інженерній практиці зустрічаємось не з монокристалічними, а з полікристалічними матеріалами, що складаються із кристалітів різної орієнтації. Насамперед деформуються ті зерна, кристалографічні площини яких найсприятливіше розташовані відносно напрямку максимальних напружень. Із ростом деформації ковзання охоплює все нові й нові зерна. Вони лотупово видовжуються в напрямку напружень і в кінцевому результаті стають подібними до волокон у деревині.

Структуру, що складається із видовжених під час пластичної деформації зерен, називають волокнистою. Відомо, що міцність, ударна в'язкість і пластичність металу вздовж волокон вищі, ніж уперек волокон. Тому потрібно виготовляти відповідальні деталі так, щоб напрям діючих напружень збігався з орієнтацією волокон.

Наклепом називається зміцнення металу в процесі холодної пластичної деформації. Наклеп підвищує твердість й міцність та знижує пластичність. Зміцнення і окрихчення металу можна пояснити зростанням числа дефектів кристалічної будови (дислокацій, вакансій, міжвузлових атомів), довкола яких є пружні спотворення кристалу. В результаті опір переміщенню дислокацій значно підвищується. Що більша деформація, то сильніше змінюються властивості наклепаного металу. Зазначимо, що метали з ГЦК коміркою наклепуються сильніше, ніж метали з ОЦК коміркою. Нерідко наклеп використовують як самостійний спосіб обробки для зміцнення виробів. Так, міцність сталевого дроту, виготовленого холодним волочінням, можна довести до дуже високого рівня.

У наклепаному металі акумулюється 5...10% від загальної кількості енергії, що була витрачена на деформацію. Нагромаджена в металі потенціальна енергія зосереджується в околі дефектів у вигляді енергії пружної деформації. Наклепаний метал енергетично нестабільний. Тому будь-яка зовнішня активація і найперше теплова, стає причиною його переходу до стабільнішого стану. Цьому сприяють дифузійні процеси, які посилюються з підвищенням температури.

Відновою називають зменшення густини дефектів кристалічної будови наклепаного металу під час нагрівання без помітних змін структури, видимої в оптичному мікроскопі. Внаслідок метал

переходить до більш рівноважного стану, що супроводжується незначним зниженням твердості й міцності та деяким зростанням пластичності. Віднова проходить через дві стадії:

- відпочинок;
- полігонізацію.

Віднова відбувається під час незначного нагрівання, коли термодинамічна температура металу не перевищує $0,2T_T$ (де T_T – термодинамічна температура топлення металу). Тоді знижується кількість точкових дефектів, дислокацій, частково знімаються залишкові напруження і спотворення кристалічної будови. Перегрупування дислокацій під час віднови не призводить до утворення нових малокутових границь.

Полігонізація (від грецьк. – багатокутник), як друга стадія віднови, полягає у нагріванні металу до температури $(0,2...0,3) T$ з утворенням в межах окремого кристалу фрагментів і блоків (полігонів), розділених малокутовими границями. Під час нагрівання до температури полігонізації рухливість дислокацій зростає.

Полігонізація рідко розвивається в міді та її стопах, зате активніша в алюмінію, залізі, молібдені та їх стопах.

Рекристалізація – процес зародження та росту нових недеформованих зерен під час нагрівання наклепаного металу до заданої температури. Рекристалізація відбувається при вищій температурі, ніж віднова. Є дві стадії рекристалізації:

- первинна (рекристалізація обробки);
- збиральна.

Первинна рекристалізація полягає в зародженні у деформованій структурі недеформованих зерен та їх подальшому росту. Рушійним фактором первинної рекристалізації є енергія, акумульована в наклепаному металі, який намагається зменшити її й перейти до стабільнішого стану структури з нових недеформованих зерен. Перші зародки нових зерен виникають у найбільш деформованих зонах, переважно на границях початкових зерен і в смугах ковзання. Цей процес можна значно інтенсифікувати, збільшуючи температуру й деформацію металу.

Первинна рекристалізація закінчується повною заміною початкових зерен новими, переважно з іншою кристалографічною орієнтацією. Новоутворені зерна мають невелику кількість лінійних і точкових дефектів. У результаті пластичність зростає (рис. 1.5).

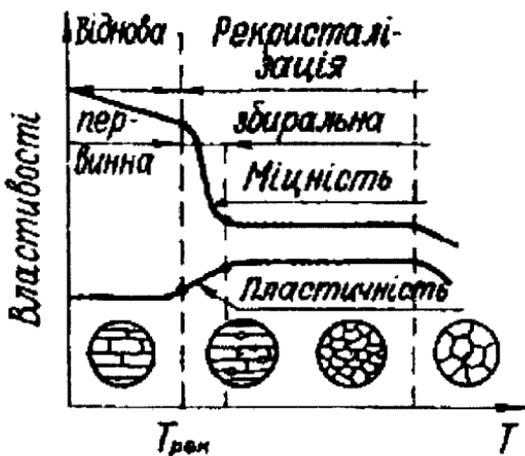


Рис. 1.5. Схема зміни структури та властивостей під час відновлення і рекристалізації

Найнижча температура, при якій починається рекристалізація, називається **температурним порогом рекристалізації**. Температурний поріг залежить від ступеня попередньої деформації, часу нагрівання, чистоти металу, легувальних елементів тощо. Величина порогу знижується з підвищенням ступеня деформації і тривалості нагрівання.

Термодинамічна температура порогу рекристалізації $T_{кр}$ пов'язана з термодинамічною температурою топлення T_m металу залежністю:

$$T_{кр} = \alpha T_m$$

На коефіцієнт α найбільше впливає чистота металу і пластична деформація. Для металів технічної чистоти $\alpha = 0,4$, і вона знижується зі збільшенням пластичної деформації. Для особливо чистих металів $\alpha = 0,1 \dots 0,2$, а для твердих розчинів $\alpha = 0,5 \dots 0,6$ і більше. При незначній попередній пластичній деформації рекристалізація не відбувається. Та мінімальна деформація, вище якої починається первинна рекристалізація, є критичною деформацією. Наприклад, критична деформація для алюмінію становить близько 2%, для заліза й міді – близько 5%. У металах із незначною попередньою деформацією утворюються найбільші рекристалізовані зерна, а в міру її зростання розміри рекристалізованого зерна зменшуються.

Щоб зовсім зняти наклеп, метал нагрівають до температури, що перевищує поріг рекристалізації. Такий вид термічної обробки називають рекристалізаційним відпалом. Його застосовують для

надарння металів високої пластичності перед холодною обробкою тиском, а також як кінцеву обробку після пластичної деформації. Температура рекристалізаційного відпалу для низьковуглецевих сталей коливається в межах 600...700° С, для латуней і бронз – 560...700° С, для стопів алюмінію – 350...450° С.

Після закінчення первинної рекристалізації триває ріст новоутворених зерен, особливо, коли збільшувати час витримки або температуру.

Зростання одних рекристалізованих зерен за рахунок сусідніх рекристалізованих зерен називається збиральною рекристалізацією.

Вирішальним для збиральної рекристалізації є поверхнева енергія новоутворених зерен, величина якої після процесу знижується, оскільки сумарна довжина границь великих зерен значно менша, ніж дрібних. Зазначимо, що після первинної рекристалізації утворені зерна дрібні, хоч і не однакові за розмірами. Різниця поверхневих енергій сусідніх дрібних і великих зерен сприяє збиральній рекристалізації. Великі зерна ростуть за рахунок дрібних унаслідок переходу атомів через границі зерен. Зростання зерен особливо активізується з підвищенням температури. Залежність величини площі рекристалізованих зерен від температури й ступеня деформації наочно простежується на діаграмі рекристалізації (рис. 1.6).

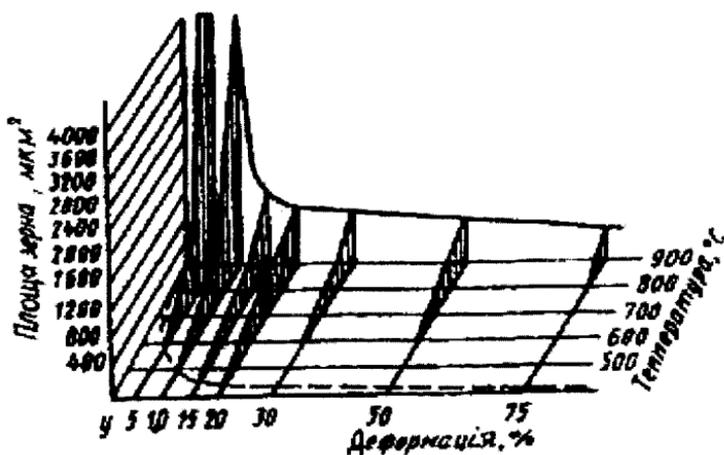


Рис. 1.6. Повна діаграма рекристалізації заліза

Контрольні запитання для самостійної підготовки

1. Як відбувається пластична деформація?
2. Що таке текстура деформації і наклеп?
3. Чим пояснюється зміцнення металів при пластичній деформації?
4. В чому полягає процес рекристалізації?
5. Як змінюються механічні властивості металів при рекристалізаційному відпалі?

1.3. Основні відомості з теорії сплавів

Сплавами називають сполучення двох або більшої кількості металів і неметалів унаслідок взаємного проникнення їх атомів. Складові сплави, тобто хімічні елементи, називають *компонентами*. Залежно від кількості компонентів сплави бувають двокомпонентними, трикомпонентними тощо.

У процесі утворення сплавів компоненти можуть взаємодіяти й утворювати *тверді розчини* або *хімічні сполуки*. Іноді компоненти лише механічно змішуються і залишаються в сплавах майже без змін. Такий сплав являє собою *механічну суміш* цих складових. Названі складові сплави – тверді розчини, хімічні сполуки або складові механічних сумішей – називаються фазами. Сплави можуть складатися з двох, трьох і більшої кількості фаз. *Фаза* – це однорідна складова структури сплаву, яка характеризується однаковим хімічним складом, властивостями і кристалічною будовою. Наприклад, Pb і Sb майже не розчиняється один в одному і під час утворення сплавів має мікроструктуру, зображену на рис. 1.7. Аналізуючи її, визначаємо, що сплав є двокомпонентним і двофазним: він складається з компонентів Pb і Sb, які одночасно являють собою фази – світлі зерна Pb і темні зерна Sb.

Інший приклад – сплав міді і нікелю (рис. 1.8). Цей сплав складається з двох компонентів *Cu* і *Ni*. Під час виготовлення сплаву мідь і нікель взаємно розчинюються й утворюють розчин міді в нікелі чи розчин нікелю в міді. Такі сплави є двокомпонентними й однофазними. Білі зерна (рис. 1.8) – фаза твердого розчину.



Рис. 1.7. Схема мікроструктури сплаву Pb – Sb

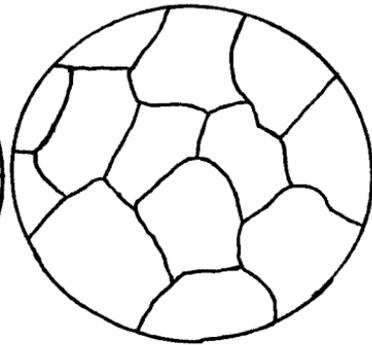


Рис. 1.8. Схема мікроструктури сплаву Cu – Ni

У фазах, які називаються *твердими розчинами*, кристалічна ґратка одного з компонентів зберігається. Тверді розчини утворюються або шляхом заміщення атомів розчинника в кристалічній ґратці атомами компонента, який розчиняється, або внаслідок проникнення одних атомів між атомами кристалічної ґратки другого компонента. Перші називають твердими розчинами заміщення, а другі – твердими розчинами проникнення.

На рис. 1.9, *а* зображено елементарну кристалічну ґратку твердого розчину заміщення хрому в залізі. Окремі вузли в кристалічній ґратці α - заліза зайняті іонами хрому. Іони обох металів розміщуються у вузлах кристалічної ґратки.

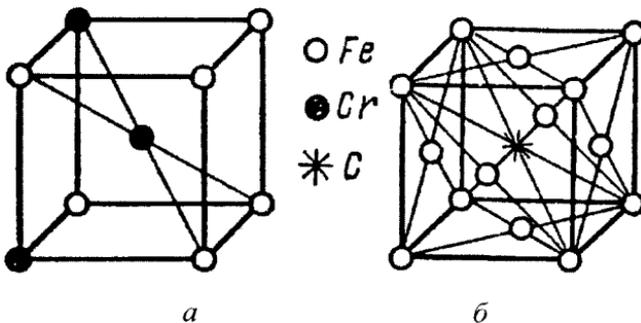


Рис. 1.9. Елементарні кристалічні ґратки твердих розчинів:
а – залізохромовий; *б* – залізовуглецевий

Метали з неметалами утворюють тверді розчини проникнення. Атоми неметалів (H, N, B і C) за розмірами менші від атомів металів,

тому атоми неметалів можуть розміщуватись між вузлами кристалічних ґраток. Як приклад, на рис. 1.9, б зображено кристалічну ґратку проникнення вуглецю в γ -залізо.

У твердих розчинах проникнення розчинність неметалу завжди обмежена. У твердих розчинах заміщення розчинність буває великою, навіть 100-відсотковою. Тверді розчини позначаються буквами грецького алфавіту: α , β , γ та ін.

Утворення твердих розчинів супроводжується збільшенням електроопору, коорцетивної сили, міцності, твердості, а також зниженням температурного коефіцієнта електроопору і в'язкості.

Хімічні сполуки, як і тверді розчини, мають однорідну структуру. Хімічна сполука має постійний склад, який може бути представлений хімічною формулою A_nB_m , де n і m указують на певну кількість атомів компонентів A і B . Наприклад, у хімічній сполуці Fe_3C три атоми заліза припадають на один атом вуглецю, а в сполуці Cu_2Mg два атоми міді – на один атом магнію.

У сплавах можуть утворюватись, крім уже розглянутих, проміжні фази, які мають ознаки і твердих розчинів, і хімічних сполук. Наприклад, $CuAu$ або Cu_3Au не являють собою хімічних сполук, тому що в них зберігається кристалічна ґратка металів. Вони належать до так званих *упорядкованих твердих розчинів, або надструктур*. Утворення цих фаз супроводжується зміною фізичних (магнітні властивості, електроопір) і механічних властивостей.

Залежно від природи компонентів у проміжних фазах можуть переважати металевий, ковалентний або іонний тип зв'язку.

Фази в сплавах частіше виявляють під мікроскопом за їх кольором або твердістю, а остаточно підтверджують за допомогою рентгенівського аналізу.

Діаграми стану сплавів. Діаграми стану у зручній графічній формі відображають *фазовий склад* сплавів залежно від температури і концентрації в умовах рівноваги, коли всі фазові перетворення завершені. На діаграмах стану відображається також залежність від концентрації компонентів таких характеристик, як *температура плавлення, температура алотропічних перетворень і межа розчинності компонентів*. Рівноважний стан у фазах і між фазами досягається за дуже малих швидкостей охолодження або тривалого нагрівання сплаву. Діаграма будується в координатах «температура – концентрація».

Хімічний склад (концентрація) сплавів позначається таким чином, як подано на рис. 1.10.

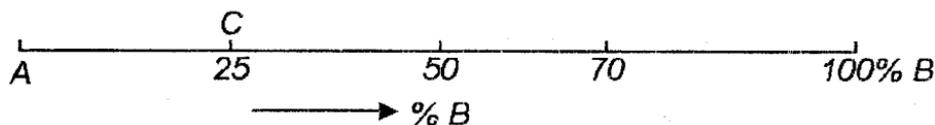


Рис. 1.10. Схема позначення хімічного складу в сплавах

У точці *A* розміщується чистий компонент *A* без домішок компонента *B*. У точці *C* сплав містить 25 % компонента *B* і 75 % компонента *A*. У точці *B* міститься 100 % компонента *B* без домішок компонента *A*. Температуру плавлення та критичні температури на діаграмах стану відкладають на осі ординат.

Частіше для побудови діаграми стану застосовують метод термічного аналізу, який полягає в тому, що спочатку виконують лабораторне дослідження, завдяки якому отримують ряд кривих охолодження сплавів з різною концентрацією в координатах «температура – час» (рис. 1.11). За цими експериментальними даними будують діаграму стану. Крива охолодження аморфного тіла є плавною, тому що температура знижується поступово і безперервно без фіксації температури плавлення, починаючи з рідкого стану до твердого (рис. 1.11, *a*). Під час охолодження кристалічних речовин на кривих охолодження проявляються точки перегину, пов'язані із зміною швидкості охолодження в моменти кристалічних перетворень. Ці точки перегину відповідають критичним температурам металу або сплаву, за яких відбувається кристалізація, утворення твердого розчину або алотропічне перетворення кристалічної ґратки. Утворення перегину на кривій охолодження пов'язано з тим, що в процесі кристалізації, алотропного перетворення відбувається виділення внутрішньої теплоти, через що зменшується швидкість охолодження. Зменшується швидкість охолодження також під час утворення твердого розчину. Отже, в процесі кристалізації чистого металу утворюється полицка (рис. 1.11, *б*) завдяки виділенню тепла, а в процесі кристалізації твердого розчину – лише перегин кривої (рис. 1.11, *г* і *д*). В точці 2^1 на рис. 1.11, *г* відображається закінчення процесу утворення твердого розчину. Кристалізація евтектики (3) позначається полицкою (рис. 1.10, *в*.), алотропічне перетворення – також полицкою (3¹).

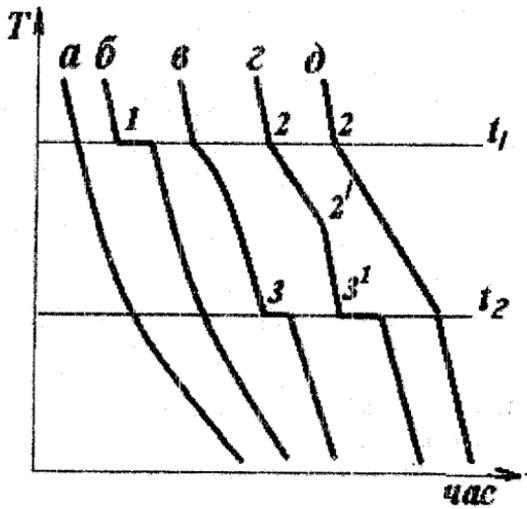


Рис. 1.11. Графіки охолодження під час твердіння аморфного тіла (а), чистого металу (б), сплаву з евтектикою (в), сплаву з твердим розчином (2 - 2') й алотропним перетворенням (3') (г, д); t_1 - температура початку кристалізації чистого металу (1), твердого розчину (2); t_2 - температура кристалізації евтектики (3) або алотропічного перетворення (3')

На основі цих кривих будують діаграму. Вигляд діаграми стану сплавів залежить від того, що утворюється під час затвердіння сплаву: механічна суміш, твердий розчин чи хімічна сполука.

Діаграма стану двокомпонентної системи з необмеженою розчинністю компонентів у рідкому стані і нерозчинних у твердому.
 На рис. 1.12 схематично зображена така діаграма стану. Її побудова починається з підготовки зразків двох металів А і В, а також сплавів 1, 2 і 3 з концентраціями відповідно до тих, які показано на рис 1.12, б. Кожен із них окремо нагрівають до температури, вищої за температуру їх плавлення, після чого охолоджують. У процесі охолодження вимірюють температуру і будують графік залежності від часу охолодження. У такий спосіб побудовано графіки охолодження, як показано на рис. 1.12, а. З цих графіків видно полички і перегини кривих відповідно до температур початку й завершення кристалізації. Отже, на кривих охолодження компонентів А і В (рис. 1.12,а) виявляється відповідна температура кристалізації t_A та t_B , яка була

перенесена на вісь температур, яка відповідає 100%-й концентрації цих компонентів (рис. 1.12, б). Аналогічно поличка Е вказує на температуру плавлення сплаву 2. Значення цієї температури перенесено на вертикальну лінію, яка відповідає сплаву 2 на рис. 1.12. Криві охолодження сплавів 1 і 3 мають перегини в точках а і в (рис. 1.12, а), що відповідає температурам початку кристалізації сплавів. Ці значення було перенесено на вертикальні лінії, які відповідають концентрації таких сплавів (рис. 1.12, б). Полички Е' і Е'' указують на закінчення кристалізації сплавів 1 і 3. Наявність поличок свідчить про те, що в цих точках, а також у точці Е відбувалася кристалізація евтектик. Температура Е' і Е'' була перенесена на рис. 1.11, б на вертикальні лінії, відповідно до концентрацій сплавів 1 і 3. Після позначення критичних точок (рис. 1.12, б) точки температур початку кристалізації t_A , а, Е, б і t_B з'єднали лінією і отримали криву початку кристалізації сплавів системи компонентів А і В. Аналогічно, з'єднавши точки кінця кристалізації сплавів 1, 2 і 3, Е', Е і Е'', отримали лінію кінця кристалізації сплавів системи компонентів А і В.

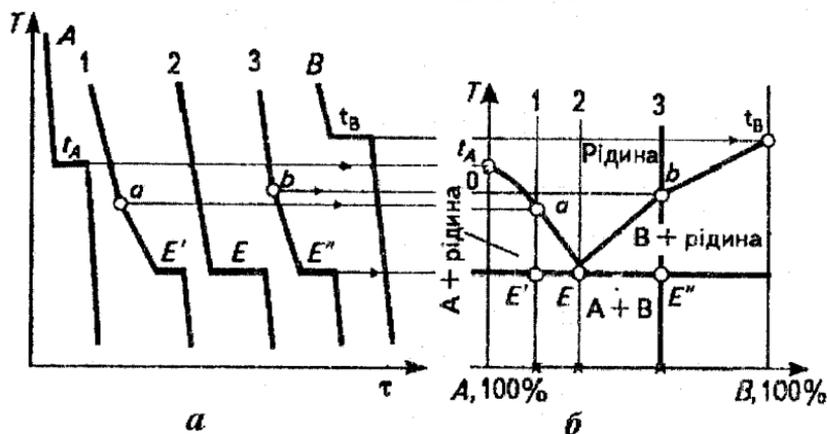


Рис. 1.12. Схема побудови двокомпонентної діаграми стану з необмеженою розчинністю компонентів А і В у рідкому стані і нерозчинних у твердому:

а – графіки охолодження, одержані методом термічного аналізу; б – діаграма стану

Лінія діаграми, яка відповідає температурі початку кристалізації сплавів, називається *лінією ліквідуса* («ліква» з латинської – «рідкий», «розплавлений»), а лінія закінчення кристалізації – *лінією солідуса* («солід» із латинської – «твердий»).

Під час кристалізації сплавів, компоненти яких є нерозчинними в твердому стані, утворюється структура, яка містить евтектику. На діаграмі сплавів А – В (рис. 1.12) точка Е відповідає хімічному складу, за якого кристалізується лише евтектика. *Евтектика* – це механічна суміш дрібних кристаликів обох компонентів з однаковим взаємним розміщенням, яка має сталий хімічний склад і найменшу температуру плавлення системи («eutektos» – у перекладі з грецької означає «легкоплавкий»). Точкам А та В відповідає структура чистих металів А і В відповідно, чия температура плавлення і кристалізації більша, ніж у їх сплавах. Сплави, які за складом розміщені ліворуч від евтектичного сплаву, називають доевтектичними, а праворуч – заевтектичними. Структура доевтектичного сплаву складається з первинних кристалів компонента А і евтектики, а структура заевтектичного сплаву – з первинних кристалів компонента В та евтектики. На відміну від чистих компонентів і евтектики, які кристалізуються при постійній температурі, у всіх сплавах системи кристалізуються в інтервалі певних температур. Кристалізація різних сплавів починається при різній температурі, а закінчується при певній температурі, однакової для цієї системи сплавів. Прикладом розглянутих сплавів можуть бути сплави систем Pb – Sb, Sn – Zn.

Діаграма стану сплавів, які у твердому стані утворюють кристалічні тверді розчини з необмеженою взаємною розчинністю компонентів. Коли розчинність компонентів необмежена, діаграма стану має такий вигляд, як на рис 1.13. Кожний сплав цієї системи буде кристалізуватися за схемою відповідно до кривої охолодження сплаву 1, яка відображена на цьому рисунку. В процесі кристалізації з рідини випадають кристали твердого розчину α змінного складу: в точці a з'являються зародки, які, згідно з правилом фаз, мають склад, який відповідає складу в точці v . У процесі подальшого охолодження в точці c на поверхні зародка кристалізується метал, який відповідає точці v_1 . При цьому склад рідини теж змінюється і буде відповідати складу в точці a_1 . Закінчується процес твердіння сплаву в точці v_2 з рідини, яка має склад, що відповідає точці a_2 . Таким чином, із розплаву випадають кристали твердого розчину з різним співвідношенням компонентів. Унаслідок дифузійних процесів концентрація сплавів вирівнюється, і тим краще, чим повільніше відбувається охолодження. Прикладом таких сплавів є система сплавів Cu – Ni.

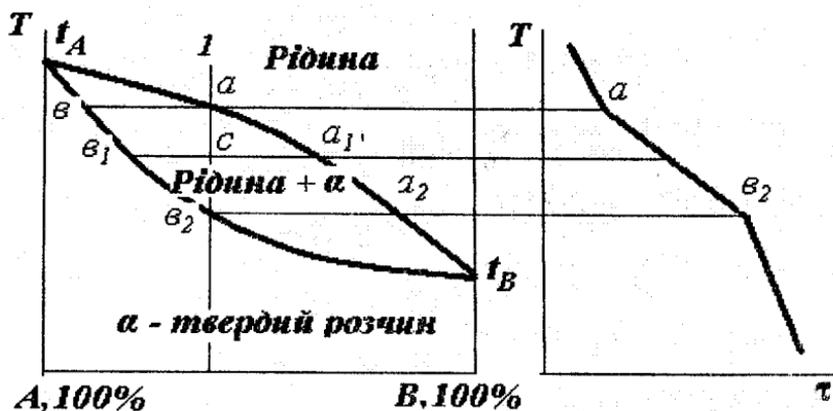


Рис. 1.13. Діаграма стану з необмеженою взаємною розчинністю компонентів у твердому і рідкому станах

Діаграма сплавів, компоненти яких утворюють тверді розчини з обмеженою розчинністю. Схема цієї діаграми подано на рис. 1.14. Сплав цієї системи характеризуються тим, що в процесі взаємодії компонентів А і В утворюються тверді розчини з певною межею розчинності. Тверді розчини позначають літерами грецького алфавіту – α , β , γ , δ , ϵ . В даному випадку твердий розчин компонента В в компоненті А позначено літерою α , а твердий розчин А у В – літерою β . Лінія ADF визначає межу розчинності α -твердого розчину, а лінія BCG – межу розчинності β -твердого розчину. За концентрації компонентів, що відповідає точці Е, утворюється евтектика, яку позначено $(\alpha + \beta)$.

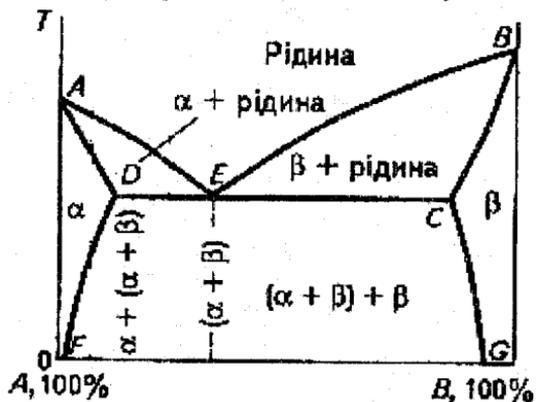


Рис. 1.14. Діаграма стану сплавів з обмеженою розчинністю компонентів у твердому стані

Сплави між точками D і Е після кристалізації з розплаву

складаються з кристалів α -твердого розчину і евтектики ($\alpha + \beta$), а між точками E і C – з евтектики і кристалів β -твердого розчину. Сплав з умістом компонента B, меншим, ніж у точці D, закінчується кристалізацією по лінії AD і складається з кристалів α . При повільному зниженні температури після перетину лінії FD α -кристали стають пересиченими щодо компонента B. У результаті в об'ємі цих кристалів утворюються дрібні кристалики β -твердого розчину. У сплавах з умістом компонента B більшим, ніж у точці E, при температурі, нижчій від лінії EC, в кристалах β -твердого розчину з'являються дрібні α -кристали. Розглянутий тип діаграми характерний для сплавів системи Cu – Ag тощо.

Діаграма стану сплавів з утворенням хімічної сполуки. У випадку, коли при взаємодії двох компонентів A і B утворюється хімічна сполука, діаграма має вигляд, як на рис. 1.15. Літерами A_nB_m умовно позначено будь-яку хімічну сполуку, яку можна розглядати як третій компонент, що поділяє діаграму на дві діаграми. Обидві діаграми в цьому випадку є діаграмами, компоненти яких практично нерозчинні в твердому стані. Можуть бути й інші варіанти, наприклад, коли між компонентами і хімічною сполукою є обмежена або необмежена розчинності. Тоді діаграма матиме інший вигляд. Тип діаграми, показаний на рис. 1.15, є характерним для сплавів декількох систем, наприклад, для системи Mg – Ca, між компонентами якої утворюється хімічна сполука Mg_4Ca_3 .

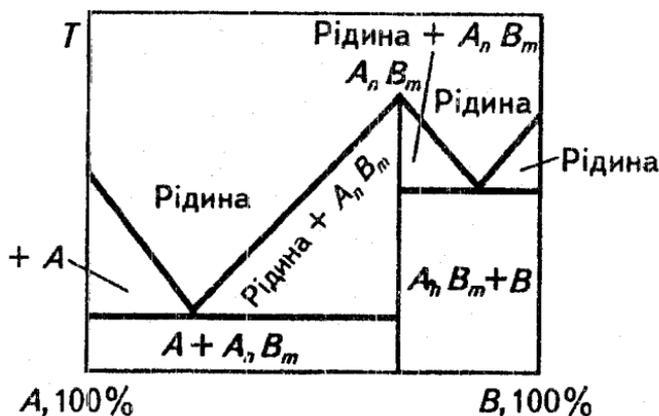
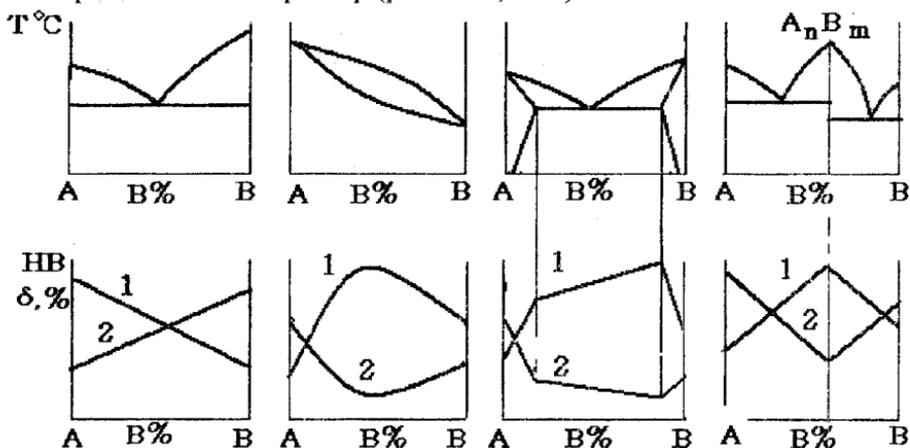


Рис. 1.15. Діаграма стану сплавів, компоненти яких утворюють хімічну сполуку

Зв'язок між типом діаграми стану та властивостями сплавів.

На рис. 1.16. відображено принципові закономірності зміни властивостей – відносного видовження (δ) і твердості (НВ) – залежно від складу сплаву різних типів діаграм стану двокомпонентних систем.

Залежність властивостей сплавів від концентрації компонентів А і В у системі, коли утворюються механічні суміші у твердому стані, має прямолінійний характер (рис. 1.16, а). Коли до компонента А додається компонент В, який розчиняється у компоненті А обмежено або необмежено, відбувається підвищення твердості (НВ) і зниження в'язкості (δ). При цьому зміна властивостей характеризується не прямою залежністю від концентрації компонента, що розчиняється, а має криволінійний характер (рис. 1.15, б і в).



а б в г

Рис. 1.16. Залежність властивостей сплавів від типу діаграми стану:
1 – твердість (НВ); 2 – відносне видовження (δ)

Слід зазначити, що в системах, для яких характерна обмежена розчинність, у ділянці сплавів, що містять евтектику, спостерігається прямолінійна залежність зміни їх властивостей (рис. 1.16, в). Утворення в системі хімічних сполук (рис. 1.16, г) супроводжується стрибкоподібною зміною властивостей сплаву. При цьому твердість сплаву збільшується, а в'язкість – зменшується.

Показаний зв'язок між типом діаграми стану та властивостями сплавів є орієнтовним, оскільки не відображає багатьох факторів, таких, як форма та розмір зерен, наявність дефектів тощо. Але за допомогою діаграм стану можна вирішувати практичні завдання, наприклад, підбір складу сплаву для виготовлення деталей методами

лиття чи штампування, встановлення режимів термічної обробки, гарячої обробки тиском, зварювання тощо.

У багатьох випадках діаграми стану сплавів мають більш складний вигляд. Наприклад, діаграма стану заліза з вуглецем, яка буде розглянута в розділі “Сплави заліза з вуглецем”, відображає алотропні перетворення фаз, хімічну сполуку Fe_3C і тверді розчини з обмеженою розчинністю.

1.4. Основні властивості конструкційних матеріалів

1.4.1. Характеристики властивостей матеріалів

Матеріали мають фізичні, механічні, технологічні та хімічні властивості.

Фізичні властивості – колір, щільність, температура плавлення, електричні властивості (електропровідність, електроопір), магнітні властивості, теплопровідність, розширення і стискання внаслідок нагрівання й охолодження, фазових перетворень тощо.

Хімічні властивості – корозійна стійкість, опір дії кислот та лугів, вогнетривкість тощо.

Знання про хімічні властивості металів і сплавів дає змогу правильно добирати їх для виготовлення конструкцій. Різні метали та сплави по-різному зазнають корозії. Наприклад, золото, срібло, мідь, нержавіюча сталь мало піддаються корозії, а звичайна сталь легко кородує. Корозійна стійкість особливо важлива для виробів, які використовують у хімічно активних середовищах.

Механічні властивості – міцність, пружність, жорсткість, в'язкість, пластичність, крихкість, повзучість, у загальних рисах деякі з них можна визначити таким чином.

Міцність – властивість матеріалу чинити опір руйнуванню і появі залишкових деформацій під впливом зовнішніх сил.

Пружність – здатність матеріалу відновлювати свою форму після того, як перестануть діяти зовнішні сили, які спричинили зміну форми (деформацію). У цьому разі буде діяти пружна деформація.

Пластичність – властивість металу деформуватися, не зазнаючи руйнування, під впливом зовнішніх сил і зберігати нову форму після того, як ці сили перестали впливати (пластична деформація).

В'язкість – здатність матеріалу поглинати механічну енергію і при цьому виявляти значну пластичність аж до руйнування. Ця властивість протилежна крихкості.

Механічні властивості характеризують працездатність металу, його здатність залишатися під навантаженням, не руйнуючись, й одночасно добре деформуватися (змінювати форму та розміри).

В'язкі метали застосовують у випадках, коли деталі під час роботи зазнають ударних навантажень. Пластичність металів дає змогу обробляти їх під тиском. Багато виробів, крім міцності, повинні мати високу твердість, наприклад, інструменти для різання. Для виготовлення пружин і ресор використовують метали та сплави, які мають високу пружність.

Технологічні властивості – ковкість, рідкоплинність, зварність, загартовуваність, оброблюваність різанням тощо.

Ковкість – це здатність металу під мінімальними навантаженнями без руйнування пластично змінювати форму у холодному або гарячому стані. **Рідкоплинність** – це властивість металу в рідкому стані заповнювати форму і після охолодження зберігати цю форму у вигляді однорідного щільного відливка. **Зварність** – здатність металу до зварювання (ця характеристика більш докладно розглянута у наступній частині видання). **Загартовуваність** – властивість металу підлягати гартуванню.

Технологічні властивості мають важливе значення для видів обробки металів.

Розглянуті властивості металів потрібні для розуміння їх фізичної суті, але не можуть бути використані в конструюванні й експлуатації деталей, які працюють у складних і часто непередбачуваних умовах. Для більш конкретних характеристик матеріалів необхідно знати їх числові значення, які визначаються під час певних випробувань.

Контрольні запитання для самостійної підготовки

1. Які матеріали належать до металів?
2. Якими параметрами характеризуються кристалічні ґрати? Охарактеризуйте їх.
3. Які дефекти мають реальні матеріали і як вони впливають на їх властивості?
4. Опишіть послідовність кристалізації. Від чого залежить величина зерна у відливку?
5. Які дефекти утворюються в реальних матеріалах? У чому полягає їх вплив на властивості матеріалів?
6. Розкрийте сутність алотропічних перетворень.
7. Що називається сплавом? Які структурні і фазові складові можуть бути в сплавах?

8. Що зображується на діаграмах стану сплавів?
9. Які основні типи діаграм сплавів вам відомі?
10. Як залежать властивості сплавів від типу діаграм стану?
11. Які властивості матеріалів належать до фізичних, хімічних, механічних, технологічних? Назвіть їх і дайте стислу характеристику.
12. Які критерії міцності отримують під час статичних випробувань? Охарактеризуйте кожний із них.
13. Які критерії надійності і довговічності ви знаєте? За допомогою чого їх визначають?
13. Охарактеризуйте структуру і властивості литих металів.
14. Опишіть послідовність кристалізації. Від чого залежить величина зерна у відливку?
15. Охарактеризуйте структуру і властивості металів, оброблених тиском.
16. Що таке наклеп, повернення й рекристалізація?

1.5. СПЛАВИ ЗАЛІЗА З ВУГЛЕЦЕМ

В автомобільній промисловості в якості конструкційних матеріалів використовуються залізобуглецеві сплави. При цьому в загальному обсягу матеріалів, що використовуються в автомобілях, ці сплави досягають до 80%.

1.5.1. Будова і властивості заліза

Залізо – це метал сіруватого кольору, його щільність – $7,68 \text{ г/см}^3$, твердість $\cong 50 \text{ НВ}$ (500 МПа). Залізо (Fe) має температуру плавлення $1539 \text{ }^\circ\text{C}$ і температуру алотропічного перетворення $910 \text{ }^\circ\text{C}$ і $1392 \text{ }^\circ\text{C}$; за цих температур відбувається зміна кристалічних ґраток (рис. 1.17). При кімнатній температурі залізо має об'ємноцентровану кубічну кристалічну ґратку, таке залізо називають α -залізом (позначають також: $\alpha\text{-Fe}$ або Fe_α). У цьому випадку α означає кубічну об'ємноцентровану кристалічну ґратку. При нагріванні до $910 \text{ }^\circ\text{C}$ залізо не змінює своєї кристалічної ґратки. При температурі $768 \text{ }^\circ\text{C}$ (точці Кюрі) воно втрачає магнітні властивості і стає парамагнітним у межах температур $768 - 910 \text{ }^\circ\text{C}$. Це магнітне перетворення пов'язано із змінами на зовнішніх електронних оболонках атомів. За $910 \text{ }^\circ\text{C}$ відбувається перегрупування атомів заліза з кубічної об'ємноцентрованої на гранецентровану ґратку.

Залізо з гранецентрованою кристалічною ґраткою називають γ -

залізом (γ -Fe чи Fe_γ). При температурі 1392°C знову відбувається алотропічне перетворення: Fe_γ переходить у залізо з кристалічною ґраткою об'ємноцентрованого куба, яке називають δ -залізом (δ -Fe або Fe_δ). Воно зберігає свої властивості до температури плавлення заліза 1539°C . Температури, при яких у залізі та його сплавах відбуваються алотропічні перетворення, називають *критичними температурами*.

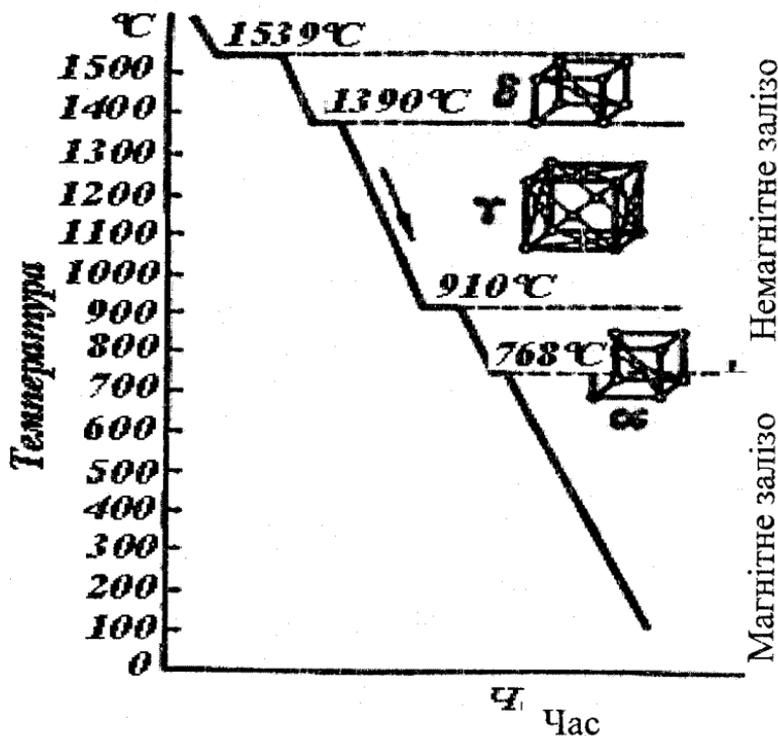


Рис. 1.17. Крива охолодження чистого заліза

Залізо здатне розчиняти вуглець: α -залізо може розчинити $0,006 - 0,02\%$ C, а γ -залізо – до $2,14\%$ C. Залізо з вуглецем утворює хімічну сполуку – карбід заліза Fe_3C , яку називають *цементитом* Fe_3C . Цементит містить $6,67\%$ вуглецю, його кристалічна ґратка ромбоєдрична зі щільною упаковкою атомів. Температура плавлення цементиту – приблизно 1250°C , його твердість становить $\cong 800$ НВ (8000 МПа).

1.5.2. Діаграма стану «залізо – цементит»

Діаграма стану “залізо – вуглець” мала б охоплювати всі сплави з вмістом вуглецю від 0 до 100%. Фактично досліджується тільки невелика частина системи – від заліза до найближчої сполуки Fe_3C , яка містить 6.67% вуглецю (рис. 1.18). Пояснюється це тим, що на практиці використовують сплави (сталі та чавуни), у яких вуглецю буває практично не більш як 5%. Сплави з більшим вмістом вуглецю є крихкими.



Рис. 1.18. Місце сплавів заліза, що використовуються на практиці, у загальній системі “залізо – вуглець”

На рис. 1.19 наведено спрощену діаграму стану «залізо – цементит», на якій не позначено перитектичні перетворення сплавів. Вертикальною (на осі ординат) відкладено температури нагріву заліза та сплавів заліза з вуглецем із різним складом. Максимальна кількість вуглецю, позначена на діаграмі, – 6,67% С – відповідає вмісту вуглецю в Fe_3C . Якщо виникають умови охолодження сплавів, коли Fe_3C розпадається на залізо і вуглець, діаграма матиме вигляд, зображений штриховими лініями.

Точки *A* і *D* вказують на температури плавлення заліза і цементиту.

Лінія *ACD* – лінія ліквідус – має таку назву тому, що вище від неї міститься рідина (*P*).

Нижче від лінії *AECF* – лінії солідус – міститься твердий сплав. Обидві лінії показують температури, за яких починається і закінчується процес кристалізації.

Ділянками діаграми *AESG* та *GPQ* позначено сплави, які являють собою тверді розчини вуглецю в залізі. Сплави першої і другої ділянок називають відповідно аустенітом та феритом.

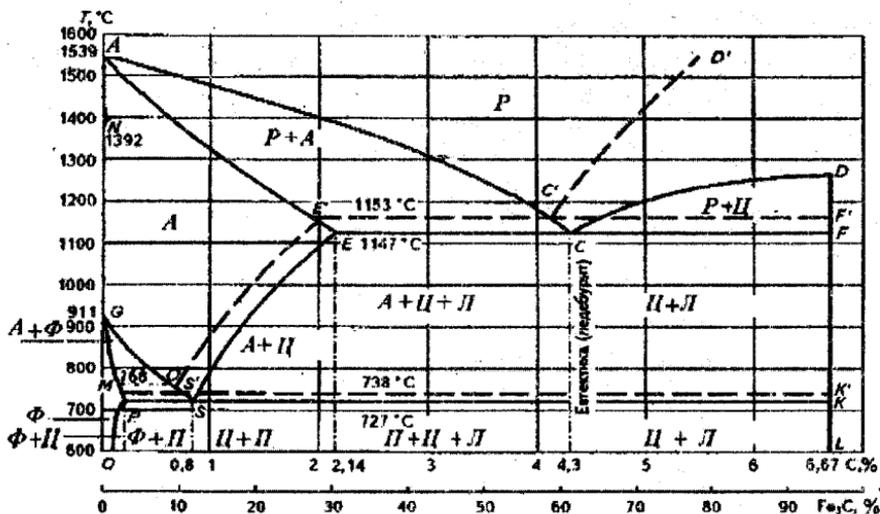


Рис. 1.19. Діаграма стану “залізо – цементит” (безперервні лінії) і “залізо – вуглець” (штрихові лінії):
P – рідина; *A* – аустеніт; *Ф* – ферит; *П* – перліт; *Ц* – цементит; *Л* – ледобурит

Аустеніт (*A*) – це твердий розчин вуглецю та інших домішок в γ -залізі. Максимальна розчинність вуглецю (2,14 %) досягається за температури 1147 °С. Якщо температура знижується згідно з кривою *SE*, в аустеніті поступово зменшується кількість вуглецю, а надлишковий вуглець (нижче від лінії *SE*) виділяється у вигляді цементиту. За температури 727 °С аустеніт може розчиняти не більш як 0,8 % С. Аустеніт – немагнітний, досить пластичний та м’який матеріал, твердість якого сягає <170 НВ (1700 МПа).

Ферит (*Ф*) – це твердий розчин вуглецю та інших домішок в α -залізі. Ферит – м’яка, пластична і, відносно, неміцна речовина з відносним видовженням $\delta \cong 30$ %, твердістю 50...80 НВ (500...800 МПа), межею міцності $\sigma_B \cong 290$ МПа. Ферит має магнітні властивості при температурі, нижчій від 768 °С. Максимальна розчинність вуглецю (0,02%) досягається при температурі 727°С, яка поступово знижується згідно з лінією *PQ* і за кімнатної температури становить 0,006 % С. Феритні зерна мають світлий колір (рис. 1.20, а).

Сплави, які містять не більш ніж 2,14 % вуглецю, називають *сталями*. Точка *S* – евтектоїдна точка. У цій точці (0,8 % С) внаслідок

оохолодження утворюється структура, яку називають перлітом.

Перліт (Π) – структура, яка складається з фериту і цементиту й містить 0,8 % С (рис. 1.20, б).

Зліва від точки S на діаграмі $Fe - Fe_3C$ розміщені доєвтектоїдні, а справа – заєвтектоїдні сталі, структури яких відрізняються. Утворення цих структур, згідно з діаграмою $Fe - Fe_3C$, відбувається так.

Доєвтектоїдні сталі за температур, вищих від GS , мають структуру аустеніту. У разі зменшення температури нижче за GS відбувається перетворення $A \rightarrow \Phi + A$, тобто в структурі з'являються зерна фериту, який містить дуже мало вуглецю. Завдяки такому процесу в аустеніті буде збільшуватися кількість вуглецю, яка за температури $727^\circ C$ становитиме 0,8 % С. Цей механізм характерний для всіх доєвтектоїдних сталей. За температур PS відбувається перетворення $A \rightarrow \Pi$, яке називається перлітним, а феритні зерна практично не змінюються. У результаті утворюється структура $\Phi + \Pi$ (рис. 1.20, а).

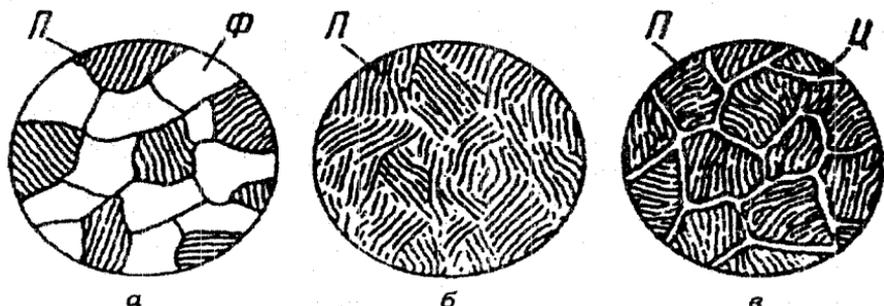


Рис. 1.20. Мікроструктури повільно охолоджених вуглецевих сталей:
а – доєвтектоїдної; б – евтектоїдної; в – заєвтектоїдної сталі

Заєвтектоїдні сталі при температурі, вищій від SE , мають структуру аустеніту. У разі охолодження нижче за SE розчинність вуглецю в аустеніті зменшується, завдяки чому на межах зерен виділяється цементит. Досягнувши лінії SK , всі сплави, які містять 0,8 – 2,14 % С, матимуть структуру $A + \text{Ц}$. При температурі $727^\circ C$ вміст вуглецю в аустеніті становитиме 0,8 % . На лінії SK відбувається процес перетворення $A \rightarrow \Pi$, у результаті утворюється структура $\Pi + \text{Ц}$ (рис. 1.20, в).

Сплави заліза з вуглецем, які містять 2,14 – 6,67 % С, називають чавунами. Зазвичай використовують чавуни, які містять не більше як 5

% вуглецю. Точка *C* на діаграмі стану $Fe - Fe_3C$ називається *евтектичною*, а структура сплаву – *евтектикою (ледебуритом)*.

Ледебурит (Л) – механічна суміш (евтектика) аустеніту і цементиту, яка утворюється за температури $1147\text{ }^\circ\text{C}$ з рідкого сплаву, має вміст вуглецю 4,3 %. При температурі, нижчій від $727\text{ }^\circ\text{C}$, ледебурит складається з перліту і цементиту (рис. 1.21, б). Твердість ледебуриту сягає $\cong \text{HB } 7$ (7000 МПа).

Доевтектичні чавуни (рис. 1.21, а) при кімнатній температурі мають структуру П + Л, а заевтектичні – Л + Ц (рис. 1.21, в). Чавуни з такими структурами називають *білими*, тому що на зламі мають білий колір. Їх не можна обробляти тиском, оскільки вони тверді і крихкі.

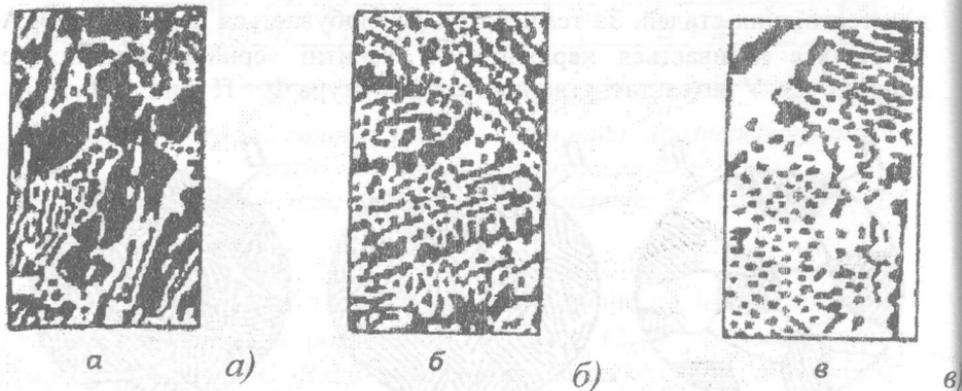


Рис. 1.21. Мікроструктури білих чавунів. темні ділянки структури великих і маленьких розмірів – перліт; світлі ділянки – цементит

Розглянута діаграма стану залізовуглецевих сплавів відображає перетворення, які відбуваються при досить повільному охолодженні, коли швидкість охолодження збільшується, структурні перетворення сплавів матимуть інший характер. Діаграма $Fe - Fe_3C$ змінюватиметься, коли до залізовуглецевих сплавів додають інші компоненти.

1.5.3. Вплив хімічних елементів на структуру і властивості сталей

Реальні сплави заліза з вуглецем містять хімічні елементи, які змінюють структуру сплавів, а отже і властивості.

Вплив вмісту вуглецю і постійних домішок на властивості вуглецевих сталей. На рис. 1.22. відображено залежність механічних

властивостей від умісту вуглецю у вуглецевих сталях. Збільшення вмісту вуглецю підвищує показники межі міцності, межі текучості, твердість сталі. Одночасно зменшуються відносне видовження і звуження, ударна в'язкість, межа витривалості і в'язкість руйнування K_{1C} .

У техніці застосовують переважно сталі, які містять, окрім основних компонентів - заліза й вуглецю, інші хімічні елементи. Їх можливо поділити на *постійні* домішки і такі, що спеціально додаються до сталей з метою покращити їх властивості. Їх називають *легуючими* компонентами.

Постійними називають домішки, які містяться в обмеженій кількості і з'являються в процесі виробництва з вихідних матеріалів (руди, мінералів, газів тощо). До них належать такі хімічні елементи: Mn, Si, P, S, O₂, N, H₂.

Манган (Mn) називають «корисною» домішкою. За хімічними властивостями і атомною будовою він схожий із залізом. Манган зміцнює феритну складову структури, а отже, й сталь, але знижує в'язкість. За допомогою Mn із заліза, при його виготовленні, краще відходять сірка та кисень. Звичайно, кількість Mn, як постійної домішки у вуглецевих сталях не перевищує 0,8 %.

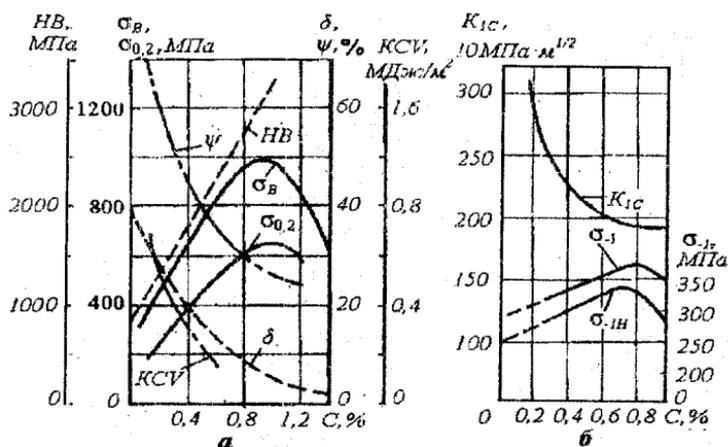


Рис. 1.22. Залежність від умісту вуглецю (C) в сталях: а – межі міцності (σ_B), межі текучості ($\sigma_{0,2}$), твердості (HV), відносного видовження (δ), відносного звуження (ψ), ударної в'язкості (KCV); б – межі витривалості (σ_{-1}) і в'язкості руйнування (K_{1C})

Кремній (Si) також являє собою «корисну» домішку. Кремній розчиняється у фериті, завдяки кремнію відчутно збільшуються межа текучості і твердість, але знижується пластичність сталі. Він являє собою добрий розкислювач. Уміст Si у вуглецевих сталях, як постійної домішки, не перевищує 0,4 %.

Сірка (S) – «шкідлива» домішка, в структурі сталі утворює хімічну сполуку FeS, яка із залізом може утворювати легкоплавку евтектику. За її наявності проявляється така властивість металу, як червоноламкість, яка характеризується тим, що при високих температурах кування, прокату в сталі з'являються тріщини та злами. Сірка знижує в'язкість, пластичність, межу витривалості, погіршує зварність і антикорозійну стійкість. Дозволяється вміст сірки у вуглецевих сталях не більш як 0,06 %.

Фосфор (P) частіше буває «шкідливою» домішкою. Завдяки цій домішці знижується в'язкість, особливо за низьких температур, збільшується межа текучості і міцності. Верхня межа вмісту фосфору у вуглецевих сталях – 0,08 %. Фосфор поліпшує ливарні властивості, а також здатність сталей до обробки різанням, а разом із міддю поліпшує антикорозійну стійкість.

Гази – водень, кисень і азот – шкідливі домішки, вони збільшують крихкість сталі. Але в деяких випадках азот спеціально додають у сталь для підвищення її стійкості проти корозії і поліпшення механічних властивостей.

Технологія виготовлення сталей впливає на їх якість. При деяких способах їх виготовлення вдається зменшити кількість шкідливих домішок і тим самим поліпшити якість.

Вплив легуючих компонентів на структуру і властивості сталей.

Легуючі компоненти надаються з метою покращення властивостей сталей. При високих температурах у процесі виготовлення сталей або термообробці легуючі компоненти взаємодіють із вуглецем, залізом і між собою. При взаємодії із залізом вони можуть утворювати тверді розчини, легований цементит або інші карбіди, інтерметалічні сполуки.

Всі елементи, які здатні розчинюватись у залізі, впливають на вигляд діаграми стану Fe – легуючий елемент, а також температурний інтервал існування алотропічних модифікацій, зміщуючи точки A_3 і A_4 (рис. 1.23). За впливом температури на ділянки існування алотропічних модифікацій легуючі елементи можна поділити на дві групи. До першої групи належать нікель (Ni), манган (Mn) і платина (Pt). Вони підвищують температуру A_4 і понижують температуру A_3 , (рис 1.23,а). В результаті на діаграмі стану «залізо – легуючий елемент»

відбувається розширення ділянки γ -фази і звуження ділянки існування α -фази. Коли вміст легуючого елемента, двох або трьох з них перевищуватиме a % (рис. 1.23,а), тоді сплави при кімнатній і до температури плавлення будуть являти собою твердий розчин легуючого елемента (легуючих елементів) в γ -залізі. В цих сплавах за нагрівання й при охолодженні не будуть відбуватися $\alpha \rightarrow \gamma$ і $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення. Такі сплави називаються *аустенітними*. А сплави, в яких ці перетворення відбуваються частково, називають *напіваустенітними*.

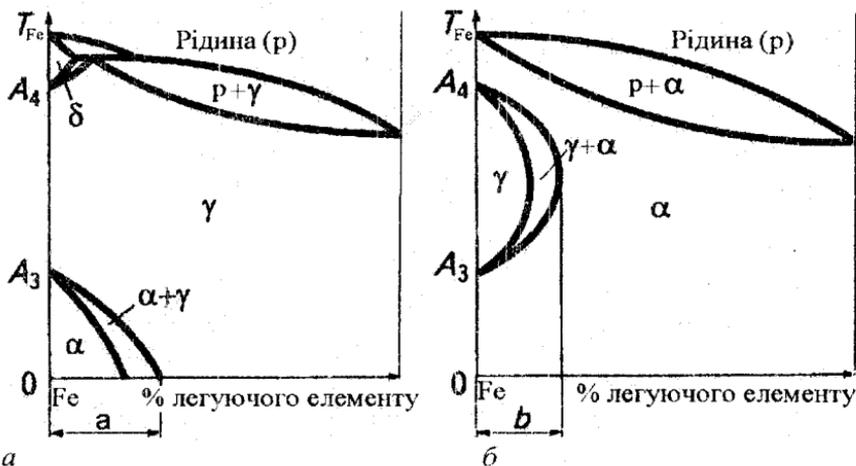


Рис. 1.23. Вплив легувальних елементів за діаграмою стану «Fe – легувальний елемент»

До другої групи належать Cr, V, Mo, W, Al, Si тощо. Вони знижують температуру A_4 і підвищують температуру A_3 . В результаті за кількості легувальних елементів, яка дорівнює b %, обидві криві з'єднуються, і ділянка γ -фази замикається (рис. 1.23, б). Коли вміст легувальних елементів перевищуватиме b % (рис. 1.23, б), тоді сплави при температурі від кімнатної до розплавлення будуть являти собою твердий розчин легуючого елемента (легуючих елементів) в α -залізі. Такі сплави називаються *феритними*. А сплави, в яких ці перетворення відбуваються частково, називають *напівферитними*.

В результаті розчинення у фериті хімічні елементи зміцнюють ферит і підвищують його твердість. Проте легуючі елементи (за винятком нікелю) знижують його пластичність й ударну в'язкість. Винятком є також Mn і Cr, які за вмісту до 1% підвищують ударну

в'язкість, а в разі подальшого підвищення їх вмісту ударна в'язкість знижується. Найбільше підвищують міцність Si, Mn, Ni, дещо менше – Mo, Cr, W.

Легуючі елементи зсувають точки S і E на діаграмі «залізо – вуглець» у бік зменшення вмісту вуглецю (рис. 1.19). Внаслідок цього перліт у структурі сталі, легованої цими елементами, буде містити вуглецю менше, ніж 0,8 %. Аналогічно зсув точки E ліворуч означає, що в процесі легування хімічними елементами ледебурит у структурі може утворюватись за концентрацій вуглецю менших, ніж 4,3 %. Він може з'явитися навіть у сталей, які містять вуглецю менше, ніж 2 %. У цьому випадку сталь повинна містити багато легуючих елементів і достатню кількість вуглецю, що сприятиме утворенню ледебуриту. Такі сталі називають *ледебуритними*. Наприклад, сталь, що містить 5% Cr і 1,5 % вуглецю, має ледебуритну структуру.

За відношенням до вуглецю легувальні елементи поділяють на карбідоутворювальні, некарбідоутворювальні (графітизувальні) і нейтральні.

До некарбідоутворювальних належать Si, Ni, Cu, Al. Вони здатні тією чи іншою мірою розчинюватись у залізі і сприяють розпаду цементиту з утворенням графіту. Нейтральним є Co.

Карбідоутворювальні хімічні елементи в сталях за наявності в них вуглецю здатні утворювати карбіди. За збільшенням ступеня спорідненості з вуглецем їх можна розмістити у ряд: Fe, Mn, Cr, Mo, W, Nb, V, Zr, Ti. Більш стійкими є карбіди, що утворюються останніми чотирма хімічними елементами цього ряду – NbC, VC, ZrC, TiC. Вони належать до фаз упровадження, містяться в сталі у вигляді окремих фаз і за нагрівання майже не розчиняються в аустеніті. Інші хімічні елементи цього ряду утворюють карбіди з більш складними кристалічними ґратками. Це карбіди типу M_3C , M_7C_2 , $M_{23}C_6$, M_6C або M_4C , де M – легуючий елемент. Ці карбіди є менш стійкими, вони здатні утворювати тверді розчини з декількома хімічними елементами, наприклад Fe_3C , $(Fe, Mn)_3C$, $(Fe, Cr)_3C$ тощо. В цій групі утворення складних карбідів відбувається внаслідок заміщення атомів заліза на атоми інших хімічних елементів у ґратці карбіду заліза Fe_3C . Манган може замінити у ґратці карбіду заліза всі атоми заліза, хром – до 25 ат. %, Мо – до 3 ат. %, W – до 1 ат. %. Менш стійкі карбіди порівняно легко розчинюються в аустеніті при нагріванні. Карбідні фази мають високі твердість і температуру плавлення. Їх кількість, подрібненість, характер розміщення й характеристики суттєво впливають на механічні властивості легованої сталі.

При високому вмісті легувальні елементи утворюють із залізом або один з одним інтерметалічні з'єднання, наприклад Fe_7Mo_6 , Fe_3Ti , $FeCr$ тощо. Вони характеризуються значними твердістю і крихкістю. У великій кількості вони можуть бути шкідливими фазами, але за незначного вмісту й у вигляді дрібних частинок здатні зміцнювати сталі.

Контрольні запитання для самостійної підготовки

1. Що являє собою діаграма стану «залізо – цементит»? Які закономірності відображають лінії цієї діаграми (ACD і AECF, GSK, SE, PQ)?
2. Які сплави діаграми стану $Fe - Fe_3C$ належать до сталей, а які – до чавунів? Які структурні і фазові складові мають сталі, які – чавуни?
3. Що являють собою ферит, аустеніт, перліт, цементит і ледебурит? Яку структуру і які властивості вони мають?
4. Як впливає вміст вуглецю і постійних домішок на властивості вуглецевих сталей?
5. Які хімічні елементи сприяють утворенню аустенітних, а які – феритних сталей?
6. Які хімічні елементи називають карбїдоутворювальними?

1.6. ОСНОВИ ТЕРМІЧНОЇ І ХІМІКО-ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ СТАЛЕЙ

1.6.1. Теорія термічної обробки сталей

Термічною обробкою називається процес нагрівання, витримки і охолодження заготовок чи деталей з метою надання їм певних механічних, фізичних, хімічних і технологічних властивостей. За допомогою термічної обробки значно покращують властивості деталей, такі, як міцність (в 1,5...5 разів), зносостійкість, магнітні властивості тощо.

У процесі термічної обробки сталей відбуваються алогропічні перетворення, дифузійні і хімічні процеси, розчинюються один в одному компоненти.

Нагрівання й витримка сталей. У більшості випадків сталі нагрівають до температур, вищих від лінії GSK (рис. 1.19), при яких формується структура аустеніту. При цьому потрібно регулювати

швидкість підвищення температури, щоб не було короблення деталей і не з'являлися тріщини.

Витримка при зазначеній температурі триває до повного й рівномірного прогрівання виробу. Вуглецеві сталі прогріваються швидше, леговані – повільніше (у два-три рази).

За перевищення визначеної температури нагрівання виникають такі недоліки, як зростання розмірів зерен, перегрів і перепал.

Зростання розмірів зерен – явище негативне, оскільки сталі з великим розміром зерен мають меншу міцність, крихкі.

Обмежують ріст зерен дрібні частинки карбідів, нітридів, боридів, які утворюються в структурі сталей, що містять такі хімічні елементи, як Al, Ti, Cr, V, Zr, W, Mo тощо. У зв'язку з цим більшість легованих сталей мають *природно дрібну структуру*.

Можна також подрібнювати зерна аустеніту завдяки деформації нагрітої сталі, яка практично може становити від 20 до 95%.

Перегрів супроводжується швидким ростом зерен, при цьому утворюється так звана відманштетова структура, яка є крихкою. Цей недолік виправляють подальшим відпалюванням чи нормалізацією. Сильніший перегрів (до температури, близької до температури плавлення) призводить до *перепалу* сталі, коли на межах великих зерен з'являються оксиди заліза. Сталь стає крихкішою. Цей недолік сталі не виправляється.

Витримка при певній температурі залежить від розміру і хімічного складу деталі. Чим більший розмір деталі, більше вуглецю та хімічних компонентів у сталі, тим більшою є витримка для рівномірного прогрівання сталі по всьому перерізу.

При повільному *охолодженні* в сталі встигають відбуватися всі алотропічні перетворення, дифузійні процеси і хімічні реакції. Структура сталі стає рівноважною й, залежно від умісту вуглецю, феритною, феритно-перлітною, перлітною або перлітно-цементитною (рис. 1.19 і 1.20).

Утворення структур при інших швидкостях охолодження різних сталей пояснюються діаграмами ізотермічного охолодження аустеніту.

Більш детально розглянемо діаграму ізотермічного охолодження сталі У8 (рис. 1.24). На діаграмі показано структури, утворені за ізотермічної витримки (витримки при постійній температурі) зразків у межах зазначених температур. Діаграму будували таким чином: спочатку зразки нагрівали до температури 770 °С, а потім кожен із них швидко охолоджували до однієї з температур, нижчих від A_1 : 700, 650,

600, 550, 500°C тощо. Зразки витримували за вказаних температур і фіксували точки початку й закінчення розпаду аустеніту. Ці точки початку і закінчення перетворення аустеніту для вказаних температур було позначено на графіку, де на осі абсцис відкладали час, а на осі ординат – температуру. В результаті була отримана діаграма ізотермічного охолодження аустеніту. Ліва крива характеризує початок перетворення аустеніту, крива справа – закінчення цього процесу.

Діаграму ізотермічного перетворення поділяють на три температурні зони: 1 – зону перлітного перетворення в межах температур 550...727°C; 2 – зону бейнітного (проміжного) перетворення в межах температур від M_H до 550 °C; 3 – зону мартенситного перетворення, яка міститься нижче за M_H .

У зоні *перлітного перетворення* аустеніту з'являються структури, які складаються з цементиту і фериту, які відрізняються між собою лише розміром зерен. Більші зерна отримують за вищих температур ізотермічних перетворень – таку структуру називають *перлітом*. Структури з меншим розміром зерен називають *сорбітом*, а ще з меншим – *трооститом*.

У зоні *бейнітного перетворення* отримують структури бейніта. *Бейніт* являє собою слабко пересичений твердий розчин вуглецю в α -залізі з домішками дрібних зерен карбїду заліза Fe_3C . Ця зона називається проміжною. Перетворення аустеніту в ній утруднено через те, що при цих температурах зменшується дифузія атомів вуглецю і заліза. Порівняно з перлітом бейніт має більшу твердість та меншу в'язкість.

Мартенситне перетворення. При швидкому охолодженні нижче за температуру початку мартенситного перетворення M_H утворюється структура *мартенсит*. При зниженні температури до M_K кількість мартенситу збільшується.

Структура мартенситу складається з двох фаз – остаточного аустеніту (білого кольору) і фази мартенситу (темного кольору) (рис. 1.25).



Рис. 1.24. Діаграма ізотермічного розпаду аустеніту вуглецевої сталі У8:

П – перліт; С – сорбіт; Т – троостит; Б – бейніт; М – мартенсит;
 А – аустеніт; Ц – цементит.

Фаза мартенситу – це пересичений твердий розчин вуглецю в α -залізі. Утворення цієї фази відбувається з великою швидкістю – вибухово і лише за умови, коли за швидкого охолодження аустеніту дифузійні процеси стають неможливими. Мартенситне перетворення відрізняється від перлітного і бейнітного (проміжного) тим, що має бездифузійний характер. Воно відбувається внаслідок зсуву й не супроводжується зміною складу твердого розчину. При цьому окремі атоми зсуваються один відносно одного на відстань, яка не перевищує міжатомної, зберігаючи взаємне сусідство. Фаза мартенситу порівняно з фазами аустеніту і фериту має більший питомий об'єм, який являє собою одну з причин виникнення під час гартування значного напруження, що й спричинює деформацію виробу або появу тріщин.

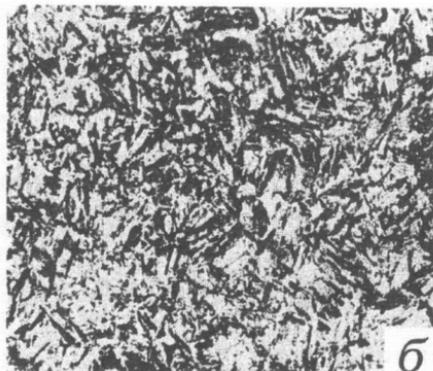
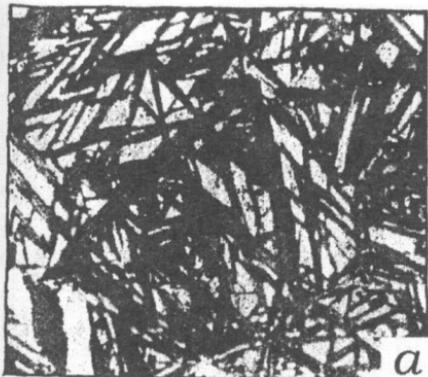


Рис. 1.25. Мікроструктура мартенситу високовуглецевої сталі (а) (X 500) і сталі з 0,45 % вуглецю й 0,7 % мanganу (б) (X 600)

Кристалічна решітка фази мартенситу схожа на решітку фериту і відрізняється тим, що являє собою трохи витягнутий куб – тетрагон, в якому, крім атомів заліза, містяться атоми вуглецю, які є причиною того, що кубічна комірка витягується в одному напрямку.

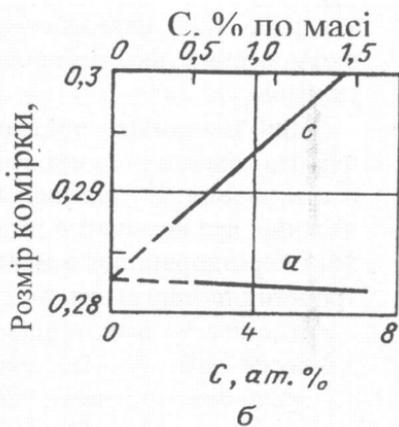
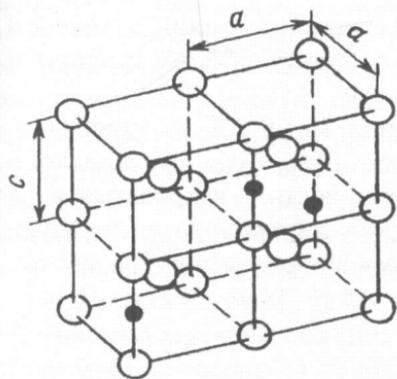


Рис. 1.26. Кристалічна структура мартенситу:

а – кристалічна ґратка; б – періоди ґратки залежно від вмісту вуглецю

За збільшення вмісту вуглецю в кристалі параметр ґратки “с” збільшується, а розмір “а” – зменшується (рис. 1.26). Відношення $c/a = 1 + 0,046 C$, де C – концентрація вуглецю в сталі, % мас. Збільшення відношення c/a зумовлює збільшення твердості і крихкості загартованої сталі. Наприклад, загартовані сталі, які містять 0,4 та 1,0 % вуглецю, мають твердість відповідно 56 HRC і 65...66 HRC. Твердість високовуглецевого мартенситу в шість разів вища за твердість фериту, але нижча, ніж твердість цементиту. Сталь із структурою «мартенсит» має більший об’єм порівняно із незагартованою сталлю.

Збільшення об’єму загартованої сталі залежить від умісту вуглецю в мартенситі таким чином:

Вміст вуглецю, %	0,4	0,6	0,7
		0,83	1,2
Збільшення об’єму, %.....	0,4	0,46	0,85
		1,13	0,9

Мартенсит – крихка речовина, при нагріванні його структура змінюється. При цьому змінюються і його властивості.

Перетворення аустеніту за безперервного охолодження. У реальних режимах охолодження перетворення аустеніту відбувається в певному інтервалі температур, але різниця між структурами, отриманими при ізотермічному та безперервному охолодженні, мала. На рис. 1.27 наведено криві, які відображають вплив швидкості охолодження на температуру розпаду аустеніту і його структурні складові.

При невеликій швидкості охолодження V_1 , V_2 , й V_3 утворюють перліт, сорбіт та троостит відповідно. При більшій швидкості охолодження V_4 частина аустеніту перетворюється в троостит, а та частина, яка не встигла розпастися, переохолоджується до температури M_n і перетворюється в мартенсит. У такому випадку структура містить троостит та мартенсит.

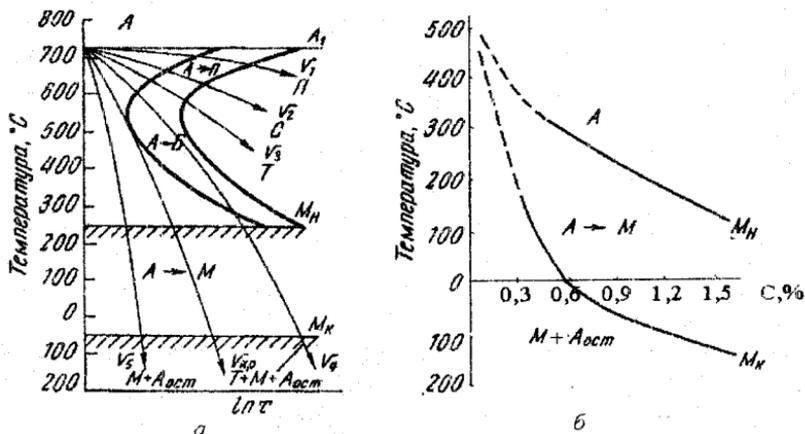


Рис. 1.27. а, б - Діаграма ізотермічного розпаду аустеніту і структури, які отримуються за різних швидкостей безперервного охолодження сталі У8 (а) і температури мартенситних точок M_H і M_K залежно від кількості вуглецю у вуглецевих сталях (б).

При швидкості охолодження, більшої від $V_{кр}$, аустеніт переохолоджується до температури M_H і переходить у мартенсит. $V_{кр}$ називається критичною швидкістю охолодження. Вона являє собою мінімальну швидкість охолодження, при якій утворюється мартенсит.

У точці M_H починається і в точці M_K (рис. 1.27.) закінчується мартенситне перетворення. Необхідно відмітити, що не у всіх сталей точка M_K міститься вище кімнатної температури (рис. 1.27.б). Тому у багатьох із них при швидкому охолодженні в нормальних умовах охолодження мартенситне перетворення до кінця не відбувається. Щоб мартенситне перетворення для цих сталей розвивалося далі, необхідно безперервно охолоджувати сталь до температури, нижчої за кімнатну. Чим нижчою буде температура охолодження, тим більше утворюється мартенситу і, відповідно, зменшується кількість аустеніту. Після досягнення температури M_K перетворення аустеніту зупиняється.

Положення точок M_H та M_K не залежить від швидкості охолодження і обумовлено хімічним складом сталі. Чим більше в сталі вуглецю, тим нижче буде температура точок M_H та M_K (рис. 1.27. б). Всі легуючі елементи, які розчиняються в аустеніті, за винятком кобальту і алюмінію, знижують точки M_H і M_K . Не весь аустеніт перетворюється в мартенсит. Виходячи з рис. 1.27.б, можна зробити висновок, що чим більше в сталі вуглецю і легуючих елементів, тим більше аустеніту залишається в структурі. Наприклад, у вуглецевих сталях, що містять

0,6...1,0% вуглецю, кількість залишкового аустеніту не перевищує 10%, а у сталей, що містять 1,3...1,5% вуглецю, вона сягає 30...50%.

Критична швидкість охолодження $V_{\text{кр}}$ для кожної сталі різна. Вони залежать від стійкості аустеніту. $V_{\text{кр}}$ кожної сталі залежить від кількості вуглецю, легованих домішок і розміру зерен. Коли їх кількість збільшується, а розміри зерен зменшуються, критична швидкість охолодження є меншою. Тому під час гартування вуглецеві сталі потребують більшої швидкості охолодження, а леговані – меншої. Легувальні елементи впливають на вид діаграми ізотермічного перетворення аустеніту (рис. 1.28).

Елементи Mn, Ni, Cu уповільнюють перетворення аустеніту і підвищують стійкість переохолодженого аустеніту. В результаті на діаграмах ізотермічного перетворення зміщують лінію початку розпаду аустеніту праворуч (рис. 1.28, а). Карбідоутворювальні елементи також зміщують лінію початку розпаду праворуч. Крім того, вони змінюють їх вигляд – спостерігаються два мінімуми стійкості переохолодженого аустеніту (рис. 1.28, б). Легуючі елементи також впливають на положення точок початку (M_n) і закінчення мартенситного перетворення. Такі хімічні елементи, як Al, Co, підвищують, а Cu, Ni, Cr, Mo, Mn знижують температуру цього перетворення.

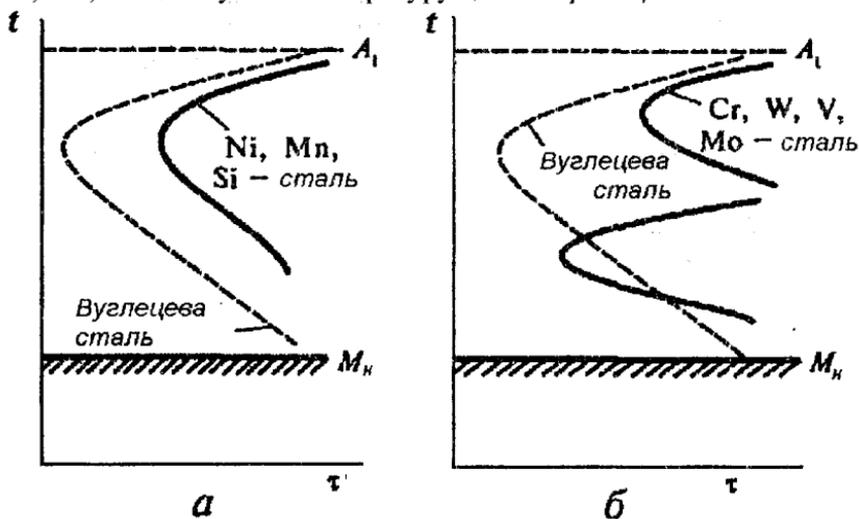


Рис. 1.28. Схеми діаграм ізотермічного перетворення аустеніту:
 а – вуглецеві сталі і сталі, що були леговані некарбідоутворювальними елементами;
 б – сталі, що були леговані карбідоутворювальними елементами

Перетворення мартенситу й остаточного аустеніту за нагрівання (відпускання) сталі. Нагрівання загартованої сталі до температур, нижчих від A_1 (PSK), називається *відпусканням (відпуском)*. За нагрівання структура мартенситу, яка складається з мартенситної фази і фази остаточного аустеніту, розпадається. Процес розпаду стає помітним за температур, вищих від 80 °С. У вуглецевих сталях спочатку розпадається фаза мартенситу, а починаючи з 250 °С – фаза остаточного аустеніту.

Процес розпаду відбувається поступово, починається він із того, що із зерен цих фаз частина атомів вуглецю дифундує до меж зерен. Там при нагріванні до температури 350°С вони з'єднуються з атомами заліза і утворюють дрібні кристали карбідів заліза. Утворена структура називається *мартенситом відпуску*. Вона складається з мартенситної фази, дрібних кристалів карбиду заліза й остаточного аустеніту.

При температурі 350...400 °С відбувається виділення атомів вуглецю з кристалічних ґраток мартенситу і аустеніту. Завдяки цьому вони повністю перетворюються на ферит, тим часом як атоми вуглецю з'єднуються з атомами заліза й утворюють дрібні зерна цементиту. Структура, яка являє собою суміш дрібних зерен цементиту і фериту, називається *трооститом відпуску*. При 500...600 °С карбіди заліза ще зростають, і структура перетворюється в більш грубу феритно-цементитну суміш – *сорбіт відпуску*, який при підвищенні температури перетворюється в *перліт відпуску*. Діаметр частинок цементиту в трооститі становить приблизно $0,3 \cdot 10^{-5}$ мм, у сорбіті – $10 \cdot 10^{-5}$ мм, в перліті доходить до $30 \cdot 10^{-5}$ мм. Леговані сталі, які містять V, Mo, W, Cr та інші елементи, мають дрібніші зерна цементиту.

Зміна структури внаслідок нагрівання загартованої сталі призводить до зміни властивостей. При температурі, нижчій за 200 °С, мартенсит відпуску майже не змінює твердості, але крихкість сталі значно зменшується. При підвищенні температури відпуску зменшується твердість і збільшується в'язкість сталей. Ефект покращення механічних властивостей від застосування термічної обробки легованих сталей є значно вищим, ніж вуглецевих.

1.6.2. Види термічної обробки

На практиці застосовують такі основні види термічної обробки: відпалювання, нормалізація, гартування і відпуск, старіння, а також термомеханічна обробка.

1.6.2.1. Відпалювання і нормалізація

Відпалюванням називають операцію термічної обробки сталі, коли шляхом нагрівання, витримки за визначеної температури і подальшого повільного охолодження отримують стійку (врівноважену) структуру сталі.

За допомогою відпалювання змінюють форму й розмір зерен структури, усувають неоднорідність хімічного складу, зменшують напруження і твердість, знімають наклеп та перегрів, сталь стає м'якою. Існують різні види відпалювання, які характеризуються режимами нагрівання і охолодження.

Повне відпалювання – це нагрівання доєвтектоїдної сталі на 30...50°C вище від лінії GS (рис. 1.29), витримка й повільне охолодження (разом із піччю).

За допомогою цього відпалювання сталь стає м'якою та в'язкою, усувається неоднорідність структури, а зерна стають відносно маленькими. Повне відпалювання застосовують для обробки сортового прокату із сталі, поковок і фасонних відливок.

Неповне відпалювання застосовується для всіх сталей. Воно складається із нагрівання сталі на 30...50°C вище від лінії A_{с1} (PSK) (рис.1.29), витримки і повільного охолодження (разом із піччю). Цей процес більш економічно вигідний (завдяки нижчій температурі). Він дає можливість знизити твердість і напруження сталей, поліпшити їх оброблюваність.

Ізотермічне відпалювання (рис. 1.29) звичайно застосовують для легуваних сталей. Воно складається з нагрівання на 30...50°C вище від лінії GSK, витримки і досить швидкого охолодження до температури 630...700°C. При цій температурі сталь витримують до повного перетворення аустеніту у ферит та цементит. Далі сталь охолоджують на повітрі. Після ізотермічного відпалювання сталь має ті самі механічні властивості, що і після повного відпалювання, але процес термічної обробки відбувається у два рази швидше.

Дифузійне відпалювання (гомогенізація) (рис. 1.29) виконують шляхом нагрівання сталі до 1050...1150 °C, тривалої витримки (10...15 годин) і охолодження на повітрі. При високій температурі дифузійні процеси значно прискорюються, завдяки чому вирівнюється хімічний склад сталі по всьому перерізу заготовок, навіть у таких, як великі металургійні зливки.

При дифузійному відпалюванні отримують крупнозернисту структуру, яку можливо виправити подальшим відпалюванням чи гарячою обробкою тиском.

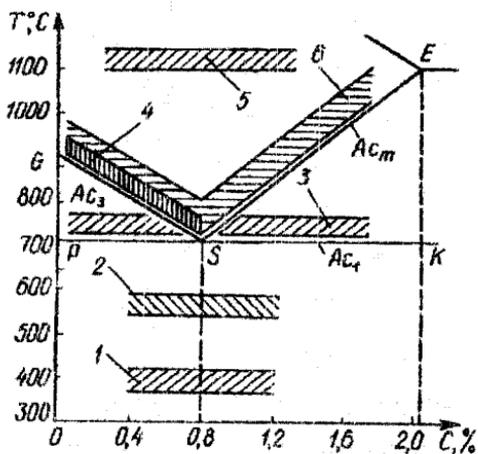


Рис. 1.29. Температури нагрівання сталі за різних видів термічної обробки: 1 – відпалювання для зменшення напружень; 2 – рекристалізаційне відпалювання; 3 – неповне відпалювання; 4 – повне відпалювання; 5 – дифузійне відпалювання; 6 – нормалізація

Рекристалізаційне відпалювання (рис. 1.29) застосовують для зменшення крихкості і твердості наклепаної сталі й виконують при температурі 600...700 °С. Після витримування виробу за цієї температури в печі його охолоджують. Унаслідок такої обробки підвищується пластичність і в'язкість сталі.

Відпалювання для зменшення напружень (рис. 1.29) застосовують для виробів, отриманих зварюванням або після термічної обробки внаслідок нерівномірного нагрівання й охолодження. Температура такого відпалювання не повинна перевищувати A_{c1} (PSK).

Відпалювання на зернистий цементит. Цей вид відпалювання застосовують із метою зміни будови цементиту (замість пластинчастого отримують цементит зернистої форми). Таке відпалювання застосовують переважно до інструментальних заєвтектоїдних сталей, після чого зменшується твердість сталі і покращується її обробка різанням. Відпалювання здійснюють у такому режимі: сталь нагрівають до температури, на 20...50 °С вище за

критичну точку A_3 лінії SK, витримують за цієї температури протягом 4...10 годин і потім охолоджують разом з піччю до температури 600...650 °С. Подальше охолодження до кімнатної температури можливо здійснювати на повітрі.

Нормалізація сталі (рис. 1.29) – це нагрівання виробу вище від лінії GSE на 50...70 °С, витримка з метою його прогрівання і подальше охолодження на повітрі.

Для вуглецевих сталей нормалізацію застосовують замість відпалювання, тому що процес потребує менше часу для його виконання. При цьому досягаються такі властивості: сталь стає в'язкою і пластичною, а структура перетворюється на дрібнозернисту. Але застосування нормалізації для легованих сталей може призвести до інших наслідків, а саме, до збільшення твердості та значного зменшення в'язкості. Це залежить від кількості вуглецю й легуючих елементів у сталі. Деякі високолеговані сталі в процесі нормалізації можуть навіть загартуватись, тому для багатьох легованих сталей застосовують відпалювання, а не нормалізацію.

У більшості випадків нормалізацію застосовують для отримання дрібнозернистої структури у відливках і поковках, усунення наклепу, підготовки структури сталі перед гартуванням. Для деяких виробів нормалізація є кінцевою операцією термічної обробки.

1.6.2.2. Гартування і відпускання сталей

Відомі такі способи гартування: безперервне, перервне, ступеневе й ізотермічне. Тільки за ізотермічного способу гартування остаточну структуру сталі і потрібні властивості виробу отримують без відпуску. Коли застосовують інші способи гартування, технологічний процес отримання певних властивостей виробів складається з двох етапів: спочатку виконують гартування, за якого сталь стає твердою і дуже напруженою. Після гартування для усунення напруження, а також для отримання певних властивостей обов'язково виконують відпуск. Якщо відпуск не проводити, у виробах з'являються тріщини та інші дефекти.

Безперервне гартування (рис. 1.31) – це нагрівання сталей вище від лінії GSK на 30...50 °С, витримка і охолодження зі швидкістю, вищою від критичної.

Цей вид гартування застосовується для деталей нескладної форми з невеликим відношенням довжини до діаметра виробу.

Охолоджують сталі за безперервного гартування у воді, маслі, розчинах солей. Недоліком цього способу є небезпека появи тріщин і короблень під час охолодження виробів. Для уникнення згаданих вад застосовують інші способи гартування.

Інтервал температур нагрівання сталей для гартування наведено на рис. 1.30.

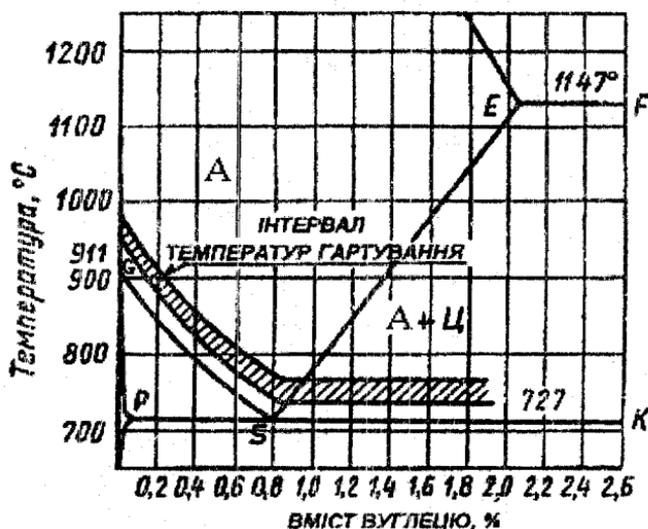


Рис. 1.30. Інтервал температур для гартування сталей

За *перервного гартування* охолодження здійснюють у двох середовищах: при температурі 300...400 °C у воді, а потім у масилі (рис. 1.31). Цим досягається зменшення напружень у сталі в момент переходу аустеніту в мартенсит.

За *ступінчастого гартування* (рис. 1.31) нагріті до температур гартування вироби охолоджуються в розплавлених солях і лугах, які мають температуру, трохи вищу від температури початку мартенситного перетворення M_n (250...350 °C). У цьому середовищі виріб витримують декілька хвилин (до початку розпаду аустеніту на ферит та цементит) і потім охолоджують на повітрі, тоді відбувається перетворення аустеніту в мартенсит.

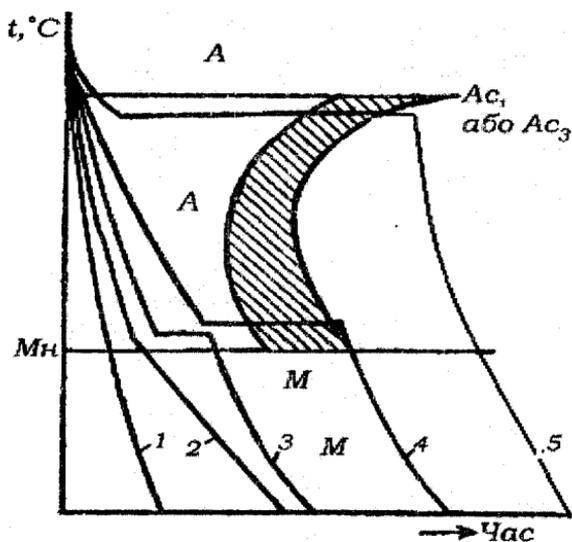


Рис. 1.31. Схематичне зображення способів гартування та способу ізотермічного відпалювання: 1 – безперервне гартування; 2 – перервне гартування; 3 – ступінчасте гартування; 4 – ізотермічне гартування; 5 – ізотермічне відпалювання

Гартування з обробкою холодом. У структурі сталей після безперервного, перервного і ступінчастого гартування містяться фази залишкового аустеніту й мартенситу (рис. 1.25). Від співвідношення кількості цих фаз залежить твердість загартованої сталі – чим більше мартенситної фази, тим більшими будуть твердість та зносостійкість. Крім того, з часом залишковий аустеніт може приводити до зміни розмірів деталі в результаті часткового перетворення його у мартенситну фазу.

З метою зменшення у загартованій сталі кількості залишкового аустеніту застосовують обробку холодом, яка полягає в її охолодженні до температур, нижчих за кімнатну, а саме, до $-30 \dots -70$ °С. Для більшості сталей це призводить до подальшого перетворення залишкового аустеніту у мартенсит, що підвищує твердість сталі на 1...3 одиниці HRC, зносостійкість і стабільність розмірів деталей. Якщо сталь після гартування витримувати більше ніж 3 години, залишковий аустеніт частково стабілізується й ефект обробки холодом знижується. Тому обробку холодом виконують відразу після гартування сталі. Після обробки холодом звичайно виконують відпуск.

Обробку холодом застосовують для підвищення зносостійкості і зберігання розмірів деталей, таких, як підшипники кочення, штампи, вимірювальний інструмент, пружини, деталі з цементованих сталей тощо.

Процес *ізотермічного гартування* такої самий, як і ступінчастого, з тією лише різницею, що виріб довше витримується в охолодженому середовищі (30...60 хвилин і довше) доти, доки не скінчиться розпад аустеніту (рис. 1.31). При цьому утворюється структура нижнього бейніту. Далі виріб охолоджують на повітрі. Спосіб застосовують для термічної обробки конструкційних легуваних сталей, які містять 0,3...0,5% вуглецю.

Щодо вуглецевих сталей, то ізотермічне гартування не сприяє суттєвому підвищенню механічних властивостей порівняно зі звичайним гартуванням і відпуском. Після ізотермічного гартування вироби не потребують операції відпускання. У разі застосування інших способів гартування обов'язково і відразу виконують відпускання сталі.

Відпусканням (відпуском) називають такий вид термічної обробки, коли *загартовану сталь* нагрівають до температур, нижчих від критичної температури (727 °С), та після витримки (не менш ніж 2 години) повільно або швидко охолоджують.

Розрізняють три види відпуску: низький, середній і високий.

Низький відпуск проводять при температурі 120...270 °С з метою зменшення напружень у загартованому виробі, майже не знижуючи його твердості. При цьому утворюється структура відпущеного мартенситу, що характеризується твердістю 56..66 *HRC*. Низьке відпускання застосовують у виготовленні інструментів, шарикопідшипників, виробів після цементації тощо.

Середній відпуск здійснюють при температурі 350...500 °С залежно від марки сталі. Застосовують його для виробів (пружини, ресори, ножі, сокири), яким необхідна достатньо висока твердість (40-50 *HRC*), висока межа пружності і незначна в'язкість ($\delta = 2...6$ %). Після середнього відпускання структура сталі складається з трооститу.

Високий відпуск виконують при температурі 500...680 °С, після чого сталь має структуру сорбіту і набуває підвищеної в'язкості. В'язкість, характерна для сорбіту, дуже важлива для деталей (вали, осі, шестерні, високоміцні болти та інші деталі), що зазнають динамічного навантаження. Процес, який складається з гартування і подальшого високого відпускання, називають *політшенням*.

1.6.3. Загартовуваність і прогартовуваність сталі

Загартовуваність сталі відображає її здатність ставати більш твердою в процесі гартування, тобто здатність загартовуватись, яка залежить переважно від кількості вуглецю в сталі. Добру загартовуваність мають сталі, які містять більш ніж 0,3 % С.

Прогартуваність сталі характеризується глибиною гартування поверхневого шару. Вуглецеві сталі мають незначну прогартуваність (~ 10 мм після гартування у воді й 4...8 мм – у мастилі).

Прогартуваність легованих сталей більша, ніж вуглецевих, і залежить від маси деталі, кількості хімічних елементів та індивідуального впливу кожного з них. Отже, коли сталь містить хром, її прогартуваність становить 20 мм, хром і ванадій – 20 мм, марганець – 30 мм, хром, марганець і кремній – 30...40 мм, бор – 40 мм, нікель – 60 мм, хром і нікель – 80 мм, молібден або вольфрам – більш ніж 100 мм.

З наведених даних можна дійти висновку, що з вуглецевих сталей не слід виготовляти масивних деталей, які повинні мати високі механічні властивості по всьому об'єму. Такі вироби, зазвичай, виготовляють із легованих сталей, які мають значно більшу прогартуваність.

1.6.4. Поверхнєве гартування

Поверхневим називається гартування, при якому воно відбувається лише на деяку (задану глибину), в той час як серцевина виробу залишається незагартованою. При цьому поверхневий шар набуває мартенситної структури і стає твердим, а серцевина залишає властивості, якими володіла до поверхневого гартування. Вона повинна бути в'язкою, міцною й здатною сприймати ударні навантаження. Для набуття серцевиною таких характеристик перед поверхневим гартуванням деталь термічно обробляють, застосовуючи об'ємне гартування і високий відпуск (поліпшення), або для надання більш високої твердості й міцності – гартування і середній відпуск. У першому випадку деталь може надійно працювати в дуже важких умовах навантаження, витримуючи навіть ударні навантаження, а в другому випадку деталь стає більш міцною, але ударні навантаження вона може не витримати через те, що її в'язкість стає меншою.

Основне призначення поверхневого гартування: підвищення твердості, зносостійкості і межі витривалості деталей.

Поліпшення зносостійкості відбувається за рахунок збільшення твердості поверхневого шару, а набуття гарної витривалості – за рахунок утворення в цьому шарі остаточних напружень стискання. Причиною виникнення цих напружень є те, що структура мартенситу, що утворюється в поверхневому шарі в процесі поверхневого гартування набуває більшого об'єму, ніж феритно-цементитна структура, яка була до гартування.

При знакозмінних навантаженнях, які відбуваються на поверхні таких деталей, як осі, вали, шестерні, тріщини втомлюваності, як правило, виникають під впливом напружень розтягання. При утворенні на поверхні деталей остаточних напружень стискання останні зменшують напруження розтягання, що виникають від зовнішнього навантаження і тому підвищують межу витривалості.

Застосовують декілька способів поверхневого гартування, з яких на практиці широко використовують гартування з індукційним нагріванням струмом високої частоти (СВЧ), а останнім часом застосовують також гартування при нагріванні лазером.

Поверхнєве гартування з індукційним нагріванням СВЧ набуло найбільшого поширення завдяки перевагам, які характеризують цей спосіб, а саме: спосіб дуже продуктивний і забезпечує високу якість: деталі менше деформуються і майже не окислюються. Крім того, у деталей значно підвищується межа витривалості, довговічність (у 2...5 разів) і опір фретінг корозії (у 2...5 разів). Спосіб не рекомендовано застосовувати при виготовленні однієї деталі або невеликої партії у зв'язку з необхідністю в цьому випадку готувати спеціальну оснастку.

Нагрівання за цим способом здійснюється за рахунок теплової дії струму, що індуктується в деталь, яку поміщають у змінне електромагнітне поле.

Для нагрівання деталь *1* поміщають в індуктор *2*, який являє собою один або кілька витків мідної трубки або шини, через яку протікає вода для його охолодження (рис. 1.32.). При проходженні по індуктору струму високої частоти утворюється змінне магнітне поле, силові лінії *3* якого пронизують деталь *1*. В результаті в поверхневому шарі деталі виникають вихрові струми (струми Фуко), які викликають нагрівання поверхневого шару до високих температур.

Тривалість нагрівання СВЧ досить мала (декілька секунд). Після нагрівання до необхідної температури струм вимикають, а нагрітий виріб інтенсивно охолоджують струменем води. Після поверхневого гартування виконується низький відпуск, який зберігає високу твердість загартованого поверхневого шару. СВЧ гартування

переважно застосовують для валів, колінчастих валів, мало - і середньонавантажених зубчастих коліс, осей, шестірень та багатьох інших деталей машин. При цьому використовують сталі, які містять вуглець 0,3...0,7%, і в меншій мірі – чавуни.

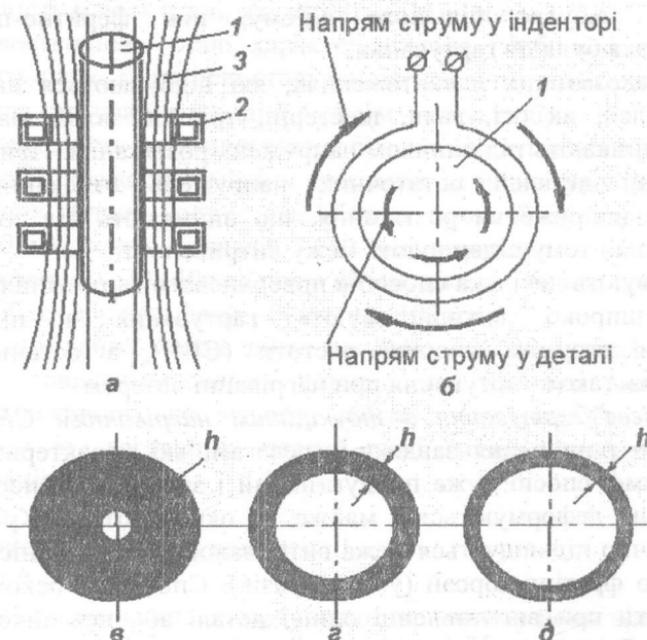


Рис. 1.32. Схема нагрівання СВЧ деталі (а), напрями струму в інденторі і в деталі (б), товщина загартованого поверхневого шару залежно від частоти струму: в – 50 Гц, г – 10000 Гц, д – 125000 Гц.: 1 – деталь, 2 – індуктор, 3 – силові лінії.

Поверхнєве гартування при нагріванні лазером. Цей спосіб полягає в тому, що нагрівання поверхні деталі зі сталі або чавуну за доли секунди виконується лазерним променем. У промисловості частіше використовують CO_2 лазери безперервно-хвильової дії потужністю 0,5 5 квт. Після закінчення дії лазерного випромінювання виконується гартування нагрітих ділянок завдяки інтенсивному відведенню теплоти в глибину металу (самогартування). Швидкість охолодження становить $10^8 \dots 10^5 \text{C/сек}$. Залежно від виду випромінювання, зона дії лазерного випромінювання може мати різну форму: при імпульсному випромінюванні пляма лазерного випромінювання має форму кола, а

при безперервному – стрічку шириною до 3 мм. При обробці поверхні металу лазерний промінь санірують із взаємним перекриттям або без перекриття зон зміцнення.

Залежно від потужності лазерного випромінювання, обробка може виконуватись із розплавленням або без розплавлення поверхні. Найбільша товщина загартованого шару без оплавлення для сталі сягає 1,5...2 мм, а для чавуну – 1...1,5 мм. При обробці оплавленням товщина зміцненого шару може бути більша.

При гартуванні лазером сталей і чавуну твердість поверхні стає більшою за всі інші види гартування й становить від 8000 HV МПа до 11000 HV МПа залежно від марки матеріалу, зносостійкість підвищується у 2...4 рази, межа витривалості при згині – на 70...80 %.

1.6.5. Термомеханічна обробка сталей

Процес гартування, коли після нагрівання і витримки або в процесі охолодження виконується об'ємна деформація сталі, що передуює швидкому охолодженню, називається *термомеханічною обробкою (ТМО)*. Внаслідок ТМО формується дрібнозерниста структура з оптимальним розподілом дислокацій, що сприяє значному зміцненню сталей за збереження достатньої пластичності.

Відомо два способи ТМО. Згідно з першим способом, який називають високотемпературною термомеханічною обробкою (ВТМО), сталь деформують за температури, вищої від критичної (вищої від A_1). Ступінь деформації становить 20...30%. Негайно після деформації виконують гартування.

За другим способом, який має назву низькотемпературної термомеханічної обробки (НТМО), сталь деформують у температурній зоні переохолодженого аустеніту, в ділянці його відносної стійкості (400...600°C). Ступінь деформації може сягати 75...95%. Гартування виконують відразу після деформації.

В обох випадках після гартування застосовують низькотемпературний відпуск (100...300°C). ТМО дає змогу досягати високих механічних властивостей ($\sigma_B = 2200...3000$ МПа, $\delta = 6...8\%$). Дуже важливим є те, що одночасно з підвищенням міцності після ТМО зростають пластичність й опір руйнуванню.

Застосовують ВТМО, яка здійснюється в цехах прокатного виробництва на металургійних заводах, при виготовленні деталей прокату (швелери, таври, кутики, труби тощо).

1.6.6. Старіння сплавів

Старіння – це зміна властивостей металевих сплавів із плином часу. Старіння може бути *природним* (за кімнатної температури) і *штучним* (за нагрівання до певної температури). В багатьох випадках природне старіння є шкідливим процесом. Наприклад, через зберігання деталей на складах після їх виготовлення протягом тривалого періоду внаслідок зміни структури металу може відбутися підвищення його твердості, зменшення пластичності. Трапляються випадки короблення виробів унаслідок зміни їх об'єму і розмірів. Старіння негативно позначається на експлуатаційних та технологічних властивостях багатьох сталей і сплавів. Воно може відбуватися в будівельних й, особливо, низьковуглецевих сталях, які підлягають пластичній деформації в процесі гнуття, монтажу і зварювання, що може бути причиною руйнування конструкції. Старіння, яке супроводжується різким спадом пластичності, ударної в'язкості та підвищенням порогу холодноламкості, є недопустимим. В той же час старіння стає корисним, коли зміцнення металу не супроводжується втратою достатньої в'язкості, як це відбувається, наприклад, за старіння дуралюміну.

Відомі два види старіння сталей – термічне і деформаційне.

Термічне старіння відбувається після прискореного охолодження сталей за певних температур. Цей спосіб термічної обробки ґрунтується на зміні розчинності фаз у твердому розчині під час нагрівання (охолодження) сплаву, а саме: за нормальної температури розчинність легувального компонента є значно меншою, ніж за високої. Схему діаграми, що відображає такий стан, уміщено на рис. 1.34. Лінія *bnc* показує, що за нормальної температури розчинність компонента *B* у компоненті *A* є значно меншою і становить *b* %, а в нагрітому стані може сягати значення C_0 %. Якщо сплав, склад якого дорівнює C_0 , нагрівати до температури T_1 , то β - фаза сплаву повністю розчиниться, сплав стане однофазним і складатиметься з α - фази. Після прогрівання деталі за температури T_1 виконують *гартування* (швидке охолодження). Внаслідок цього у твердому розчині за нормальної температури фіксується елемент *B* у кількості, що відповідає температурі T_0 (точка *n*).

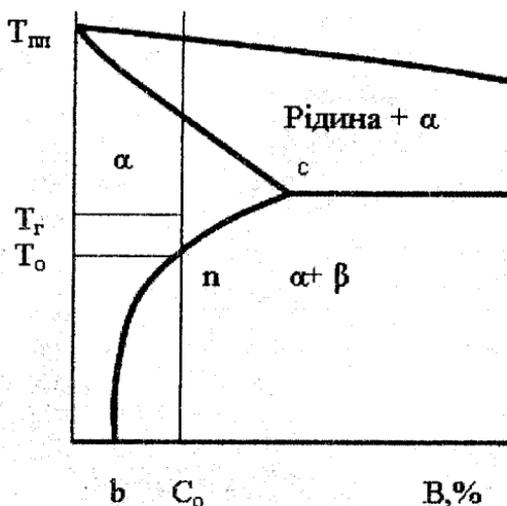


Рис. 1.33. Схема діаграми, яка пояснює старіння сплавів

Отже, твердий розчин стає пересиченим і невірноваженим. Загартовані таким чином сплави мають порівняно невисоку міцність (σ_B і σ_{02}) і високу пластичність (δ , ψ).

Після гартування виконують *термічне старіння* – сплав витримують при нормальній температурі декілька діб (природне старіння) або протягом 10...24 годин за незначного нагрівання (штучне старіння). Внаслідок старіння з пересиченого твердого розчину α -фази виділяються дисперсні включення у вигляді зон Гінье – Престона (ГП) або хімічної сполуки, які містять хімічний елемент В, завдяки чому сплав зміцнюється, а його пластичність знижується. Зміцнення сплавів за описаним видом термічної обробки називають *дисперсійним твердінням*.

Для низьковуглецевих сталей перед старінням температурою нагрівання є така, що перевищує 650...700°C на декілька десятків градусів, унаслідок чого утворюється пересичений твердий розчин вуглецю й азоту в залізі. Відомо, що при температурі 727°C у фериті розчиняється 0,025 % С, а при кімнатній – лише 0,006 % (дивись діаграму стану залізо-вуглець). У процесі витримки сталі за нормальної температури (природне старіння) або за підвищеної температури (штучне старіння) надмірний вуглець і азот виділяються з пересиченого твердого розчину фериту у вигляді карбідів та нітридів у високодисперсному стані, що і є причиною підвищення міцності й

твердості сталей. Процес зміцнення металу внаслідок виділення з нього вторинних фаз називається *дисперсійним старінням*, або *дисперсійним твердінням*.

Найбільшу схильність до термічного старіння виявлено у низьковуглецевих сталей з умістом вуглецю 0,03...0,05 % і особливо киплячих, які мають підвищений вміст розчинних газів (азоту та інших). У сталей із більшою кількістю вуглецю схильність до старіння низька. Дуже мала схильність до старіння у сталей, легованих алюмінієм, титаном або ванадієм.

Деформаційне старіння відбувається після холодної пластичної деформації. Швидкість процесу залежить від температури. Деформаційне старіння відбувається у період від 15 діб до декількох місяців при кімнатній температурі і протягом декількох хвилин при 200..350°C. У багатьох випадках природне старіння – небажане явище. Так, лист із низьковуглецевої сталі після тривалого вилежування стає непридатним для виготовлення з нього виробів холодним штампуванням. Старіння – одна з причин утворення кільцевих тріщин на трубах з низьковуглецевої сталі в місцях їх розвальцювання та гнуття. Для того щоб уникати недоліків, перед пластичною деформацією цих сталей застосовують відпал.

1.6.7. Хіміко-термічна обробка сталей

Хіміко-термічною обробкою (ХТО) називають поверхневе насичення сталі тим чи іншим хімічним елементом (вуглецем, азотом, бором, киснем, кремнієм, хромом і т. п.) із певного середовища при високій температурі.

При цьому проходять три основні процеси:

1. Процес утворення в певному середовищі хімічного елемента в атомарному стані, наприклад, утворення атомарного азоту при дисоціації аміаку $2\text{NH}_3 \rightarrow 2\text{N} + 3\text{H}_2$.

2. Контактвання атомів з поверхнею виробу (адсорбція).

3. Дифузія – проникнення в глибину виробу атомів хімічного елемента, який потрапив на поверхню.

За рахунок зміни хімічного складу поверхневий шар виробу набуває певних властивостей, таких, як твердість, корозійна стійкість та ін. Бувають такі види ХТО: цементація, азотування, ціанування, хромування, борування тощо.

Цементацією називають процес насичення поверхневого шару

стальних виробів вуглецем. Цементациї піддають вироби, які виготовляють із низьковуглецевої сталі. Після цементациї поверхневий шар буде складатися з високовуглецевої, а серцевина – з низьковуглецевої сталі.

Цементований виріб обробляють гартуванням і низьким відпуском, унаслідок чого поверхня деталі загартовується та стає твердою, міцною і зносостійкою, а серцевина залишиться м'якою й в'язкою, оскільки низьковуглецева сталь не гартується. Глибина цементованого шару залежить від режиму цементациї і може дорівнювати 0,5...2 мм. Звичайні значення товщин цементованих шарів – 0,6, 1,2 мм при відповідних витримках цементациї 6, 12 годин.

Застосовують вуглецеві і леговані сталі, які вміщують не більше 0,25 % вуглецю. Леговані сталі забезпечують серцевині виробу більшу міцність. Застосовують цементацию для таких деталей: шестерні, вали, втулки тощо.

Ціанування і нітроцементация сталі – це процеси, за якими відбувається дифузійне насичення поверхневого шару деталей вуглецем та одночасно азотом. Якщо насичення відбувається у газовому середовищі (наприклад, азоту 40%, водню 40% і оксиду вуглецю CO 20%), тоді процес називається нітроцементациєю, а якщо у середовищі розплавлених солей (NaCN, KCN) – ціануванням. Обидва процеси дозволяють отримати структуру поверхневого шару, схожу з такою, що отримується при цементациї. Але структура відрізняється тим, що, крім вуглецю, вона вміщує азот (0,1...0,15% - при нітроцементациї і 0,2...0,3 - при ціануванні), який відіграє суттєву роль як у процесі ХТО, так і у наданні певних властивостей. Наявність азоту прискорює процес ХТО, тому що дифузія вуглецю значно підвищується за присутності азоту. В зв'язку з цим такі процеси у порівнянні з цементациєю потребують меншого часу для отримання шару однакової товщини. Після ціанування або нітроцементациї виконують термічну обробку, подібну тій, що і після цементациї (гартування і низький відпуск). Азот надає поверхневому шару деталі такої властивості, як корозійна стійкість. Він також підвищує зносостійкість та механічні властивості деталей. Крім того, викривлення деталей, особливо деталей складної форми, в процесі ціанування або нітроцементациї значно менші, ніж при цементациї.

Газову нітроцементацию широко застосовують на автомобільних і тракторних заводах. Наприклад, на ЗАЗі 94,5 % деталей, які обробляють за допомогою ХТО, піддають нітроцементациї. Ціануванню підлягають дрібні деталі. Недоліком ціанування є те, що процес

дорогий, а солі, які застосовуються, є сильною отрутою, що потребує спеціальних запобіжних заходів з охорони праці.

Азотування сталі – це дифузійне насичення поверхневого шару виробу азотом. Цей процес базується на здатності заліза при нагріванні розчиняти й поглинати азот, а також утворювати хімічні сполуки – нітриди заліза FeN і Fe_2N , які характеризуються високими антикорозійними властивостями. Азотування здійснюють на глибину 0,3...0,6 мм. Для азотування використовують леговані сталі завдяки тому, що хімічні елементи підвищують поверхневу твердість. Наприклад, твердість поверхневого шару 38Х2МЮА після азотування становить HV12000 МПа. Цей спосіб застосовують для обробки таких деталей: клапани двигунів, шестерні, шаблони, шийки валів тощо. Особливо необхідно застосовувати цей спосіб ХТО для деталей морського транспорту або тих, що працюють в інших хімічно агресивних умовах.

Борування. Це дифузійне насичення поверхні сталльної деталі бором. при нагріванні у середовищі, що містить бор, у результаті чого утворюється шар боридів заліза FeB і Fe_2B , твердість яких становить 21000 HV МПа і 18000 HV МПа відповідно. Звичайна товщина боридного шару становить 0,1...0,2 мм. Така висока твердість, яка втричі перевищує твердість загартованих сталей, забезпечує високу стійкість деталей, які працюють в умовах термостійких, механічних впливів і абразивного зношування. Завдяки цьому строк служби деталей машин та обладнання після борування стає більш тривалий, ніж після традиційних способів обробки, таких, як гартування, цементация, азотування та інші.

Дифузійна металізація. При цьому виді ХТО здійснюють насичення виробу металами. Назва металізації визначається найменуванням елемента, яким насичується поверхня виробу. Найбільш розповсюдженими є: алітування – насичення поверхні виробу алюмінієм; хромування – насичення поверхні виробу хромом; силіціювання – насичення поверхні виробу кремнієм. Більшість цих способів ХТО застосовують для надання деталям корозійної стійкості або високої зносостійкості.

1.6.8. Дефекти термообробки

У процесі термічної обробки можуть виникати різноманітні дефекти.

Тріщини і короблення – наслідки внутрішніх напружень, які

виникають під час гартування. Дуже часто вони проявляються у випадку, коли деталь відпускається не відразу після гартування, а за деякий час. Причиною виникнення дефектів може бути також висока швидкість охолодження в температурному інтервалі мартенситного перетворення. Для запобігання цьому застосовують перервне, ступеневе або ізотермічне гартування. Щоб зменшити напруження, рекомендується під час конструювання виробів уникати різких виступів, загострених кутів, переходів від товстих перерізів до тонких тощо.

Аби уникнути короблення довгомірних виробів, їх охолодження в процесі гартування здійснюють у спеціальних штампах і пристроях.

Такі дефекти, як *недогрів та перегрів*, виправляють нормалізацією, а потім виріб знову термічно обробляють. *Перепал* є невиправним браком.

Окислення і декарбонізація. Від взаємодії з повітрям відбувається вигорання вуглецю з поверхні деталей, внаслідок чого різко знижуються їх твердість, міцність та зносостійкість.

Контрольні запитання для самостійної підготовки

1. Що таке термічна обробка і з якою метою її застосовують?
2. На яких фізико-хімічних процесах ґрунтується термічна обробка сталей?
3. Які недоліки можуть виникнути за неправильного нагрівання і витримки сталей?
4. Які основні види термічної обробки застосовують? Яких властивостей сталей при цьому досягають? Наведіть приклади.
5. Розкрийте суть процесів відпалювання, нормалізації, гартування і відпуску сталей. Які структури при цьому утворюються?
6. Які сталі та з яким умістом вуглецю загартовують?
7. Що таке критична швидкість охолодження сталі?
8. Які види гартування сталей вам відомі? Охарактеризуйте їх.
9. Що являють собою загартовуваність і прогартовуваність сталей? Від чого вони залежать?
10. Що таке термомеханічна обробка сталей (ТМО), які є способи ТМО і для чого їх застосовують?
11. Що собою являє поверхнєве гартування? У чому його суть і яка сфера застосування?
12. Що таке старіння сплавів і як воно впливає на їх властивості?
13. В чому полягає сутність хіміко-термічної обробки сталей, її призначення і де вона застосовується?

1.7. СТАЛІ ТА ЧАВУНИ

1.7.1. Класифікація сталей

В Україні, як і в інших країнах, застосовують буквено-цифрову систему позначення марок сталей, розроблену за ДСТУ EN 10020 -- 2002. Сталі класифікують за такими ознаками: призначення, хімічний склад, якість, види термічної обробки.

Залежно від хімічного складу сталі поділяють на *вуглецеві і леговані*.

За призначенням сталі поділяють на *конструкційні, інструментальні та спеціальні*.

За якістю розрізняють сталі звичайної якості, якісні, високоякісні й особливо високоякісні. В основу класифікації сталей за якістю покладено вміст у них шкідливих домішок – сірки і фосфору.

Допустимий вміст сірки і фосфору такий:

сталі звичайної якості – відповідно 0,05 і 0,04%;

якісні сталі – відповідно 0,04 і 0,035%;

високоякісні сталі – відповідно 0,025 і 0,025% (позначаються буквою А в кінці марки);

особливо високоякісні сталі – відповідно 0,015 і 0,025% (позначається через дефіс буквою Ш в кінці марки).

Решту класифікаційних ознак розглянуто у розділах конкретних груп сталей.

1.7.2. Вуглецеві сталі

Властивості вуглецевих сталей значною мірою залежать від кількості в них вуглецю, домішок та від технології виробництва.

Класифікація і маркування вуглецевих сталей. Вуглецеві сталі залежно від застосування поділяють на конструкційні та інструментальні.

Серед *конструкційних вуглецевих сталей* розрізняють сталі звичайної якості і якісні.

Згідно з ДСТУ 2651- 2006 , виготовляють *конструкційні вуглецеві сталі звичайної якості* таких марок: Ст0, Ст1кп, Ст1нс, Ст1сп, Ст2кп, Ст2сп, Ст3кп, Ст3нс, Ст3сп, Ст3Гнс, Ст3Гсп, Ст4кп, Ст4нс, Ст4сп, Ст5нс, Ст5сп, Ст5Гнс, Ст6нс, Ст6сп. Літери “Ст” означають, що сталь належить до конструкційних вуглецевих сталей звичайної якості, а цифри, які стоять далі, – умовний номер марки: що більший розмір то

вищі міцність і вміст вуглецю. Літера "Г" в марці сталі вказує на підвищений вміст мангану (0,8-1,2%). У сталі марок від Ст0 до Ст4сп включно вміст вуглецю становить від 0,06 до 0,27%, а марок Ст5 і Ст6 – 0,28...0,37 і 0,38...0,49% відповідно. Літерами "кп", "нс", "сп" позначають міру розкислення сталі ("кп" – кипляча, "нс" – напівспокійна, "сп" – спокійна).

Спокійні сталі (сп) розкислюють манганом, кремнієм і алюмінієм до повного виділення газових бульбашок із рідкого сплаву.

Напівспокійні сталі (нс) розкислюють манганом і кремнієм. Під час розливу сталі бульбашки виділяються в невеликій кількості.

Киплячі сталі (кп) не розкислюють, тому під час їх розливання виділяється багато бульбашок. Сталь ніби кипить, а після кристалізації ці бульбашки залишаються у твердому металі.

У більшості випадків сталі, які містять менш ніж 0,27% вуглецю (сталі марок Ст0 ... Ст4сп), застосовуються для виготовлення конструкцій, які з'єднуються зварюванням. Їх можна віднести до сталей, що добре зварюються.

Сталі марок Ст5нс ...Ст6сп містять більш ніж 0,3% вуглецю. Тому можливо підвищувати міцність деталей, виготовлених із цих марок сталей, завдяки термічній обробці, але їх зварність є невисокою.

Використовується вуглецева конструкційна сталь звичайної якості переважно як листовий матеріал і сортовий прокат для різних конструкцій, як от: арматура, болти, труби, невідповідальні паливні пристрої тощо.

Вуглецеві якісні конструкційні сталі. Згідно з ДСТУ 7809:2015, ці сталі поділяються на дві групи: група з нормальним умістом мангану (< 0,8 % Mn) марок 05кп, 08нс, 08кп, 10кп, 10пс, 10, 15кп, 15нс, 20кп, 20, 25, 30...80, 85; і група з підвищеним умістом мангану (1...1,2 % Mn) марок 15Г, 20Г, 25Г, 30Г, 35Г 65Г і 70Г. Цифри в назві марки сталі означають середній вміст вуглецю в сотих частках відсотка, а літера Г – наявність підвищеного вмісту мангану. Якість сталі визначається обмеженням умісту сірки і фосфору: $S < 0,04 \%$ і $P < 0,035 \%$.

Низьковуглецеві сталі (до 0,27% вуглецю) мають невелику міцність та високу пластичність, добре зварюються, тому їх обробляють прокатуванням, штампуванням, куванням, а коли треба – зварюють. Наприклад, сталь 08кп застосовують для штампування кузовів автомобілів, а сталі марок 08 ... 25 добре зварюються.

Середньовуглецеві сталі марок 30 ... 60 мають підвищену міцність, але меншу пластичність, ніж низьковуглецеві. З них виготовляють дуже широку номенклатуру деталей машин, механізмів, приладів (валики,

шестерні, осі тощо) переважно із застосуванням термічної обробки – поліпшення (ДСТУ EN10277-5:2014).

Сталі марок 65...85 і 65Г...70Г застосовують для виготовлення пружин, ресор та інших деталей, переважно невеликих розмірів.

Марки сталей А12, А20, А30, А40Г – *автоматні сталі* (ДСТУ EN 10277-3:2014) – теж належать до конструкційних вуглецевих сталей. Літера А вказує на те, що сталь автоматна. Ці сталі характеризуються високою оброблюваністю різанням. Назва автоматних сталей означає, що їх оброблюють на верстатах-автоматах.

Інструментальні вуглецеві сталі, відповідно до ДСТУ 3833-98, поділяють на якісні і високоякісні. Якісні сталі позначаються літерою У (вуглецева) та цифрами, що вказують на середній уміст вуглецю в десятих частках відсотка. Наприклад, сталь марки У7 містить 0,65...0,74 % вуглецю, сталь У10 – 0,95...1,09 % вуглецю. У високоякісних сталей в кінці позначення марки ставиться літера А (У8А, У12А тощо). У позначеннях вуглецевих інструментальних сталей, якісних і високоякісних, може стояти літера Г, що вказує на підвищений уміст у сталі мангану (наприклад, У8, У8ГА). Сталь постачають термічно обробленою у вигляді кованого круга, гарячекатаного круга, квадрата або смуги, каліброваного круга або квадрата і сріблянки.

Інструментальні вуглецеві сталі використовують для виготовлення штампів, а також інших інструментів (напилків, ножовочного полотна тощо).

Інструменти, застосування яких пов'язане з ударними навантаженнями, наприклад зубила, кернери, бородки, молотки, ковальські штампи, виготовляють із сталі У7. Вони повинні мати підвищену в'язкість; твердість допускається невисока (HRC50...52). Інструменти, що потребують значної твердості і мають витримувати удар, наприклад матриці, пуансони, ножиці для різання металу, а також пневматичні інструменти, виготовляють із сталі У8.

Для виготовлення металорізального інструмента, який не зазнає сильних динамічних ударів і потребує максимальної твердості (свердла, мітчики, плашки, зенкери, шабери, різці, ножі, ножівки), застосовують сталі У9, У10. Сталі У11, У12 та У13 призначаються для виготовлення інструментів із найвищою твердістю (HRC62...65), це напилки, зубила для насікання напилків, граверний інструмент, волочильні дошки.

Для отримання необхідних властивостей інструмент підлягає термічній обробці – гартуванню з подальшим відпуском. Недоліком вуглецевих сталей є низька теплостійкість і невелика

прогартовуваність, тому з них звичайно виготовляють невеликі деталі, поперечний переріз яких не перевищує 10 мм, при цьому робоча частина деталі не повинна нагріватися до температури, вищої від 200 °С.

1.7.3. Леговані сталі

Легованими називають сталі, до складу яких спеціально вводять один або декілька легуючих елементів для заданих властивостей. Легуючі елементи – хром, нікель, ванадій, молібден, вольфрам, бор тощо. Легуючими елементами можуть бути також постійні домішки (Mn, Si, N, P), коли їх додають спеціально для надання певних властивостей.

Класифікація і маркування легованих сталей. Залежно від умісту легуючих елементів леговані сталі поділяють на три групи: *низьколеговані* – вміст легуючих елементів становить менш як 2,5 %, *середньолеговані* – від 2,5 до 10 % і *високолеговані* – понад 10 %.

За призначенням леговані сталі поділяють на *конструкційні, інструментальні й сталі з особливими фізико-хімічними властивостями*.

Для маркування легованих сталей застосовують систему позначень, яка складається з букв і цифр. Кожний легуючий елемент позначається буквами: А – азот, Б – ніобій, В – вольфрам, Г – манган, Д – мідь, К – кобальт, М – молібден, Н – нікель, П – фосфор, Р – бор, С – кремній, Т – титан, Ф – ванадій, Х – хром, Ц – цирконій, Ю – алюміній.

Для *конструкційних легованих сталей* застосовують маркування, згідно з яким перші цифри вказують на середній вміст вуглецю в сотих частках відсотка, букви – наявність відповідних легуючих елементів, а цифри, що стоять після букв, – процентний вміст цих компонентів у сталі. Якщо після якоїсь букви немає цифри, то це означає, що сталь містить цей елемент у кількості до 1,5 %.

Приклади розшифрування марок сталей: сталь 40Х містить 0,4 % вуглецю і до 1,5 % хрому; сталь 16Г2 – 0,16 % вуглецю і близько 2 % мангану.

Для позначення високоякісної легованої сталі наприкінці маркування додають букву А, наприклад, 40ХНМА; для позначення особливо високоякісної сталі – букву Ш (через дефіс), наприклад, 40ХНМ-Ш. “Ш” вказує на те, що для виготовлення сталі був застосований електрошлаковий переплав. Особливо високоякісні сталі містять сірки не більш як 0,015 %, фосфору – не більш як 0,025%.

Порядок маркування *інструментальних леггованих сталей* за ДСТУ 3953-2000 такий: кількість вуглецю позначається першою цифрою в десятках, а не в сотих частках процента. Якщо цифри немає, то сталь містить близько 1% вуглецю або більше. Наприклад, марка 9ХС означає, що сталь інструментальна, містить близько 0,9 % вуглецю та менш ніж 1,5 % кожного з елементів – хрому і кремнію.

Сталі з особливими фізико-хімічними властивостями маркують за правилами, які відрізняються від названих за допомогою позначок, характерних для певної групи. Ці сталі можна визначити за буквами, що ставляться попереду: А – автоматна, Ш – шарикопідшипникова, Р – швидкорізальна, М – магнітна, Е – електротехнічна тощо. Наприклад, маркування ШХ15 означає, що сталь шарикопідшипникова; подальші Х15 зовсім не вказують на кількість хрому в цій сталі. Цю сталь розшифровують за правилами для групи шарикопідшипникових сталей.

Зарубіжна класифікація конструкційних сталей. Нині за кордоном немає єдиної системи маркування сталей. В Європі узвичаєна система, регламентована стандартом EN 100 27, у США застосовують декілька систем маркування матеріалів, що пов'язано з діяльністю різних організацій із стандартизації – AMS, ASME, ASTM, AWS, SAE, ASI, ANSI, AJS, в Японії – стандарт JIS – Japanese Industrial Standard і т.д.

За європейським стандартом EN 100 27 сталі маркують за допомогою букв і цифр таким чином.

Для маркування *сталей вуглецевих звичайної якості* спочатку, якщо це потрібно, зазначають одну або дві букви, які вказують на спосіб розкислення сталі (U – кипляча, R – спокійна або напівспокійна сталь) або застосування (Q – для відбортуння, Z – для волочіння, K – для холодного формування). Далі ставлять букви St, за якими – дві цифри, які вказують на мінімальну межу міцності в МПа, і далі, якщо це потрібно, після тире – одну цифру, що вказує на групу якості. Групи якості три, причому третя група якості означає найменший уміст сірки і фосфору. В кінці маркування можуть стояти букви U або N, які вказують відповідно на те, що сталь постачається після прокатування або після нормалізації. Наприклад, у сталі St 37-2 цифри 37 означають мінімальну межу міцності 370 МПа, 2 – другу групу якості; в сталі KSt 52-3 N буква K означає, що сталь призначена для холодного формування, 52 – мінімальну межу міцності 520 МПа, 3 – третю групу якості, N – сталь постачається після нормалізації.

Для маркування *вуглецевих якісних конструкційних сталей* спочатку ставиться буква С, потім може стояти одна з букв k, m, f, які відповідно означають: k – сталі, які містять сірки і фосфору менш ніж 0,035%; m –

сталі, що містять сірки 0,02-0,04% і фосфору $< 0,035\%$; f – сталі, що містять сірки $< 0,035\%$ і фосфору $< 0,025\%$. Далі ставиться двозначне число, яке вказує на середній уміст вуглецю у сотих частках відсотка. Наприклад, сталь С 45 містить 0,42...0,50% вуглецю, $< 0,045\%$ фосфору і $< 0,045\%$ сірки; Cf 45 – сталь містить 0,43...0,49% вуглецю, $< 0,025\%$ фосфору і $< 0,035\%$ сірки.

Для маркування *низьколегованих сталей* спочатку пишуть число, яке означає вміст вуглецю у сотих частках відсотка, далі – символи легуючих елементів, далі, через проміжок – числа, що означають уміст цих елементів, помножені на коефіцієнт 4, 10 або 100. Для елементів Cr, Co, Mn, Ni, Si, W застосовують коефіцієнт 4, для Al, Cu, Mo, Ti, V – коефіцієнт 10, для P, S, N – коефіцієнт 100. При цьому числа, що вказують на вміст легуючих елементів, відокремлюються одне від одного проміжком або тире. Наприклад, сталь 14 NiCr: 14 містить 0,14...0,20% вуглецю, 3,0...3,5% нікелю, 0,6...0,9% хрому (хром у марці цієї сталі не позначений через те, що його вміст є меншим, ніж 1%).

У маркуванні *високолегованих сталей* спочатку ставиться літера X, далі – символи хімічних елементів і числа, які вказують на їх уміст. Наприклад, високолегована сталь X2CrNiMo 10 10 5 містить $< 0,03\%$ вуглецю, 8,5...10,5% хрому, 8,5...11,0% нікелю, 4,5...5,5% молібдену.

1.7.4. Конструкційні леговані сталі

За загальним призначенням ці сталі ділять на машинобудівні і будівельні. Машинобудівні поділяють на такі групи: сталі для холодного штампування, цементовані сталі, ресорно-пружинні, зносостійкі, корозійностійкі та інші сталі. До будівельних належать переважно дві групи сталей: низьколеговані будівельні і арматурні сталі. Будівельні сталі використовують для спорудження будівельних конструкцій, магістральних трубопроводів тощо, а машинобудівні – для виготовлення деталей машин та механізмів у машинобудуванні. Такий поділ є умовним. Іноді в будівництві використовують машинобудівні сталі, наприклад, нержавіючі, і навпаки, для виготовлення машин застосовують будівельні сталі.

1.7.5. Конструкційні будівельні сталі

До цієї групи належать вуглецеві і низьколеговані сталі з низьким умістом вуглецю. Оскільки металеві конструкції експлуатуються в

різних атмосферних умовах за понижених і нормальних, а іноді підвищених температур, за різних статичних і динамічних навантажень, вони повинні протягом тривалого часу не втрачати міцності, пластичності й ударної в'язкості. Зважати також необхідно на те, що в сучасних металевих конструкцій із будівельних сталей є добра зварність, що допомагає запобігти появі у зварному з'єднанні тріщин і зниженню ударної в'язкості. Відомо, що зменшення в сталі кількості вуглецю та обмеження її в легуванні сприяє підвищенню пластичності, в'язкості, а також покращенню зварності. Тому в будівельних конструкційних сталях вміст вуглецю і легуючих домішок обмежується низькими значеннями. Деталі, що працюють в певних умовах, повинні також мати високі показники межі витривалості, корозійну стійкість, низьку температуру переходу в крихкий стан. Значення мають також такі технологічні властивості сталей, як здатність до різання, правки, згинання, виготовлення отворів без появи тріщин.

До *низьколегованих будівельних сталей* належать сталі, які містять менш ніж 0,22 % вуглецю (С), а кількість легуючих домішок не перевищує 5 %. Для цієї групи сталей значення <0,22 % С вказує на те, що вони мають невеликий уміст вуглецю й тому добре зварюються без утворення гарячих і холодних тріщин; коли вміст вуглецю перевищує вказану межу, виникає ймовірність утворення тріщин. До того ж, властивості зварного з'єднання й зони термічного впливу стають схожими на властивості основного металу. Ці сталі призначені для зварювання, тому більшість із них під час виготовлення розкислюють алюмінієм або титаном для того, щоб запобігти укрупненню зерна у зоні термічного впливу в процесі зварювання.

Легуючі елементи, розчинюючись у фериті, підвищують його міцність і зменшують розмір зерна. Хром, титан, ванадій, ніобій та інші карбідоутворювальні елементи сприяють появі в сталі дрібних частинок карбідів, нітридів або карбонітридів, які зумовлюють дисперсійне зміцнення сталей. Особливо відчутно подрібненню зерен у сталі сприяє взаємодія ванадію з азотом завдяки утворенню карбонітриду ванадію. Дрібнозернистість, тим часом, підвищує міцність і знижує поріг холодноламкості сталей. Наприклад, сталі, що містять азот та ванадій, 14Г2АФ, 16Г2АФ, 18Г2АФ, після нормалізації мають $\sigma_{0,2} = 400 \dots 450$ МПа,

$\delta = 20$ % і КСУ за $-40^\circ\text{C} - 0,4$ МДж/м², а за $-70^\circ\text{C} - 0,3$ МДж/м². Найчастіше застосовують сталь 16Г2АФ.

Такі легуючі домішки, як хром, мідь, нікель, фосфор, підвищують корозійну стійкість сталей у водних і газоповітряних середовищах.

Низьколеговані будівельні сталі застосовують у гарячекатаному стані або після термічної чи високотемпературної термомеханічної обробки. Порівняно з вуглецевими ці сталі мають більш високі показники межі міцності (σ_B) і межі текучості ($\sigma_{0,2}$) за незмінної високої пластичності й зниження порогу холодноламкості.

У табл. 1.1 наведено хімічний склад і механічні властивості деяких вуглецевих конструкційних сталей звичайної якості та низьколегованих будівельних сталей. Термічна обробка дає змогу поліпшити властивості сталей. Нормалізація завдяки подрібненню зерна підвищує міцність, в'язкість і пластичність та зменшує схильність до крихкого руйнування.

Таблиця 1.1

Хімічний склад і механічні властивості деяких вуглецевих конструкційних сталей звичайної якості й низьколегованих будівельних сталей

Марка сталі	Вміст хімічного елемента, %					Механічні властивості, МПа	
	C	Mn	Cr	Si	Інші	σ_{02}	σ_B
Вуглецеві конструкційні сталі звичайної якості							
Ст0	<0,23	-	-	-	-	200	320
Ст2кп.	0,06-0,14	<0,05	-	-	-	280	320
Ст3сп	0,10-0,15	<0,06	-	-	-	240	380
Ст4нсп.	0,18-0,27	<0,08	-	-	-	260	420
Низьколеговані конструкційні будівельні сталі							
14Г2	0,14	1,2-1,6	0,3	0,3	-	340	470
09Г2	0,9	1,8	0,3	0,3	-	310	450
17ГС	0,14-0,20	1,2	0,3	0,6	-	350	520
10Г2С	0,10	1,6	0,3	1,2	-	350	520
15ГФ	0,15	1,2	0,3	0,3	0,1%V	360	520
14ХГС	0,14	1,2	0,8	0,7	-	350	500
15Г2СФ	0,15	1,8	0,3	0,7	0,1%V	360	520
10ХСНД	0,10	0,8	0,9	1,1	0,5%Cu, 0,8%Ni	400	540
15ХСНД	0,15	0,7	0,9	0,7	0,5%Cu, 0,8%Ni	350	500

Гартування і відпускання сталей 14Г2, 17ГС, 15ХСНД значно підвищує їх міцність, знижуючи поріг холодноламкості і схильність до старіння. Значно поліпшують властивості низьколегованих сталей також шляхом застосування контрольованого прокатування, яке виконують за знижених температур нагрівання сталі під прокатку із закінченням її за температури 800...850°C; ступінь обтискання повинна бути 15...20%. Власне, така обробка є високотемпературною термомеханічною обробкою. Після контрольованого прокатування межа текучості ($\sigma_{0,2}$) сталі 09Г2ФБ дорівнює 450 МПа, сталі 08Г2МФБ – 470 МПа. Такі високі механічні властивості пояснюються зміцненням завдяки отриманню дрібних зерен.

Низьколеговані конструкційні сталі поділяють на класи відповідно до гарантованої межі текучості незалежно від їх хімічного складу і марки. Згідно із стандартом на сталі для будівельних металевих конструкцій (ДСТУ 2953-94), запроваджено 13 класів міцності: С235, С245, С255; С275, С285 (низько- та середньовуглецеві сталі), С345, С345К, С375, С390, С390К (низьколеговані). У маркуванні літера “С” означає клас, а цифри - межу текучості ($\sigma_{0,2}$) в МПа. Крім згаданих, є сталі з більшими показниками класів міцності.

До класу С235 належать сталі з нормальною міцністю; до класів від С345 до С400 – сталі з підвищеною міцністю і до класів, вищих за С450, – сталі з високою міцністю.

Приклади застосування низьколегованих будівельних сталей:

- допоміжні конструкції будівель виготовляють із сталей класів С 235, С290, С390;

- трубопроводи високого тиску виготовляють зі сталей 14Г, 14Г2, 19Г, 14ХГС, а газопроводи великого діаметра, деталі парових котлів – із сталі 17ГС;

- важконавантажені елементи екскаваторів виготовляють із сталей класів С600...С750 (12Г2СМФ, 14ГСМФР);

- для металевих конструкцій мостів та інших споруд, що призначені працювати за складних кліматичних умов, а також за низьких температур до -60°C, потрібні сталі 15ХСНД, 10ХСНД, 10Г2С1Д, 16Г2АФ;

- для виготовлення анкерних болтів, заклепок, кутників, листів, сортового прокату.

Застосування низьколегованих будівельних сталей замість вуглецевих дає можливість зменшити витрати металів на 15...25%. Незважаючи на вищу вартість, їх використання є економічно вигідним.

Арматурні сталі. Арматура – це сталеві стрижні і дріт різної форми (круглого, періодичного профілю), канати, а також арматурні вироби (сітки, каркаси), які є складовою частиною залізобетонних конструкцій. Арматура працює спільно з бетоном, тому вона повинна мати добре зчеплення з бетоном і бути міцною. Основні арматурні сталі, що застосовуються у будівництві, визначені БНІП 3.03.01-87. Арматура позначається такими буквами: стрижнева – літерою А, дріт – літерою В, канати – літерою К. Крім того, арматурні сталі поділяють на класи залежно від умовного або фізичного показника межі текучості (σ_t або σ_{02}) в Н/мм².

За ДСТУ 3760:2006 випускають арматуру таких класів:

A240С – круглого перерізу з гладким профілем;

A300С, A400С, A500С, A600, A600С, A600К, A800, A800К, A800СК і A1000 – з періодичним профілем (рис. 1.34.) За попередніми стандартами арматура позначалася інакше, а саме: клас А240С – як клас AI, клас А300 – як клас AII, клас А400 – як клас AIII, клас А600 – як клас AIV, клас А800 – як клас AV, клас А1000 – як клас AVI. На виробництві ці позначення іноді застосовують.

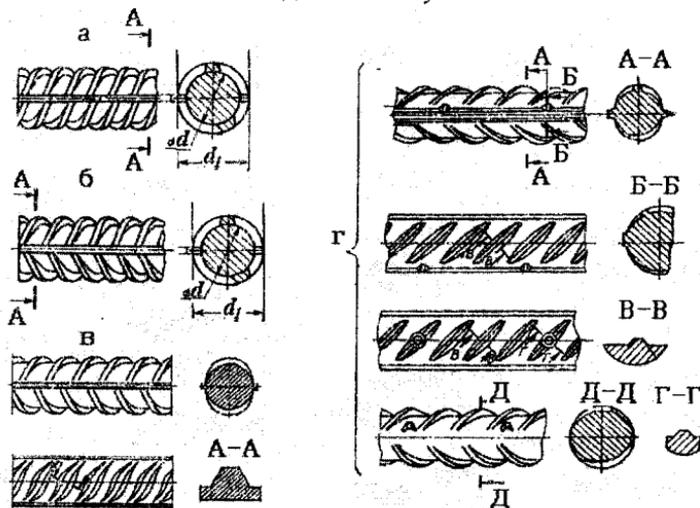


Рис. 1.34. Періодичні профілі арматури класів А300...А1000:
 а – класу А300 (ГОСТ 5781-82); б – класів А400...А1000 (ГОСТ 5781-82); в – класу А500С (ГОСТ 52544-2006); г – термомеханічно зміцнена арматура.

Характеристика різних класів арматурних сталей

Клас арматурної сталі	Діаметр профілю, мм	Марки сталі	Межа текучості, МПа	Відносне видовження, %
A240	6...40	СтЗкп, СтЗпс, СтЗсп	235	25
A300	10...40 40...80	ВСт5сп, ВСт5пс, 18Г2С	295	19
A300С	10...32	10ГТ	295	25
A400	6-40 6...22	35ГС, 25Г2С 32Г2Рпс	390	14
A600	10-18 6...8 (36...40)	80С 20ХГ2Ц	590	6
A800	(6-8) (10-32)	23Х2Г2Т	785	7...8
A1000	10-22	22Х2Г2АЮ, 22Х2Г2Р, 20Х2Г2СР	980	8...7

*

Допускається виготовлення арматури класу А800 зі сталей марок 22Х2Г2АЮ, 22Х2Г2Р і 20Х2Г2СР. За згоди замовника допускається виготовлення арматури з інших сталей. Арматурну сталь класів А300 і А400 застосовують для ненапружених конструкцій, арматурну сталь більш високих класів – для напружених конструкцій.

У маркуванні арматурного прокату, крім класів, указують характеристики за допомогою індексів: індексом С позначають арматуру, яку можна зварювати, індексом К – стійку до корозійного розтріскування під напруженням, індексом СК – метал, який може зварюватися і стійкий до корозійного розтріскування, без індексу С – метал, що не підлягає зварюванню, без індексу К – метал, не стійкий до корозійного розтріскування. Наприклад, позначення арматури А800СК розшифровується так: А800 – клас арматурного прокату, де 800 – показники гарантованої межі текучості 800 Н/мм², СК – метал, який підлягає зварюванню і стійкий до корозійного розтріскування, а в

позначенні арматури А800 є показником тільки межі текучості 800 Н/мм², інших позначень нема, тому слід вважати, що сталь не підлягає зварюванню і не стійка до корозійного розтріскування.

За способом виготовлення арматуру поділяють на гарячекатану, термічно зміцнену гартуванням і подальшим відпуском або термомеханічно зміцнену в потоці прокатки, холоднотягнуту зі сталі звичайної якості, патентовану холоднотягнуту і відпущену або стабілізовану (дроти й арматурні канати з неї).

Термомеханічне зміцнення в більшості випадків виконують безпосередньо після гарячого прокатування, після чого, коли сталь ще перебуває в нагрітому стані, її прискорено охолоджують до певної температури. Отже, для отримання мінімального гарантійного рівня межі текучості 400...500 Н/мм² температура кінця прискореного охолодження становить 550...650°C, а для отримання мінімального гарантійного рівня межі текучості 1000 Н/мм² температура закінчення прискореного охолодження – 350...400°C. Для сталей вуглецевих або низьколегованих із меншими показниками межі текучості після гарячого прокатування виконують або повільне охолодження, або прискорене охолодження при температурі 720...740°C. Застосовують також інші способи зміцнення арматурних сталей.

У табл. 1.2 наведено характеристику вуглецевих і низьколегованих сталей, з яких виготовляють арматурний прокат (ДСТУ 3760:2006).

1.7.6. Конструкційні машинобудівні сталі

В машинобудуванні використовують майже всі матеріали, що були створені людиною. В результаті розвитку з кожним роком зростає кількість сплавів із новими більш високими властивостями, що дає можливість удосконалювати сучасні машини і навіть створювати нові з новими функціями. Відомо, що умови експлуатації машин у різних галузях техніки з часом ускладнюються – збільшуються швидкості, навантаження, зменшуються розміри і маса машин тощо. До матеріалів висуваються більш жорсткі вимоги. У зв'язку з цим машинобудівні сталі повинні забезпечувати надійність і довговічність машин та механізмів, пожежобезпечність, продуктивність праці, економічність, комфортабельність, екологічність, зниження ваги продукції й тощо. Конструкційні сталі й сплави повинні задовольняти умови роботи машини, тобто задовольняти задану конструкційну міцність. Робота в екстремальних умовах, при низьких і високих температурах, при динамічних та циклічних перевантаженнях, дія агресивних середовищ

приводить до відмов деталей машин. Згідно зі статистичними даними деформація і в'язке руйнування стають причиною 15...20% усіх відмов.

Відомо, що підвищити опір деталей машин крихкому руйнуванню не можна тільки за рахунок підвищення запасу статичної міцності шляхом збільшення площі перетину. Це повинно досягатися за допомогою використання матеріалів, більш стійких до переходу в крихкий стан, та технологій їх виготовлення. Треба враховувати також те, що при збільшенні міцності матеріали стають більш крихкими і, як наслідок, менш надійними. В першу чергу, це стосується високоміцних металевих матеріалів.

Аналіз конструкційної міцності сучасних сталей з урахуванням таких характеристик, як в'язкість руйнування K_{Ic} і межа текучості $\sigma_{0,2}$, показав, що найгіршою надійністю володіють евтектоїдні сталі й сталі, що містять багато перліту. Наприклад, евтектоїдні сталі можна характеризувати такими показниками: $K_{Ic} = 18...40 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$, $\sigma_{0,2} = 400...1100 \text{ МПа}$. Для цих показників характерним є те, що коли підвищується значення в'язкості руйнування, то обов'язково зменшується $\sigma_{0,2}$ і, навпаки, при отриманні високої міцності сталь буде характеризуватись меншими показниками в'язкості руйнування.

У сучасних конструкційних сталей підвищують опір крихкому руйнуванню при зберіганні високої статичної міцності шляхами подрібнення зерна, застосуванням ТМО, очищенням сталі від шкідливих домішок, застосуванням мартенситностаріючих сталей або метастабільних аустенітних сталей тощо. Для цих сталей досягнуті такі максимальні показники: $K_{Ic} = 160 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ і $\sigma_{0,2} = 2500 \text{ МПа}$. Наприклад, високими показниками на сьогодні володіють метастабільні аустенітні сталі. Вони при високих значеннях міцності мають дуже високу пластичність.

Конструкційні машинобудівні сталі поділяють на групи за технологічною ознакою або за призначенням.

Сталі для холодного штампування (штамповані сталі) застосовують переважно в автомобілебудуванні для виготовлення деталей із листового металу. Ці сталі повинні характеризуватися високою штампованістю. Штампованість – це здатність матеріалу до формування, згинання металу без порушень цілісності і при збереженні міцнісних характеристик. Для забезпечення якісного штампування сталі повинні мати відношення $\sigma_B / \sigma_{0,2} = 0,5...0,65$ за Ψ не менш як 40 %.

Такі характеристики досягаються застосуванням сталі з низьким вмістом вуглецю і невеликою кількістю домішок для зменшення

розмірів зерна. Наприклад, для операцій глибокого витягування, а також глибокої штамповки кількість вуглецю в сталях обмежується 0,1%. Такі сталі характеризуються низькою міцністю і високою пластичністю. До них належать сталі 05, 05кп, 08пс, 10, 10кп і т.п. При операціях згину кількість вуглецю в сталях допускається 0,2...0,3%. Як правило, перед штампуванням їх термічно обробляють, застосовуючи рекристалізаційний відпал.

Для отримання виробів підвищеної міцності використовуються низьколеговані сталі марок 09Г2С, 09Г2, 16ГФР, 10Г2Ф, 12ХМ та інші, для яких застосовують неповне гартування у воді з температур, що містяться в інтервалі $A_1 - A_3$. При такому гартуванні в структурі утворюються фаза мартенситу у вигляді дрібних зерен у кількості, що не перевищує 30%, і феритна пластична фаза. Феритна фаза забезпечує пластичність і, як наслідок, штампованість, а мартенситна у вигляді дрібних включень у фериті зміцнює сталь.

Цементовані сталі – це конструкційні низьковуглецеві (0,1...0,3% вуглецю) сталі і низьколеговані сталі з кількістю вуглецю до 0,25%. З них виготовляють вали, шестерні тощо, що призначені для роботи в умовах тертя, ударних та перемінних навантажень. Приклади таких сталей – 15, 20, 25 і 15Х, 25ХГМ, 20ХН, 20Х2Н4А. Деталі, виготовлені з цементованої сталі, з поверхні на глибину 0,6...1,2 мм насичують вуглецем – цементують (дивись розділ 1.6.7. Хіміко-термічна обробка сталей), після цього вони підлягають термічній обробці (гартування і низький відпуск). Завдяки такій обробці досягається твердість $HRC58...65$ на поверхні й достатньо в'язка серцевина деталі. Працездатність деталей з них досягається завдяки високій твердості і міцності поверхні та достатньою конструкційною міцністю та в'язкістю серцевини металу. На міцність серцевини впливає хімічний склад сталі. Якщо умови експлуатації не потребують високих механічних характеристик, деталі виготовляють із вуглецевих сталей. Для виробництва деталей високої міцності і великих товщин застосовують леговані сталі. Крім того, чим більший розмір деталі, тим більш високолеговану сталь треба вибирати з міркувань більш високої прогартуваності.

Покращення пластичності цементованих і нітроцементованих сталей, збільшення глибини гартування, зменшення розмірів зерна в цементованому шарі дозволило підвищити межу міцності і межу контактної витривалості деталей, таких, як валів коробки передач і швидкохідних верстатів, шпинделів, зубчастих коліс тощо.

Поліпшувані сталі. Це середньо - вуглецеві (0,3...0,6 % С) сталі, кількість легуючих елементів в яких, звичайно, не перевищує 5%. З них виготовляють деталі машин: вали, зубчасті колеса, штоки, шатуни, деталі турбін та ін. Деталі повинні характеризуватися міцністю, пластичністю і в'язкістю, мати високий опір крихкому руйнуванню. Саме такими властивостями характеризується структура *сорбіт*, яку отримують шляхом гартування й високого відпуску. В розділі 1.6.2. "Види термічної обробки" спосєднання видів термічної обробки – гартування і високий відпуск - отримало назву *поліпшення*. Тому сталі, які підлягають такій термічній обробці, були названі поліпшуваними. За хімічним складом і прогартованістю ці сталі умовно поділені на групи. Це пов'язано з тим, що чим більший перетин має деталь, тим більшу прогартованість повинна мати сталь. Інакше, при малій прогартованості сталі деталь у процесі термообробки буде зміцнена лише на малий поверхневий шар, а серцевина її буде залишатися незміцненою.

Деталі, які працюють при ударних навантаженнях, повинні бути прогартовані наскрізь, а деталі, що працюють при згінних навантаженнях, можуть бути прогартовані на половину діаметра. Відомо також, що на прогартованість сталей впливає кількісний і якісний склад легування. Враховуючи це, сталь підбирають, виходячи із здатності до прогартованості й ступеня її легування. До сталей, що прогартовуються в деталях до 25...35 мм, належать сталі 40, 30Х, 40Х та інші. Вони мають такі властивості: $\sigma_B = 900...1000$ МПа, $\sigma_{0,2} = 700...800$ МПа, $\delta = 10...12\%$, НВ 1600...2400 МПа.

До сталей, що прогартовуються до 50..75 мм, належать сталі 40ХГТР, 30ХГС, 40ХН та інші. Вони мають такі властивості:

$\sigma_B = 1000...1100$ МПа, $\sigma_{0,2} = 800...850$ МПа, $\delta = 10...11\%$. НВ 1600...2100 МПа.

До сталей, що прогартовуються до 75...100 мм, належать сталі 30ХНЗА, 40ХН2МА тощо. Вони мають такі властивості: $\sigma_B = 1000...1100$ МПа, $\sigma_{0,2} = 800...950$ МПа, $\delta = 10...12\%$, НВ $\cong 2300$ МПа.

До сталей, які прогартовуються за 100мм, належать сталі 36Х2Н2МФА, 38ХНЗМФА, 30ХН2ВФА тощо. Вони мають такі властивості: $\sigma_B \cong 1200$ МПа, $\sigma_{0,2} \cong 1100$ МПа, $\delta = 12\%$. НВ 2300...2500 МПа.

Після гартування і низького або середнього відпуску поліпшені сталі при незначному зменшенні в'язкості можуть мати більшу міцність, ніж ту, що отримується при виконанні високого відпуску. Наприклад, сталь 30ХГСНА після ізотермічного гартування й низького

відпуску набуває $\sigma_B = 1650$ МПа і $\delta = 9\%$.

Ресорно-пружинні сталі – це сталі, з яких виготовляють пружини, ресори та пружні елементи різного призначення. Сталі постачають у вигляді дроту або стрічки. Вміст вуглецю в сталях повинен бути не меншим, ніж 0,5 % для утворення потрібних пружних властивостей після виконання термічної обробки (гартування і середнього відпуску) або деформаційного зміцнення. Пружини та інші пружні деталі мусять мати великі значення $\sigma_{0,2}$, σ_1 й незначну пластичність і в'язкість. Звичайна твердість після обробки становить *HRC* 42...48.

Пружні деталі в процесі термічної обробки повинні прогартувуватись по всьому перетину. Якщо серцевина деталі залишиться незагартованою, тоді пружність цієї частини буде недостатньою. В процесі роботи деталі ця частина буде пластично деформуватись і наклепуватись. У результаті можуть утворюватись тріщини, які стануть причиною передчасного руйнування всієї деталі. У зв'язку з цим, залежно від перетину деталі, слід вибирати сталь із відповідною прогартуваністю: для деталей малого перерізу прогартуваність сталі може бути незначною, а для деталей великого перетину – великою, й чим більший перетин металу, тим більшою повинна бути прогартуваність сталі. В розділі 1.6.3 “Загартуваність і прогартуваність сталей” пояснено, що при збільшенні кількості легуючих елементів, а також з урахуванням впливу кожного з них на процес, прогартуваність сталей буде збільшуватись.

Найменшу прогартуваність мають вуглецеві сталі – 65, 65Г, 70, 85, У7, У8, У10. Тому з них виготовляють деталі з перетином до 6...8 мм. Нерідко виготовлення пружини з цих сталей виконують шляхом застосування патентування і наступного протягування з деформуванням на 70% та більше. Після холодної навивки пружини відпускають при температурі 210...320°. В результаті такої обробки знімаються напруження, а за рахунок подрібнення зерна підвищуються $\sigma_{0,2}$ і σ_B . Межа міцності пружини після такої обробки може досягати 2600 МПа.

Кремній, один із найдешевших легуючих компонентів, збільшує прогартуваність і значно підвищує межу пружності сталей. У зв'язку з цим він є присутнім майже в усіх ресорно-пружинних сталях (табл.1.3.).

Кременисті сталі широко застосовують при виготовленні пружин

вагонів, автомобільних ресор, торсіонних валів. Однак вони схильні до знеуглецьовування поверхневих шарів і графітоутворення, що знижує межу витривалості. Додаткове легування хромом, марганцем та іншими хімічними елементами значно зменшує цей недолік і збільшує прогартовуваність. Тому для виготовлення автомобільних ресор широко застосовують сталь 50ХГА. Для клапанних пружин застосовують сталь 50ХФА, яка не схильна до перегріву і знеуглецьовування. Однак вона застосовується для виготовлення пружин, які мають діаметр, що не перевищує 5...6 мм, у зв'язку з невеликою прогартовуваністю. Для пружин більшого діаметра, ніж 6 мм, застосовують сталь 50ХГСА, яка характеризується більшою прогартованістю.

Таблиця 1.3

Механічні властивості і застосування ресорно-пружинних сталей

Марка сталі	Механічні властивості				Приклади застосування
	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	Ψ , %	
75	800	1100	10	35	Пружини малого перетину
85	1100	1150	8	30	
50С2	1100	1200	6	30	Пружини і ресори в авто-, тракторобудуванні, залізничному транспорті
55С2А	1400	1600	6	20	
70С3А	1600	1800	6	25	
65С2ВА	1700	1900	5	20	Відповідальні високонавантажені пружини і ресори
60С2Н2А	1600	1750	6	20	

Коли пружні деталі працюють в умовах сильних динамічних навантажень застосовують нікелькремністі сталі, наприклад, 60С2Н2А. А для великих високонавантажених пружин і ресор застосовують сталі, що містять молібден або вольфрам, наприклад, 65С2ВА.

Підвищенню опору втомлюваності ресорно-пружинних сталей в 1,5...2 рази сприяє поверхневий дробеструйний або гідроабразивний наклеп.

Сталі з підвищеною оброблюваністю різанням (автоматні сталі) – це сталі, які були виготовлені з метою підвищити продуктивність праці і зменшити витрати на інструмент, що має значення при масовому виробництві деталей на верстатах-автоматах.

Зазвичай, продуктивність праці при обробці різанням деталей залежить від швидкості різання й від часу на видалення стружки з місця обробки різанням.

Для збільшення швидкості різання до максимально допустимого значення, яке б не зменшило стійкості різального інструмента, в автоматні сталі додають легуючі компоненти, що знижують тертя між інструментом і деталлю.

Суттєвою є також проблема видалення стружки від місця обробки деталі. Коли стружка в'ється при обробці деталі, її важко видаляти. Тому автоматні сталі повинні набути властивості, які би дозволили отримувати в процесі різання стружку сколювання, яка не в'ється, а осипається, що полегшує процес видалення і транспортування стружки від місця обробки деталі. Це також стає можливим при певному легуванні сталей.

Для отримання стружки сколювання та поліпшення оброблюваності автоматні сталі легують такими хімічними елементами: P, S, Se, Te, Ca, Pb.

Згідно з ДСТУ EN 10277-3:2014, автоматні сталі маркують літерою А, що стоїть попереду, а легуючі домішки так: С – свинець, К – кальцій. Інші букви просявляються такими ж, як і при маркуванні легованих сталей, а саме: Е – селен, Х – хром, Н – нікель, Г – марганець, М – молібден, В – вольфрам і т. п. Цифри після літер А, АС, АК показують середній уміст вуглецю в сотих частках відсотка.

Сірка і фосфор сприяють утворенню сипучої стружки, але в'язкість сталі зменшується, вона стає більш крихкою. Тому сталі А11, А12, А20 використовують для малонавантажених деталей кріплення (болти, гайки тощо). Для деталей, що працюють при підвищених навантаженнях, застосовують сталі, що містять більше вуглецю й марганець, наприклад, сталі А30, А40Г.

Свинець підвищує оброблюваність завдяки плавленню під дією теплоти різання, що знижує тертя між інструментом і деталлю, наприклад, АС14, АС35Г2, АС12ХН, АС 38ХГМ та інші.

Комплексне легування сіркою і селеном призводить до утворення селенідів та сульфоселенідів, які теж зменшують силу тертя між інструментом і деталлю. Крім того, селен сприяє збереженню корозійної стійкості сталей. Його додають до корозійностійких сталей, наприклад, до сталі 12Х18Н10Е, а також до автоматних, таких, як сталі А35Е, А45Е.

Домішки Pb, Se дозволяють збільшити стійкість інструмента до 30...40%. Хром, марганець, молібден, вольфрам, нікель та інші хімічні елементи підвищують механічні властивості автоматних сталей.

Зносостійкі сталі – це сталі, які спеціально були виготовлені для умов роботи, коли на деталь діють високий тиск і удари, в умовах абразивного зношування. З них виготовляють траки гусеничних машин, щоби дробарок, деталі млинів, черпаки землечерпальних машин, хрестовини залізничних та трамвайних колій, ножі сільськогосподарських машин (лемехи, відвали, ножі культиваторів) тощо. До цих сталей відносять сталі 110Г13Л, 60Х5Г10Л, 70Г6 й інші і сталі 30Х10Г10, 0Х14АГ12, які застосовують при виготовленні лопатей гідротурбін і гідронасосів, судових гвинтів, що працюють в умовах зношування при кавітаційній ерозії. Всі ці сталі мають єдину структуру і технологічну основу.

Вперше, 100 років тому, сталь 110Г13Л було розроблено Гадфільдом у Німеччині, яка отримала назву сталь Гадфільда. Інші зносостійкі сталі, перелічені вище, за своєю структурою і технологією обробки мають схожі риси. Сталь 110Г13Л вміщує 0,9...1,3 % вуглецю й 11...14,5 % марганцю. Поставляється вона у вигляді відливок або поковок. Здебільшого деталі спочатку відливають. Далі деталі нагрівають і загартовують у воді при температурі 1050..1100°С. В результаті утворюється метастабільна (неврівноважена) аустенітна структура. Така структура схильна до зміцнення в процесі пластичної деформації в холодному стані за рахунок перетворення деформованих шарів з аустеніту на мартенсит. Загартована сталь 1100Г13Л має твердість приблизно HV2000 МПа, а після деформації – HV6000 МПа. В процесі роботи загартованої деталі зі сталі 110Г13Л (щоби дробарки, траків гусеничних машин тощо) відбувається наклеп (пластична деформація) поверхневого шару, в результаті чого збільшується поверхнева твердість і, відповідно, зносостійкість. В умовах чистого абразивного зношування, коли не відбувається помітна пластична деформація поверхневих шарів деталі, зносостійкість цієї сталі низька.

При роботі судових гвинтів, лопатей гідротурбін та інших подібних деталей на їх поверхні виникає кавітація, яка впливає на поверхню деталей дією дрібних ударних навантажень, у результаті чого відбувається її зміцнення, аналогічно тому, яке виникає при ударно абразивному навантаженні. Тому сталі 30Х10Г10, 0Х14АГ12, 08Х18Н10Т, які мають метастабільну структуру, є зносостійкими в умовах дії кавітації і їх називають кавітаційностійкими.

Шарикопідшипникові сталі – це сталі, які призначені для виготовлення деталей підшипників кочення – шариків, роликів, зовнішніх і внутрішніх обойм.

У зв'язку із специфічністю умов експлуатації підшипникові сталі

повинні бути зносостійкими і мати великий опір контактної втомлюваності.

Згідно з ДСТУ ISO683-17:2008, виготовляють такі марки шарикопідшипникових сталей: ШХ4, ШХ9, ШХ15, ШХ15СГ тощо. Літера Ш у марці сталі позначає те, що сталь шарикопідшипникова, Х – те, що вона хромиста, цифри вказують на призначення сталі до виготовлення деталі певного перетину, а саме, чим більше число, що стоїть після літери Ш, тим більшим може бути діаметр кульки. Отже, для виготовлення деталей невеликого перетину (до 15 мм) застосовують марки сталей ШХ4, ШХ9, а для деталей перетину до 25 мм – ШХ15. Але сталі, які леговані хромом, мають невелику прогартовуваність. Тому для деталей із більшим перетином, ніж 25...30 мм, застосовують сталі з більшою прогартовуваністю, які леговані кремнієм і марганцем. Це сталі ШХ9СГ, ШХ15СГ.

Для шарикопідшипникових сталей, які працюють у більш жорстких умовах (великі швидкості та інше) застосовують сталі з меншою кількістю шкідливих домішок (S, O₂ тощо.). Такі сталі виплавляють способами електрошлакового або вакуумнодугового переplаву. В позначках марок цих сталей проставляються літери Ш (електрошлакова) або ВД (вакуумнодугова), наприклад, ШХ15-Ш або ШХ15-СД.

Шарикопідшипникові сталі термічно обробляють таким чином. Спочатку для легшої оброблюваності їх відпалюють – застосовують сфероїдизуючий відпал. Далі, після механічної обробки, їх загартовують і дають низький відпуск при 150...170°C. В результаті такої обробки твердість становить HRC61...62. Кінцеві операції – шліфування, полірування. Всі процеси виготовлення шарикопідшипників на підприємствах автоматизовані з переходом від однієї до наступної операції.

Високоміцні сталі. Високоміцними вважаються сталі, які характеризуються міцністю $\sigma_v \geq 1500$ МПа. До цієї категорії сталей можна віднести деякі марки поліпшуваних, пружинних та інших груп сталей, які характеризуються високими значеннями міцності. Але такі сталі при високих значеннях міцності мають недостатні пластичність і в'язкість. З метою досягти споседнання високих показників міцності й в'язкості були розроблені ПНП і мартенситностаріючі сталі.

ПНП-сталі (пластичність наведена перетворенням). Їх також позначають TRIP-сталі (Transformation Induced Plastisity). Ці сталі містять хром – 8...14%, нікель – 8...32%, марганець – 0,5...2,5%,

молібден – 2...6%, кремній – до 2%, наприклад, 30X9H8M4Г2С2, 25H25M4Г. Їх термічно обробляють на аустеніт, після чого пластично деформують (прокатування, волочіння і т.п.). В результаті отримуються такі властивості: $\sigma_B = 1500...1700$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1400...1550$ МПа, $\delta = 50\%$, а також високі значення в'язкості руйнування K_{IC} та межі витривалості σ_1 . Структура сталі стає аустенітною, зміцненою дрібними зернами мартенситу. В такому стані сталь використовують для виготовлення високонавантажених деталей, дроту тросів, деталей кріплення.

Мартенситно-старіючі сталі мають мало вуглецю ($< 0,03\%$) і містять такі легуючі домішки, як нікель (8...20%), а також кобальт, титан, алюміній, молібден та інші. Приклади цих сталей: H18K8M5T, H12K8M3Г2, H10X11M2T, H12K8M4Г2 й інші.

Спочатку ці сталі підлягають гартуванню, в результаті чого утворюється безвуглецевий мартенсит, який характеризується високою пластичністю і в'язкістю, але недостатньою міцністю ($\sigma_B = 1100...1200$ МПа, $\delta = 18...20\%$, $\psi = 70...80\%$). В такому стані сталі гарно обробляються тиском, різанням та гарно зварюються. Для зміцнення цих сталей виконують старіння шляхом нагрівання їх до температури $\approx 500^\circ\text{C}$. Після старіння сталь зміцнюється, але в неї частково знижуються пластичність і в'язкість. Характеристики її властивостей стають такими: $\sigma_B = 1800...2100$ МПа, $\delta = 8...12\%$, $\psi = 40...60\%$ та HRC 52. Ці сталі мають високу пружність. Тому з них виготовляють пружини, що здатні працювати при низьких температурах. Вони корозійностійкі. Вартість їх висока, тому їх застосовують лише в авіа- і ракетобудуванні, суднобудуванні, в криогенній техніці та інших спеціальних галузях.

Жароміцні сталі і сплави. Ці сталі та сплави повинні бути жаростійкими під навантаженням протягом певного часу при температурах, вищих 500°C . Їх використовують у високотемпературній техніці у вигляді деталей газових турбін, реактивних двигунів, паросилових установок, клапанів двигунів внутрішнього згорання тощо. Високі температури знижують механічні властивості матеріалів. Крім того, у металів проявляється таке явище, як повзучість, яке характеризується тим, що при високій температурі матеріал, навіть при навантаженні, меншим за межу текучості, починає пластично деформуватися (розтягуватися) у часі з певною швидкістю. Розвиток повзучості приводить до руйнування матеріалу.

Опір металу повзучості і руйнуванню в області високих температур

при тривалій дії навантаження називається *жароміцністю*.

Різні жароміцні сталі й сплави застосовують у таких температурних умовах експлуатації:

- для роботи при температурах до 600°C застосовують сталі перлітного класу (наприклад, 12X1MФ, 12X2MФCP), мартенситного класу (наприклад, 15X11MФ, 18X12BMБФP), сільхроми (наприклад, 40X9C2, 40X10C2M);

- для роботи при температурах до 750°C застосовують сталі аустенітного класу (наприклад, 10X18H12T, 09X14B2BP);

- для деталей газових турбін в авіації, що працюють при температурі до 850°C, застосовують сплави на нікелевій основі, які називають німоніками (наприклад, ХН77ТЮP);

- для роботи при температурах до 980°C лопатки газових турбін виготовляють із сплавів на кобальтовій основі;

- для більш високих температур до 1300...1400°C перспективним є застосування керамічних матеріалів на основі нітриду кремнію, що має назву сіалон.

Підвищення робочих температур забезпечує збільшення ресурсу газотурбінних двигунів в 2...3 рази, при цьому підвищується їх надійність, успішно вирішуються питання економічності, тяги.

Кріогенні сталі і сплави. Ці матеріали повинні працювати при низьких температурах – нижчих за -80°C, навіть при наднизьких температурах зрідження кисню (-183°C), азоту (-196°C), водню (-253°C),

гелію (-269°C). В умовах низьких температур кріогенні матеріали не повинні бути крихкими, зберігати механічну міцність та корозійну стійкість.

В якості кріогенних сталей, що працюють при температурах, більших за -100...-196°C, застосовують низьковуглецеві нікелеві сталі 0Н6, 0Н9, а при температурах вищих за -253°C – аустенітні хромомарганцові і хромонікелеві, леговані азотом сталі, такі, як 12X18H10, 12X13AГ19, 07X21, 10X14Г14H4T тощо. Для умов експлуатації при температурах за -269°C використовують сплав інвар (36Н).

Корозійностійкі (нержавіючі) сталі. Ці сталі, згідно із ДСТУ EN 10088-1:2008, повинні містити хрому більш ніж 10,5%, а практично – більш ніж 13%. Стійкість до корозії пояснюється тим, що в поверхневому шарі в умовах окислювання утворюється тонкий захисний шар оксиду хрому, який захищає сталь від корозії. На рис. 1.35 показано, що більш стабільний позитивний електродкінетичний

потенціал стає за кількості хрому понад 12...13%. Тому більшість корозійно стійких сталей виготовляють саме з такою концентрацією хрому.

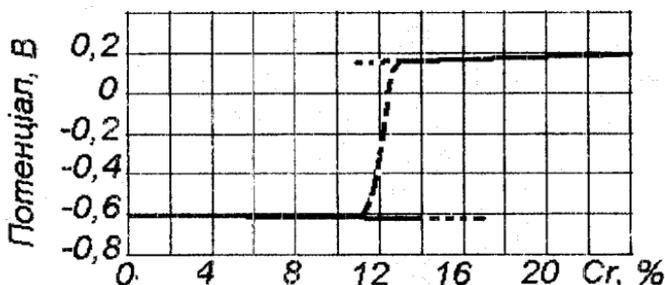


Рис. 1.35. Залежність електрокінетичного потенціалу сплавів системи Fe – Cr від вмісту хрому

Стійкість проти корозії у сталей підвищується тільки тоді, коли весь хром переходить у твердий розчин. Підвищення вмісту вуглецю призводить до утворення карбідів хрому, завдяки чому зменшується кількість хрому у його твердому розчині в залізі й, як наслідок, знижується корозійна стійкість і збільшується крихкість. Щоб зберегти хром у твердому розчині, до сталей додають Ti, Nb та інші хімічні елементи, які є більш активними до вуглецю і азоту. Завдяки цьому вуглець та азот зв'язується цими елементами, утворюючи відповідні карбіди і нітриди TiC, NbC, TiN, NbN. Це унеможливує утворення карбідів хрому, отже, збіднення фериту хромом.

Корозійностійкі сталі поділяють на хромисті (наприклад, 08X13, 12X13, 20X13, 40X13) і хромонікелеві (наприклад, 04X18H10, 12X18H10T, 12X21H5T). Хромисті сталі стійкі до корозії у повітрі, воді, водяній парі. Хромонікелеві сталі більш корозійностійкі, ніж хромисті. Вони стійкі у таких агресивних середовищах, як морська вода, органічні кислоти тощо. Залежно від вмісту, хромисті сталі після нормалізації мають феритну, мартенситно-феритну або мартенситну структури, а хромо-нікелеві – аустенітну, аустенітно-мартенситну або аустенітно-феритну структури. Їх поділяють на класи відповідно до названих структур.

До феритного класу належать сталі 12X17, 15X25T, 015X17M2B та інші. Вони мають більшу корозійну стійкість, ніж решта хромистих сталей. Звичайно їх використовують у литому стані без термічної обробки. Зварювання сталей 12X17, 15X25T слід уникати, тому що зона зварного шва стає крихкою, а великі зерна її структури призводять до

міжкристалічної корозії. Більш стійкою є сталь 015X17M2Б, яка містить мало вуглецю і легована ніобієм та молібденом.

До *мартенситного класу* належать сталі 20X13, 30X13, 40X13, а до *мартенситно-феритного* – сталі 08X13, 12X13. Температура нагрівання для їх гартування становить 975...1100°C. Завдяки високій температурі досягають кращої розчинності карбїду хрому. Відпуск сталей із низьким умістом вуглецю (08X13, 12X13, 20X13) виконують за температури 600...800°C, що сприяє зниженню напружень, а також підвищенню корозійної стійкості і пластичності. Обробляючи тиском, наприклад штампуванням, з них виготовляють різні деталі: клапани гідравлічних пресів, арматуру крекінг-пристроїв. Сталі 30X13, 40X13 відпускають за температури 200...300°C для отримання високої твердості (HRC 52...58) в поєднанні з корозійною стійкістю. З цих сталей виготовляють деталі, які працюють на зношування (вимірювальний, хірургічний інструмент, ножі тощо). Сталі мартенситного і мартенситно-феритного класів добре зварюються.

Сталі *аустенітного, аустенітно-мартенситного або аустенітно-феритного класів*, крім хрому, який, в основному, забезпечує корозійну стійкість, містять нікелю більш ніж 8...12%. Завдяки нікелю корозійна стійкість нержавіючих сталей у багатьох агресивних середовищах зростає. Сталями мартенситного класу є, зокрема, 12X18H9, 0X18H10. Для зменшення міжкристалічної корозії в ці сталі вводять титан, ніобій (сталі 12X18H9Т, 08X18H12Б та ін.). Такі сталі називають *стабілізованими*. Через те, що нікель дорогий, іноді замість нього застосовують манган. Наприклад, сталь 10X14Г14Н3Т рекомендована для заміни сталі 12X18H9Т. Корозійна стійкість таких сталей є трохи нижчою, ніж хромонікелевих. Після гартування аустенітні сталі мають невелику міцність, але високу пластичність ($\sigma_B = 440...570$ МПа, $\sigma_{0,2} = 200...230$ МПа, $\delta = 35...43\%$). Аустенітні конструкційні сталі використовують у конструкціях, які виготовляють із листової сталі штампуванням і зварюванням (оболонки, ємності, трубопроводи) в різних галузях промисловості, зокрема в автомобілебудуванні.

До *аустенітно-феритного класу* належать сталі 08X22H6Т, 08X21H6M2Т (містять менше нікелю), а до *аустенітно-мартенситного класу* – сталі 09X15H8Ю, 08X17H5M3 тощо. Вони міцніші за сталі аустенітного класу. Зміцнення їх відбувається завдяки гартуванню і старінню. Вони мають досить високі корозійні властивості. Сталям аустенітно-феритного класу властиві такі характеристики: $\sigma_B = 600...700$ МПа, $\sigma_{0,2} = 450...550$ МПа, $\delta = 16...25\%$, а сталям аустенітно-мартенситного класу – такі: $\sigma_B = 1200$ МПа, $\sigma_{0,2} = 900$ МПа, $\delta = 12\%$.

Деталі, які працюють в особливо агресивних середовищах (сірчана, соляна кислота), виготовляють зі сплавів на залізонікелевій основі (06ХН28МДТ, 03ХН28МДТ) і сплавів на нікельхроммолібденовій основі (Н70МФ, ХН65МВ).

1.7.7. Сталі та сплави з особливими властивостями

Це сталі і сплави, до яких висуваються особливі вимоги щодо певного рівня фізичних властивостей, їх хімічного складу, чистоти відносно домішок, технологічного процесу й термообробки. Всі групи цих сплавів в посібнику не розглянуті. Але деякі з них, що становлять особливий інтерес і з'явилися останнім часом, описані. Це такі групи сталей та сплавів: аморфні сплави, сплави із заданим температурним коефіцієнтом лінійного розширення, сплави з ефектом "пам'яті форми", інтелектуальні матеріали.

Аморфні металічні сплави. Ці металеві сплави мають не кристалічну, а аморфну структуру, завдяки якій їх властивості суттєво відрізняються. Отримання аморфної структури виконується шляхом охолодження розплавленого металу зі швидкістю, яка перевищує швидкість кристалізації ($10^6 \dots 10^8$ °C). Найбільш поширено застосовують спосіб швидкого охолодження рідкого металу на поверхні холодного диска, що швидко обертається. За цим способом отримують стрічку, дріт, порошки. Особливістю цих виробів є малий перетин – товщина їх повинна бути менша за 60 мкм. Лише при утворенні тонких виробів або дрібних порошків можна досягти великих швидкостей охолодження металу. В масивних деталях не може формуватися аморфна структура за невеликої швидкості охолодження.

Було отримано аморфні сплави на основі майже всіх металів. Аморфна структура забезпечує отримання металів із високими значеннями межі текучості. Наприклад, сплави на основі заліза або кобальту мають $\sigma_T \approx 4500$ МПа. У вигляді дротів діаметром 0,5...20 мкм їх можна використовувати в складі композиційних матеріалів. Аморфні сплави на основі Fe, Co, Ni використовують як магнітом'які матеріали з особливими властивостями в електронній промисловості.

Сталі і сплави з високим електроопором для елементів нагрівання. Ці сплави являють собою тверді розчини, тому що тільки така структура характерна для металевих сплавів із високим

електроопором. Сплави також повинні бути окалино - і корозійностійкими. Виготовляють їх у вигляді дроту або стрічки. Для електронагрівачів застосовують ніхроми (наприклад, Х20Н80 з робочою температурою 1050 °С), хромоалюмінієві сплави Х13Ю4, 0Х23Ю5 і 0Х27Ю5А, максимальні робочі температури яких відповідно становлять 900, 1100 і 1200 °С, фероніхроми (наприклад, Х15Н60) з робочою температурою 1000 °С, сплави із заданим температурним коефіцієнтом лінійного розширення. Для виготовлення деталей машин і приладів, які повинні зберігати постійні розміри при нагріванні, застосовують хромонікелевий сплав 36Н (< 0,05% С, 36% Ni і залізо), який має назву інвар, коефіцієнт лінійного розширення якого сягає $1,5 \cdot 10^{-6}$ °С. З цього сплаву виготовляють деталі для метрологічних, геодезичних приладів тощо.

Для вакуумних впаїв у молібденове скло, що має коефіцієнт лінійного розширення близько $5 \cdot 10^{-6}$ °С, застосовують ковар (29% Ni, 18% Со і залізо). У ковара $\alpha = (4,6 \dots 5,5) \cdot 10^{-6}$ °С.

При впаюванні в скло, що характеризується $\alpha < 8,7 \cdot 10^{-6}$ °С, використовують більш дешеві залізохромисті сплави 18ХТФ і 18ХМТФ.

Сплави з ефектом "пам'яті форми"- це сплави, які після пластичної деформації здатні відновлювати первинну геометричну форму при нагріванні. Отже, коли дріт закрутити в спіраль при високій температурі і випрямити при низькій температурі, тоді після повторного нагрівання до температури пам'яті дріт знову сам по собі закрутиться в спіраль. В основі механізму цього явища покладено зворотне мартенситне перетворення. Відкрито багато сплавів, які володіють цим явищем. Серед них найбільш розповсюдженим є сплав на основі нікелю і титану, який має назву нітинол (марки ТН-1, ТН-1К, ТНМ-3, ВСП-1). Його властивості такі: $\sigma_b = 770 \dots 1100$ МПа, $\sigma_t = 300 \dots 500$ МПа, $\delta = 10 \dots 15\%$. З нітинолу виготовляють антени супутників Землі, деталі температурно чутливих датчиків, автоматичних переривачів струму тощо.

Інтелектуальні матеріали. Ці матеріали називають матеріалами майбутнього. Зараз із-за високої ціни їх використовують, в основному, в ракето- і літакобудуванні, підводних системах тощо. В невеликих обсягах їх застосовують також в автомобілебудуванні, медицині, засобах зв'язку, астрономічній техніці. При цьому застосовують мікро- і нанотехнології.

"Інтелектуальні матеріали" часто використовують в якості

оболонки конструкцій спеціального та силового призначення, в яких унаслідок введення датчиків (комфортні датчики, мікросенсори), виконавчих механізмів (актюатори, матеріали й процесори мікромеханіки), систем зв'язку і керування (мікрооптикоелектроніка, мікропроцесорна техніка) реалізується можливість самодіагностики (самоінформації, пристосування, адаптування). Багато "інтелектуальних матеріалів" застосовано в літаках п'ятого покоління, що забезпечує повне адаптування їх конструкцій до змін зовнішніх впливів. Наприклад, у літаків аероактивні крила можуть змінювати форму залежно від умов польоту. Є літаючі апарати, що можуть складати крила або мають телескопічні крила, як у крилатої ракети Томагавк, які можуть змінювати геометрію за допомогою радіокерування. "Інтелектуальні матеріали" застосовують також при створенні мініатюрних літаючих апаратів. Наприклад, літак розміром із долоню може виконувати аерозйомки на кінокамеру на відстані 12 км (1999 р.). Мікровертоліт (2004 р.) має висоту 7 см, масу 8,9 г, лопати діаметром 13 см і 4 мікродвигуни.

1.7.8. Чавуни, їх класифікація та властивості

Чавуни – це залізовуглецеві сплави з умістом вуглецю від 2,14 до 6,67 %. Практично застосовують чавуни із умістом вуглецю більш як 2,5 і менш як 4 %. Чавуни в порівнянні зі сталями мають меншу температуру плавлення і володіють гарною рідинотекучістю завдяки евтектичному складу структури. А куванню та іншим видом обробки тиском вони не піддаються. Завдяки цим властивостям вироби з чавунів виготовляють переважно методами ливарного виробництва. Залежно від складу структури і особливостей властивостей, чавуни поділяють на білі, сірі, ковкі високоміцні і зі спеціальними властивостями. Основою структури білих чавунів є цементит, у інших чавунів в структурі міститься графіт різної форми: у сірих чавунів графіт має пластинчасту форму, у ковких – пластівчасту, у високоміцних – кулясту, у вермікулярних – округлу черв'ячну (рис. 1.36). Властивості цих чавунів більшою мірою залежать від форми графіту. В основному, чавуни – крихкі матеріали. Вони характеризуються більшою міцністю при стисканні (у 2...4 рази), ніж при розтягу. Ця особливість повинна враховуватись при їх експлуатації.

Білі чавуни. Структура білих чавунів описана в розділі 1.21. Весь вуглець у них міститься у вигляді цементиту, що має білий колір.

Визначають відношення чавуну до білого за кольором злому зразка діаметром 30 мм і довжиною 150 мм. Коли злом білий, чавун називається білим.

Металева основа	Форма включень графіту			
	Пластинчата	Пластівчаста	Куляста	Вермікулярна
Ферит				
Ферит і перліт				
Перліт				

Рис. 1.36. Схематичне зображення мікроструктур чавунів із різними формами графіту

Білі чавуни не мають спеціального маркування. Їх позначають у документах словами "Білий чавун". Ці чавуни тверді ($\approx HV7000$ МПа), крихкі, але володіють високою зносостійкістю. З них виготовляють мелючі тіла млинів, щоки дробарок, зубці ковшів екскаваторів тощо. Крім того, білий чавун йде на перероблення у сталь або за допомогою термообробки його трансформують у ковкий чавун.

Сірі чавуни. Існують чавуни з іншою структурою, ніж та, яку мають білі чавуни. В структурі сірих чавунів нема цементиту. Замість нього міститься графіт (рис. 1.36).

Перетворення цементиту в графіт $Fe_3C \rightarrow 3Fe + C$ відбувається або за дуже повільного охолодження чавуну, або коли чавун містить багато кремнію, нікелю, або за одночасного впливу обох цих факторів. У сірих чавунах графіт має форму пластин, гострі кути яких діють як потужні концентратори напруження, внаслідок чого знижується міцність і з'являється крихкість металу.

У маркуванні сірі чавуни позначають буквами СЧ, які вказують на

найменування чавуну, й числом, що відображає межу міцності під час розтягу σ_B у 10^{-1} МПа. Наприклад, для сірого чавуну СЧ45 $\sigma_B = 450$ МПа.

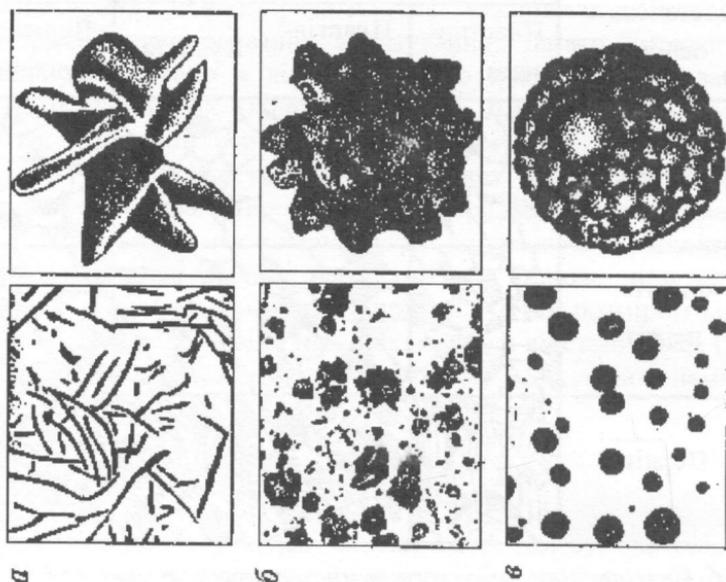


Рис. 1.37. Реальні мікроструктури сірого (а), ковкого (б) і високоміцного (в) чавунів із феритною основою і, відповідно, окремо виділені графітові включення цих чавунів

На властивість сірих чавунів впливає структура. За структурою сірі чавуни поділяють на феритно-графітні, феритно-перлітні з уключеннями графіту та з перлітною основою (рис. 1.36). Із збільшенням у структурі перліту міцність чавунів підвищується. А якщо основою чавуну є ферит і зерна мають великі розміри, чавун характеризується низькою міцністю.

До феритно-графітних чавунів належать СЧ10...СЧ20. З них виготовляють маловідповідальні і середньонавантажені деталі – корпусні деталі для редукторів і підшипників, гальмові барабани, каналізаційні труби тощо. Більш міцні сірі чавуни в основі мають феритно-перлітну і перлітну структури з більш дрібними зернами. Це чавуни марок СЧ25, СЧ30, СЧ45 та інші. Такі чавуни застосовують для більш міцних деталей (гільзи блоків циліндрів, вали, зубчасті колеса тощо).

Ковкі і високоміцні чавуни мають уключення графіту пластівчастої, кулястої або вермікулярної форми й тому характеризуються більшими показниками міцності, а також в'язкістю.

Ковкі чавуни отримують шляхом відпалювання білих доевтектичних чавунів при температурі $\approx 1000^\circ\text{C}$ протягом 10 годин (I стадія) з наступним охолодженням при температурі $760\dots 720^\circ\text{C}$ (II стадія) (рис. 1.37). В результаті такої термічної обробки на першій стадії відбувається перетворення цементитної фази Fe_3C на аустеніт і графіт ($\text{Ц} \rightarrow \text{A}+\text{Г}$). В другій фазі, залежно від витримки при $760\dots 720^\circ\text{C}$, відбуваються наступні перетворення. Якщо не виконується витримка при цій температурі й чавун охолоджується повільно до кімнатної температури після першої фази, тоді аустеніт перетворюється в перліт і структура чавуну стає перлітно-графітною. Коли ж продовжувати витримку при цих температурах, тоді буде відбуватися поступове перетворення цементиту перліту на ферит (Φ) та графіт (Γ). В результаті з початку буде утворюватись перлітно-феритна структура з уключенням графіту, а при подальшій витримці – феритно-графітна структура (рис. 1.37). Таким чином при всіх варіантах термічної обробки білого чавуну зникає цементитна складова структури, утворюється графітна фаза у вигляді пластівців (рис. 1.36) і чавун стає менш крихким та більш пластичним.

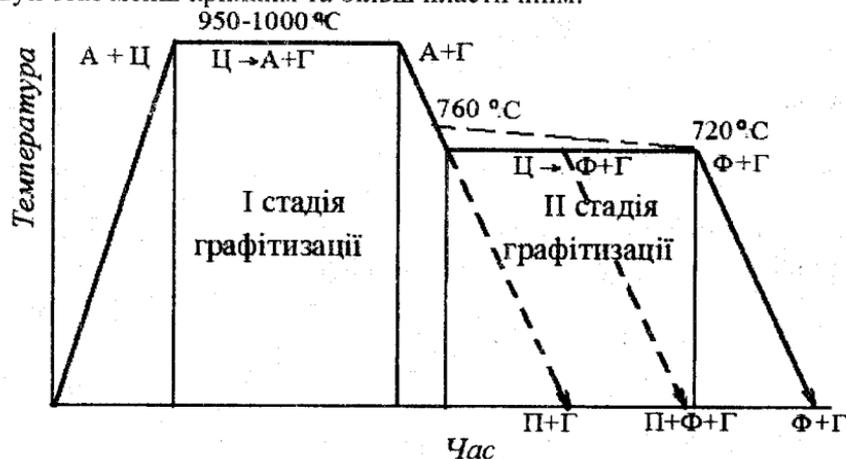


Рис. 1.37. Схема термічної обробки білих чавунів для перетворення їх у ковкі чавуни з різними структурами

Маркують ковкі чавуни буквами КЧ, які означають «ковкий чавун», і цифрами. Перша група цифр – показник межі міцності $\sigma_{\text{в}}$ у 10^1 МПа, а друга – відносне видовження δ у відсотках. Наприклад, КЧ50-4: $\sigma_{\text{в}} =$

500 МПа, $\delta = 4\%$. Ковкі чавуни бувають таких марок: КЧ30-6, КЧ33-8, КЧ35-10, КЧ37-12, КЧ45-6, КЧ50-4, КЧ56-4, КЧ60-3, КЧ63-2. З ковких чавунів виготовляють гальмові колодки, картери редукторів, кроки, скоби, фланці, елементи карданних валів, ланцюги та ролики конвеєрів тощо.

Високоміцні чавуни – це чавуни з кулеподібним графітом, який утворюється в структурі відливка в процесі кристалізації. Графітна складова структури у вигляді кульок круглястої форми (рис. 1.36 і 1.37) менше знижує міцність чавуну, ніж пластинчатий графіт сірого чавуну, тому що не є активним концентратором напружень. Кулясту форму графіт отримує в результаті модифікації чавуну магнієм, церієм або іншими поверхнево активними речовинами ще в розплавленому стані. Після кристалізації форма кульки зберігається.

За механічними властивостями (крім в'язкості) високоміцні чавуни не поступаються вуглецевим сталям, тому їх часто застосовують в якості заміників цих сталей. Але вони мають кращу рідинотекучість, вищу зносостійкість та оброблюваність різанням.

За ДСТУ 3925-99 високоміцні чавуни маркують буквами ВЧ, які означають "високоміцний чавун" і цифрами. Перші цифри вказують межу міцності σ_B у МПа, решта – відносне видовження за розтягання δ у відсотках. Наприклад, ВЧ600-3: $\sigma_B = 600$ МПа, $\delta = 3\%$. Високоміцні чавуни бувають таких марок: ВЧ350-22, ВЧ400-15, ВЧ420-12, ВЧ450-10, ВЧ450-5, ВЧ500-7, ВЧ500-2, ВЧ600-3, ВЧ700-2, ВЧ800-2, ВЧ900-2, ВЧ1000-2.

З цих чавунів виготовляють відливки конструкційного машинобудівного призначення: колінчасті вали двигунів, поршневі кільця, зубчасті колеса, прокатні валки тощо. Вони задовільно обробляються різанням. Виготовляють із них також санітарно-технічне і будівельне обладнання: кроки, косинці, трійники, фітинги, радіатори тощо.

Чавун із вермикулярним графітом характеризується високими ливарними, механічними та теплофізичними властивостями. Графіт має округлу черв'ячну форму (лат. *vermiculus* – черв'ячок), завдяки чому міцність цього чавуну більша за міцність сірого чавуну (рис. 1.36). Згідно з ДСТУ 3926-99, чавун із вермикулярним графітом маркують так: спочатку ідуть літери ЧВГ (чавун, вермикулярний графіт), далі – цифрове позначення межі міцності за розтягування у МПа та через дефіс – значення відносного видовження δ у відсотках. Наприклад, ЧВГ 400-4: $\sigma_B = 400$ МПа, $\delta = 4\%$.

Чавуни із спеціальними властивостями. До цієї групи за ДСТУ

3362-96 належать жаростійкі, жароміцні і корозійностійкі чавуни. При маркуванні цих чавунів попереду ставлять літеру Ч (чавун), легуючі елементи позначаються такими ж літерами, як при маркуванні легованих сталей: С – кремній, Х – хром, Н – нікель, Д – мідь і т. д.. Цифри після букв указують уміст легуючого елемента у відсотках. Наприклад, у чавуні ЧН15Д7 міститься 15% нікелю і 7% міді.

Для надання певних властивостей чавуни легують. Для надання жаростійкості до чавунів додають хром (ЧХ28) і кремній (ЧС5). Їх жаростійкість дорівнює 700...800°C. Ці марки чавунів використовують для виготовлення деталей, що працюють у рідкому, газовому, повітряному середовищах (склоформи, кокілі, вихлопні колектори дизелів тощо).

Для поліпшення корозійної стійкості застосовують чавуни з підвищеним умістом кремнію (ЧС13, ЧС17) і хрому (ЧХ22, ЧХ32). Вони протистоять дії сірчаної, азотної та інших кислот. Для підсилення корозійної стійкості до кремністих чавунів додають молібден (СЧ15М4, СЧ17М3). Такі чавуни називають антихлорами. Висококремністі і хромісті чавуни застосовують для виготовлення деталей хімічного обладнання. Чавуни ЧХ28 і ЧХ34 характеризуються підвищеною хімічною стійкістю при температурах до 1150°C. Їх використовують для виготовлення важконавантажених деталей, що працюють в агресивних середовищах. Підвищує жаростійкість також алюміній. Отже, чавуни ЧЮХШ і ЧЮ7Х2 витримують температуру 650 і 750°C відповідно, а чавун ЧЮ30 – навіть 1100°C.

В якості жароміцних виробів із високою термостійкістю застосовують аустенітні чавуни (ЧН15Д3Ш, ЧН11Г7Ш). Нікель у цих чавунах є стабілізатором аустенітної структури.

До чавунів зі спеціальними властивостями можна віднести також антифрикційні чавуни.

Антифрикційні чавуни – це чавуни з достатньою кількістю в структурі графітних включень. Графіт є твердим мастилом, що знижує коефіцієнт тертя. З антифрикційних чавунів виготовляють підшипники ковзання, втулки та інші деталі, що працюють у парі з металом.

Виготовляють сірі, ковкі або високоміцні антифрикційні чавуни. При маркуванні спочатку ставлять літеру А (антифрикційний), далі – літери Ч (чавун), С (сірий), К (ковкий), В (високоміцний) і номер. Наприклад, АЧВ-1 – антифрикційний високоміцний чавун із номером 1.

Деталі, що працюють у парі із загартованими сталевими валами, виготовляють із чавунів із перлітною основою, а для роботи в парі з термічно необробленими валами – з перлітно-феритною основою.

Перлітну основу мають чавуни АСЧ-1, АСЧ-2, АКЧ-1, АЧВ-1, а перлітно-феритну основу – чавуни АСЧ-3, АКЧ-2, АВЧ-2. Більш міцними є чавуни марок АЧВ і АКЧ.

Контрольні запитання для самостійної підготовки

1. Що собою являє чавун? Які властивості мають чавуни, де їх застосовують?
2. Як класифікують чавуни? Опишіть маркування чавунів і їх властивості.
3. За якими ознаками маркують сталі? Наведіть приклади маркування вуглецевих і легованих сталей.
4. Які сталі належать до вуглецевих? Як їх класифікують, які вони мають властивості і де застосовуються?
5. Які сталі належать до легованих? Як їх класифікують, які властивості вони мають і де їх застосовують? Яку перевагу вони мають порівнянно з вуглецевими сталями?
6. Які сталі належать до легованих конструкційних будівельних сталей? Якими ознаками характеризуються низьколеговані будівельні сталі? Які властивості вони мають і де їх застосовують?
7. Які сталі належать до арматурних? Як їх маркують? Якими властивостями вони характеризуються і де їх застосовують?
8. Які сталі належать до легованих конструкційних машинобудівних сталей? Як їх маркують? Наведіть приклади.
9. Які сталі належать до машинобудівних сталей, призначених для холодного штампування? Як їх маркують? Наведіть приклади.
10. Які сталі належать до цементованих і поліпшуваних машинобудівних сталей? Чим вони відрізняються? Наведіть приклади.
11. Які сталі належать до ресорно-пружинних сталей? Наведіть приклади.
12. Які сталі належать до групи сталей з підвищеною оброблюваністю різанням? Як їх маркують? Наведіть приклади.
13. Які сталі належать до групи зносостійких аустенітних і підшипникових сталей? В чому їх схожість і чим вони відрізняються? Наведіть приклади.
14. Які сталі належать до високоміцних і жароміцних матеріалів? В чому їх схожість і чим вони відрізняються? Наведіть приклади.
15. Наведіть приклади кріогенних і корозійностійких сталей. В чому їх схожість і чим вони відрізняються?

1.8. СПЛАВИ КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ

1.8.1. Загальна характеристика сплавів кольорових металів

До кольорових металів належать такі метали, як алюміній, мідь, титан тощо. Компоненти, які додають до цих металів для утворення сплавів, змінюють їх властивості. Зазвичай при цьому відбувається збільшення міцності, твердості, електроопору та зменшення в'язкості, пластичності, електро- і теплопровідності.

За технологічними ознаками сплави поділяють на ті, що деформуються, та ливарні.

До *сплавів, що деформуються*, належать сплави, здатні пластично деформуватися у холодному і нагрітому стані. Звичайно пластична деформація властива однофазним сплавам, що являють собою тверді розчини. Для підвищення міцності цих сплавів у структурі допускається невелика кількість евтектичних складових.

Сплави двофазні, неврівноважені і такі, що мають дендритну ліквіацію, звичайно не підлягають пластичній деформації. Їх відносять до *ливарних* сплавів. Вони характеризуються високою рідинотекучістю, порівняно невеликою усадкою, відсутністю утворення гарячих тріщин і пористості. Найкращі ливарні властивості мають сплави евтектичного типу. У зв'язку з цим у ливарних сплавів кількість легувальних компонентів більша, ніж у сплавів, що деформуються.

Кольорові сплави поділяють також на такі, які зміцнюються термічною обробкою, і такі, що не зміцнюються. Термічною обробкою, яка дає змогу зміцнити сплав, є *старіння*, яке складається з двох етапів: гартування і наступного старіння. Процеси старіння й етапи його виконання описані в розділі 1.6.6 "Старіння". В результаті цієї термічної обробки відбувається значне зміцнення сплаву і зниження його в'язкості й пластичності. Зміцнення сплавів за цим видом термічної обробки називають *дисперсійним твердінням*.

Застосовують також відпалювання, до якого вдаються тоді, коли потрібно ліквідувати небажані наслідки, пов'язані з неврівноваженим станом структури, за якого спостерігається знижена пластичність, низька корозійна стійкість, недостатня деформаційна здатність, а також напружений стан виробу, зумовлений термічним або механічним впливом.

1.8.2. Алюміній і сплави на його основі

Алюміній має температуру плавлення 660°C , малу щільність ($2,7\text{г}/\text{см}^3$), високу електропровідність ($\rho = 0,0269 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$), яка становить 65 % електропровідності міді.

Механічні властивості алюмінію високої чистоти (99,995 % Al) після відпалювання такі: $\sigma_{\text{в}} = 50 \text{ МПа}$, $\sigma_{0,2} = 15 \text{ МПа}$, $\delta = 50 \%$. Алюміній, як конструкційний матеріал, не використовують. Але сплави на його основі широко використовують у машинобудуванні, будівництві, авіації і т. п. Застосування цих сплавів дозволяє будувати транспортні об'єкти з меншою вагою (на 20...25%), що дає можливість зменшити витрати пального та покращити інші показники виробів.

Алюмінієві сплави характеризуються високою міцністю, високими тепло- і електропровідністю та корозійною стійкістю. Вони добре зварюються і обробляються різанням. За технологічною ознакою їх поділяють на такі, що деформуються, та ливарні, а також на такі, що їх зміцнюють, і такі, що не зміцнюють термічною обробкою (гартуванням та старінням).

Алюмінієві сплави, що деформуються – це сплави систем Al – Mg, Al – Mn, Al – Cu, Al – Cu – Mg. Їх маркують літерами і цифрами. Літери означають: А – алюміній, Д – дюралюміній, АМг – алюмінієвий сплав, що містить магній, АМц – алюмінієвий сплав, що містить манган, АК – алюмінієвий сплав, що кується; цифри – це номери сплавів. Після номера можуть стояти літери, які вказують на стан сплаву: М – м'який (відпалений), Т – термічно оброблений (гартування і старіння), Н – нагартований, П – напівнагартований.

Сплави типів АМг і АМц належать до сплавів, які *не зміцнюють термічною обробкою*. Вони відрізняються добрими пластичністю, зварністю і корозійною стійкістю. Перед застосуванням їх відпалюють за температури $350\text{...}420^{\circ}\text{C}$. Сплави з більшим номером містять більшу кількість легувальних домішок, завдяки чому характеризуються більшою міцністю. Наприклад, $\sigma_{\text{в}}$ підвищується від 110 МПа (АМг1) до 430 МПа (АМг6) за відповідного зниження відносного видовження з 28% до 16%.

Сплави АМг і АМц застосовують для виготовлення виробів у спосіб глибокої витяжки, зварювання: будівельних конструкцій, трубопроводів, баків для бензину та олії, деталей ліфтів, рам вагонів тощо.

До сплавів, що *зміцнюються термічною обробкою*, належать

сплави системи Al - Cu, Al - Cu - Mg. Згідно з діаграмою Al - Cu, розчинність міді в алюмінії становить за кімнатної температури 0,1%, а за евтектичної - 5,65%. Це дає можливість виконувати гартування з утворенням пересиченого розчину міді в алюмінії, а після старіння - значно підвищувати міцність сплавів. До них належать дюралюміни таких марок: Д1, Д16, Д18 і сплави В95, В96, АК6, АК8 тощо. Під час гартування сплави Д16, Д18 нагрівають до 495...505°C, Д1 - до 500...510°C і охолоджують у воді за 40°C. Природне старіння виконують протягом 5...7 діб. Температура штучного старіння - 190...200°C.

З дюралюміну виготовляють багато деталей для авіації (лопати повітряних гвинтів, шпангоути, тяги керування), а також для інших галузей господарства (кузови автомобілів, труби, заклепки тощо).

Сплавам типу АК властиві добра пластичність та стійкість до утворення тріщин за гарячої пластичної деформації. Вони відрізняються більш високим умістом кремнію. Кування та штампування сплавів типу АК виконують за температури 450...475°C. До сплавів застосовують гартування і старіння. Сплав АК6 більш пластичний, але менш міцний, ніж сплав АК8. Тому перший сплав використовують для виготовлення середньонавантажених, а другий - для високонавантажених деталей нескладної форми.

Високоміцні сплави типу В95, В96 після термічної обробки можуть мати такі механічні характеристики: $\sigma_B = 600...700$ МПа, $\sigma_{02} = 450...550$ МПа, $\delta = 7...10\%$. Незважаючи на високу міцність, сплави мають недолік - низькі пластичність і в'язкість. Усунути цю ваду можна завдяки поліпшеному старінню, після якого міцність знижується (до $\sigma_B = 540...590$ МПа, $\sigma_{02} = 410...470$ МПа), а відносне видовження підвищується до $\delta = 10...13\%$. Ці сплави застосовують для таких деталей, як обшивка, спрингери, шпангоути, лонжерони літаків тощо.

Ливарні алюмінієві сплави позначають буквами АЛ і цифрами, які вказують на порядковий номер сплаву: АЛ1, АЛ2 ... і т. п. За хімічним складом ливарні алюмінієві сплави поділяють на п'ять груп: 1) сплави на основі системи «алюміній - кремній» (силуміни); 2) сплави на основі системи «алюміній - манган»; 3) сплави на основі системи «алюміній - мідь»; 4) сплави на основі системи «алюміній - мідь - кремній»; 5) сплави на основі системи «алюміній - кремній - цинк».

Найкращі ливарні властивості мають силуміни завдяки тому, що їх структура складається майже із самої евтектики. У подвійних сплавах алюмінію з кремнієм евтектика містить твердий розчин і кристали практично чистого кремнію; в легованих силумінах (АЛ4 та ін.), крім

подвійної, є потрійні і більш складні евтектики. У подвійних силумінів унаслідок збільшення вмісту кремнію до евтектичного складу (11,6 % Si) знижується пластичність та збільшується міцність. Звичайно силуміни не зміцнюються термічною обробкою. Для зміцнення їх модифікують натрієм у кількості, що становить 2...3% маси сплаву. При цьому сплав (АЛ2) стає більш пластичним. Модифікують як подвійні, так і леговані силуміни.

Для легування силумінів використовують Mg, Cu, Mn, Ni тощо. Вони підвищують міцність, пластичність та інші властивості. Мідь поліпшує оброблюваність різанням, титан діє як модифікатор. Крім того, мідь і магній надають сплавам здатність до зміцнення за термічної обробки. Температура гартування різних силумінів становить 515...535°C, температура старіння – 150...180°C. З легованих силумінів найчастіше застосовують сплави з домішками магнію (АЛ9), магнію й мангану (АЛ4). Леговані силуміни застосовують для виготовлення середніх і великих деталей, таких, як корпуси компресорів, картери, головки циліндрів тощо. У виготовленні блоків циліндрів, головок блоків та інших деталей автомобілів віддають перевагу сплаву АЛ32, який характеризується добрими ливарними властивостями, оброблюваністю різанням, гарною зварністю, корозійною стійкістю. Сплав має високу міцність ($\sigma_B = 270$ МПа, $\sigma_{0.2} = 160$ МПа, $\delta = 3\%$), призначений для лиття під тиском. Манган і титан, які містяться у сплаві, а також велика швидкість кристалізації сприяють утворенню метастабільної структури під час лиття під тиском. Це дає змогу зміцнювати відливки зі сплаву АЛ32 шляхом штучного старіння без попереднього гартування.

1.8.3. Мідь та сплави на її основі

Мідь – метал червоного кольору; температура плавлення – 1083 °C; температура кипіння – 2360°C, щільність – 8,94 г/см³; електроопір – 0,015...0,283 Ом *мм²/м. Домішки фосфору, кремнію, заліза, сурми і кобальту знижують електропровідність міді.

Механічні властивості відливоків із міді невисокі: $\delta = 25\%$; $\sigma_B = 160$ МПа; $\sigma_{0.2} = 35$ МПа. Тому її використовують переважно як електротехнічний матеріал. Легування міді підвищує її механічні властивості, що дає можливість на її основі виготовляти конструкційні матеріали. Сплави на основі міді поділяють на ті, що деформуються та ливарні, а також на такі, які зміцнюються або не зміцнюються

термічною обробкою. Їх поділяють також на латуні, бронзи і мідно-нікелеві сплави.

Латунь – це сплав міді, в якому основним легувальним елементом є цинк. Латуні міцніші, твердіші, стійкіші до корозії й дешевші, ніж чиста мідь. Вони добре обробляються тиском і мають високі ливарні властивості. За хімічним складом латуні поділяють на прості й спеціальні. Прості латуні – це сплави на основі міді і цинку. Коли в латуні більш ніж 43% цинку, її міцність зменшується, а крихкість збільшується, тому застосовують латуні, що містять до 44 % цинку. Основні марки простих латуней: Л96, Л90, Л85, Л80, Л68, Л63. Буква Л означає латунь, а цифри – середній уміст міді у процентах, решта – цинк.

Спеціальні латуні у своєму складі, крім міді і цинку, містять легувальні елементи: свинець, олово, залізо та інші. Для маркування спеціальної латуні, що деформується, цифрами позначають процентний уміст елементів, причому, перші дві з них указують на вміст міді, а букви – на наявність легувальних елементів: С – свинець, О – олово, Ж – залізо, Мц – манган, А – алюміній, К – кремній. Ц – цинк. Число після літер означає середній уміст елементів у латуні, крім цинку. Вміст цинку визначають за різницею від 100%. Наприклад, марка ЛС59-1 означає, що латунь містить 59 % міді, 1 % свинцю, решта – 40 % цинку. В ливарних латунях уміст компонентів у відсотках указують відразу ж після літер, що позначають ці компоненти, вміст міді визначається за різницею від 100%. Наприклад, ЛЦ16К4 – ливарна латунь (16% Zn, 4% Si, решта – мідь).

У латуней із підвищенням умісту цинку зростають і міцність, і пластичність. Відносне видовження сягає максимуму за 30...32% Zn, а потім різко зменшується.

Показник межі міцності латуней підвищують алюміній та олово і, меншою мірою, манган. Домішки свинцю призводять до зниження міцності. Але свинець поліпшує антифрикційні властивості і оброблюваність різанням.

Бронза – це сплав міді з різними хімічними елементами, окрім цинку. Але цинк в обмеженій кількості може бути доданий як легувальна домішка. За технологічним призначенням бронзи поділяють на ливарні і такі, що деформуються, а за хімічним складом – на олов'яні та безолов'яні.

Бронзи, що деформуються маркують: спочатку ставлять літери Бр (бронза), далі йдуть такі самі буквені позначення складових елементів сплаву, як і для латуней, а далі – цифри, які позначають кількісний склад цих елементів у відсотках. Наприклад, маркування БрОЦС5-5-5

означає, що бронза містить 5 % олова, 5 % цинку і 5 % свинцю, а 85 % становить мідь. У ливарних бронзах уміст усіх компонентів у відсотках зазначають відразу після літер, що позначають ці компоненти. Вміст міді визначається за різницею від 100%. Наприклад, БрА10Ж3. Вміст міді в цій брoзі буде дорівнювати 87 %.

Олов'яні бронзи леговані лише оловом, безолов'яні - іншими компонентами (алюмінієм, берилієм, кремнієм, свинцем тощо). Відповідно до вмісту легувальних компонентів безолов'яні бронзи мають такі назви: алюмінієві, берилієві, кремнієві, свинцеві тощо.

Олов'яні бронзи мають високі механічні, а також антикорозійні, ливарні й антифрикційні властивості, добре обробляються різанням. Їх застосовують для виготовлення відливок та вкладишів підшипників ковзання. Недостатня міцність і висока вартість обмежують застосування олов'яних бронз.

Безолов'яні бронзи – алюмінієві, крем'янисті, берилієві та інші - в більшості випадків за механічними властивостями кращі за олов'яну бронзу і дешевші.

Алюмінієві бронзи (БрА5, БрАЖ9-4 тощо) дешевші за олов'яні і за хімічною стійкістю, механічними і антифрикційними властивостями їм не поступаються. З них виготовляють шестерні, втулки та інші деталі, які працюють в умовах тертя в парі з металами.

Крем'янисті бронзи вміщують до 3 % кремнію, вони міцні і в багатьох випадках успішно замінюють олов'яну бронзу. Для покращення властивостей більшість із них легують невеликою кількістю мангану і нікелю (БрКН 1-3, БрКН-0,5-2). Для зміцнення їх термічно обробляють - застосовують старіння, після чого межа міцності може досягати $\sigma_B \approx 700$ МПа при відносному видовженні $\delta \approx 8\%$. З крем'янистих бронз виготовляють деталі, що працюють у важких умовах тертя і пружини.

Берилієві бронзи характеризуються високими значеннями міцності та пружності, електро- й теплопровідністю, опором утомленості та корозії. Берилієві бронзи термічно зміцнюються гартуванням з 800°C і наступним старінням при 325°C. Найбільш поширена бронза Бр2, властивості якої після гартування становлять: σ_B - до 500 МПа, δ - до 40%, а після гартування і старіння - $\sigma_B = 1100...1200$ МПа, $\delta = 4...6\%$. Ця бронза має пружні властивості, відмінну зносостійкість, зберігає високі тепло- і електропровідність, працює при температурах від мінус 250 до плюс 250°C, не дає іскру.

Свинцеві бронзи мають високі антифрикційні властивості, завдяки чому їх використовують у навантажених підшипниках ковзання (опорні

та шатунні підшипники потужних турбін, авіадвигунів, дизелів тощо). Найчастіше застосовують бронзи БрС30 і БрОС5-25.

З ливарних бронз відливають складної форми відливки, такі, як водопровідна арматура, підшипники ковзання тощо. Деформовані бронзи поставляються у вигляді прутків, дроту, трубок, стрічок і широко застосовуються, бо вони мають високі механічні та технологічні властивості.

Мідно-нікелеві сплави. Нікель істотно зміцнює мідь та надає мідним сплавам високу корозійну стійкість. До цієї групи сплавів належать мельхіор, нейзильбер, куніаль.

Мельхіори МНЖМц30-1-1 і МН19 використовують в ювелірній промисловості.

Нейзильбери можуть вміщувати до 35%Ni і до 45%Zn. Частіше застосовують МНЦ 15-20. Сплав призначається для виготовлення деталей точної механіки, пружних деталей в електротехніці, медицині тощо.

Куніалі складаються з міді, нікелю та алюмінію. Ці сплави зміцнюють гартуванням і старінням, вони не схильні до холодноламкості й мають високі механічні властивості при звичайних та низьких температурах (-180°C), гарну корозійну стійкість у воді. Наприклад, у сплаві МНА6-1,5 при температурі -180°C $\sigma_B = 700$ МПа і $\psi = 67\%$. Використовують куніалі для виготовлення пружин та інших деталей в електротехніці.

Контрольні запитання для самостійної підготовки

1. Що таке бронзи? Їх склад, властивості та використання в автомобільній промисловості.
2. Назвіть склад бронзи марки БрАЖ 5-1-1.
3. Що таке латуні, їх склад, властивості та використання в автомобільній промисловості.
4. Який склад мельхіорів, нейзильберів і куніалів? Їх властивості та використання в промисловості.

1.8.4. Титан і його сплави

Титан – метал світло-сірого кольору; температура його плавлення - 1668°C. Титан має дві алотропічні модифікації: α - титан і β - титан. Температура алотропічного перетворення дорівнює 882°C. За температур, нижчих від цієї, існує α -титан (з гексагональною кристалічною ґраткою), а за вищих - β -титан (з кубічною

об'ємноцентрованою кристалічною граткою). Завдяки алотропічним перетворенням можна здійснювати термічну обробку титанових сплавів.

Титан характеризується малою щільністю ($\rho = 4,51 \text{ г/см}^3$), високими значеннями міцності, в'язкості і високою корозійною стійкістю (на порядок вищою за корозійну стійкість нержавіючих сталей). Але за температур, вищих від 500°C , титанові сплави швидко окислюються, внаслідок цього зварювання титану можливе лише в захисній атмосфері або у вакуумі.

Легувальні елементи в титанових сплавах підвищують міцність завдяки утворенню твердих розчинів або інтерметалідів, а також впливають на температуру алотропічних перетворень. Алюміній, азот, кисень підвищують температуру алотропічних перетворень. Їх називають α - стабілізаторами, тому що вони забезпечують утворення стабільної структури з α - кристалічною граткою. Титанові сплави з такою структурою називаються α -титановими. Залізо, молібден, хром, ванадій і манган знижують температуру алотропічних перетворень. Їх називають β -стабілізаторами, а сплави з β - кристалічною граткою – β -титановими сплавами. Сплави, що містять α - і β -фази, називають ($\alpha + \beta$) – сплавами. Практичне застосування знайшли α - і ($\alpha + \beta$) – сплави.

Сплави з α - структурою не зміцнюються після термообробки. Їх використовують у відпаленому або нормалізованому стані. До них належать такі марки сплавів: ВТ5 ($\sigma_B = 775 \dots 880 \text{ МПа}$, $\delta = 10 \dots 14 \%$), ОТ4 ($\sigma_B = 685 \dots 880 \text{ МПа}$, $\delta = 10 \dots 20 \%$), ВТ20 ($\sigma_B = 930 \dots 1080 \text{ МПа}$).

Сплави з ($\alpha + \beta$) – структурою характеризуються кращим поєднанням механічних і технологічних властивостей. Вони міцніші, добре куються й штампуються, здатні до термічної обробки. До них належать сплави марок ВТ9 ($\sigma_B = 1180 \text{ Мпа}$, $\delta = 6\%$), ВТ16 ($\sigma_B = 1275 \dots 1370 \text{ МПа}$, $\delta = 5 \dots 6 \%$, $KC = 40 \dots 60 \text{ Дж/см}^2$) та інші. У дужках зазначено механічні властивості, отримані після термічної обробки, - гартування і наступного старіння.

Сплави титану володіють ефектом надпластичності, яке виникає внаслідок зернограничного ковзання, коли дрібні зерна металу змінюють положення відносно один до одного таким чином, що при розтягу зразка їх кількість у поперечному перерізі зменшується і збільшується в напрямку осі деформації. Явище надпластичності використовується в новій технології протягування металу.

Завдяки унікальним властивостям, а також високим значенням питомої міцності, сплави на основі титану застосовують в авто-, авіа-,

судно- та ракетобудуванні (паливні баки, обшивка літаків, суден, гребні гвинти тощо), хімічному машинобудуванні і харчовій промисловості (реактори, котли, резервуари тощо), у медичній галузі (інструменти, апаратура для виготовлення медикаментів) та в багатьох інших галузях промисловості. Висока вартість стримує широке застосування титану і його сплавів.

1.8.5. Магній та його сплави

Характерними властивостями магнію є мала щільність ($1,74 \text{ г/см}^3$), температура плавлення $650 \text{ }^\circ\text{C}$. Технічний магній випускають трьох марок: Мг 90, Мг 95 і Мг 96 (магнію не менше 99,9, 99,95 і 99,96 % відповідно).

Механічні властивості відливка з магнію невеликі ($\sigma_B = 115 \text{ МПа}$, $\sigma_{0,2} = 25 \text{ МПа}$, $\delta = 8 \%$, $\text{НВ} = 300 \text{ МПа}$). На повітрі магній легко загоряється: використовується в піротехніці і хімічній промисловості. Сплави на основі магнію, в основному, використовують в авіаційній, автомобільній, ракетній і атомній техніці. Вони легкі, володіють високою питомою міцністю, низькою здатністю поглинати теплові нейтрони, гарно поглинають вібрацію, задовільно зварюються. Але багато з них погано опираються корозії.

Магнієві сплави поділять на ливарні (для відливок фасонних заготовок) і деформовані. Ливарні сплави позначаються буквами МЛ, а деформовані –МА, цифра вказує на номер сплаву.

Ливарні магнієві сплави поділяють на групи: з підвищеною корозійною стійкістю (МЛ2, МЛ5); середньої міцності (МЛ4, МЛ6) і жароміцні (МЛ10, МЛ14).

Сплав МЛ-2 складається з магнію та марганцю (1,5 %). Він корозійностійкий, зварюється і рекомендується для відливка простої конфігурації. Інший приклад: сплав МЛ6 вміщує 9,5 % алюмінію, 0,9 % цинку і 0,3 % марганцю. Це високоміцний сплав із добрими ливарними властивостями, який використовується для відливка високо- і середньонавантажених деталей.

Деформуємі магнієві сплави створюють на основі магнію-марганцю, магнію-алюмінію-цинку, магнію-цинку. Наприклад, сплав МА1 містить 1,3 – 2,5 % марганцю, відрізняється достатньою пластичністю і корозійною стійкістю, добре обробляється різанням та зварюється.

Більшість магнієвих сплавів не поступається питомою міцністю

алюмінієвим сплавам і деяким маркам сталей. Заміна останніх більш легкими магнієвими сплавами може дати значний вигреш у масі конструкції.

Одним з останніх методів підвищення механічних властивостей магнієвих сплавів став метод високошвидкісної кристалізації з утворенням гранул розплавленого сплаву. Спосіб дозволив підвищити механічні властивості в 1,3...1,5 разу, КСЧ – в рази. Цим способом зі сплаву МА2-1гр виготовлені труби, діаметр яких становить до 300 мм, поршні двигунів внутрішнього згорання, рами велосипедів

На основі кольорових металів та їх сплавів виготовляють триботехнічні матеріали.

Контрольні запитання для самостійної підготовки

1. Що собою являють титанові сплави? Які властивості вони мають, де їх застосовують?
2. Що собою являють магній і його сплави? Які властивості вони мають, де їх застосовують?

2. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЗВАРЮВАННЯ

2.1. Сутність зварювання

Згідно з ДСТУ 3761.2 2-98, *зварюванням* називають технологічний процес одержування нероз'ємного з'єднання між заготовками за допомогою нагрівання (місцевого або загального) та плавлення чи (і) пластичного деформування стисканням заготовок у місцях з'єднання. При цьому з'єднання повинно мати фізичні і механічні властивості, що наближаються до властивостей з'єднаних заготовок.

Для успішного зварювання треба наблизити поверхні двох заготовок на відстань, що дорівнює міжатомній відстані кристалічної ґратки металу. Однак цьому заважають дві обставини. По-перше, поверхні заготовок вкриті оксидами та плівками адсорбованих газів і рідин. Ці плівки мають товщину, більшу за міжатомну відстань, на декілька порядків. По-друге, поверхні заготовок не є ідеально рівними, вони мають рельєф з впадинами і виступами. Різниця між впадинами й виступами теж перевищує міжатомні відстані кристалічних ґраток металів на багато порядків. Для подолання цих перешкод із метою створення нероз'ємного з'єднання застосовують зварювання плавленням і зварювання тисненням.

Зварювання плавленням здійснюється шляхом нагрівання крайків металів і присадкового металу (коли він надається) до їх розплавлення. При цьому крайки деталей, що з'єднуються, розплавляються одночасно, утворюючи з розплавленого металу зварювальну ванну. Плівки на поверхні крайок металів руйнуються і спливають на поверхню металу. В результаті відбувається очищення крайок металу, завдяки цьому виникають міцні міжатомні зв'язки між атомами рідини й твердої фази. Кристалізація розплавленої ванни металу призводить до утворення міцного нерознімного з'єднання, яке має литу структуру.

Під час *зварювання тисненням* зближення поверхонь на відстань, що дорівнює міжатомній відстані, здійснюється завдяки пластичному деформуванню в зоні з'єднання. Під час механічного стискування металів у зоні з'єднання внаслідок пластичного деформування відбувається очищення поверхонь від плівок, нерівності мнуться, поверхневі плівки роздрібнюються. В результаті заготовки контактують по чистих поверхнях, завдяки чому відбувається зварювання. Процес зварювання за допомогою тиснення стає можливим, коли метал може сприймати значні пластичні деформації без руйнування. Зазвичай такі умови виникають унаслідок дії значної зовнішньої сили і нагрівання до температур, що перевищують температуру рекристалізації. У деяких випадках для зварювання тисненням метал не треба нагрівати до температури, вищої від кімнатної. Наприклад, кімнатні температури перевищують температуру рекристалізації свинцю, в результаті чого цей метал може сприймати значні пластичні деформації. Тому свинець можна зварювати за допомогою тиснення без підігрівання.

За підвищення температури амплітуди коливання атомів зростають, завдяки чому полегшуються умови отримання зв'язків між атомами деталей, що з'єднуються. Чим більша температура, тим менший тиск потрібен для зварювання, а за температури плавлення і вищої необхідний тиск дорівнюватиме нулю.

Позитивні і негативні характеристики зварювання. Перевагою зварювання є те, що в разі його застосування заощаджуються метал, час і робоча сила, спрощуються проектування, розрахунки конструкцій й технологія виготовлення виробів, отже, знижується вартість продукції. Зварні конструкції замінюють ковани і литі деталі. У цьому випадку економія металу сягає 40...50% маси виробу. В багатьох випадках зварювання є незамінним технологічним процесом. Наприклад, завдяки застосуванню зварювання стало можливим виготовлення принципово нових конструкцій: кулеподібних або циліндричної форми ємностей

для хімічної, нафтової і будівельної промисловості, унікальних гідравлічних та парових турбін, для виготовлення котрих застосовуються деталі складних форм, великої товщини і маси з різних легованих сталей, двошарових металів (біметалів) тощо.

За словами академіка Б.Є. Патона, метою зварювання є отримання конструкції, яка має вигляд сучасного і гармонійного сполучення металевих та неметалевих деталей закінченої форми і розмірів, вільних від внутрішніх напружень, що не потребують ні термічної, ні механічної обробки. Поки що ця мета є майже недосяжною, тому що під час зварювання різними способами утворюються внутрішні напруження, виникають викривлення, іноді тріщини, не досягаються точні розміри виробів тощо. Недоліками зварювання є також підвищення корозії, зниження міцності і межі витривалості зварних конструкцій. І все ж таки спеціалісти зі зварювання долають більшість цих труднощів, застосовуючи методи, завдяки яким вдається зварювати з високою точністю різні конструкції: мости (у Києві, Кам'янці-Подільському, Запоріжжі, Дніпродзержинську тощо), телебашти, масштабні скульптури (Вітчизни-матері в музеї Другої світової війни у Києві), гідротурбіни, каркаси автомобілів, станини великих за розміром екскаваторів тощо. Без застосування зварювання неможливо уявити сучасне автомобілебудування.

З кожним роком в автомобілебудуванні зростає обсяг виробничих, ремонтних і відновлювальних робіт. Одними з головних на всіх етапах виробництва і відновлення автомобілів залишаються процеси обробки металів: різка, тиск, термообробка, оцинковка, зварювання, серед яких технологічний процес зварювання є одним із найважливіших. Основне завдання зварювальної операції в автомобілі - отримання нероз'ємних з'єднань, за властивостями подібними цільним матеріалами. Вона досягається шляхом застосування сучасних способів зварювання, які можуть забезпечити підвищення якості зварних швів за рахунок зменшення внутрішніх напружень у металі і викривлення деталей при зварюванні, підвищення міцності зварних швів. Це досить складне завдання, оскільки багато деталей кузова сучасного автомобіля мають складну геометрію. При зварюванні в металі утворюються зони розігріву, і повністю уникнути усадки та викривлення металу практично неможливо. Крім цих технічних і наукових завдань, в автомобілебудуванні завжди стоїть головне завдання - підвищення продуктивності. Ця задача вирішується за рахунок застосування сучасних високопродуктивних методів зварювання, таких, як контактне, лазерне тощо, з поєднанням їх із механізацією і роботизацією процесів виробництва.

2.2. Класифікація способів зварювання

Загалом способи зварювання можна поділити на зварювання плавленням та зварювання тисненням.

Залежно від використаної енергії, розрізняють електричне, хімічне, механічне зварювання та їх поєднання – електрохімічне, електромеханічне, хіміко-механічне.

За фізичними ознаками всі процеси, що їх застосовують у зварюванні, поділяють на термічні, механічні і термомеханічні.

До *термічного* класу належать електродугове (дугове), електрошлакове, електронно-променеве, іонно-променеве, плазмове, індукційне, газове, термітне, ливарне зварювання; до *механічного* класу – холодне, вибухом, ультразвукове, тертям, магнітно-імпульсне зварювання; до *термомеханічного* класу належать контактне, дифузійне, індукційно-пресове, газопресове, термокомпресійне, дугопресове, шлакопресове, термітнопресове, пічне зварювання. У кожному з цих видів можуть бути виділені підвиди залежно від технічних і технологічних ознак, які визначають конкретний зміст й особливості процесу зварювання. Наприклад, до електричних способів належать електродугове, плазмове, електрошлакове, індукційне, лазерне, електронно-променеве зварювання.

2.3. Загальна характеристика зварних з'єднань

Зварні з'єднання (рис. 2.1) згідно з ДСТУ 2099-92 і ДСТУ 4001-2000 поділяють на такі типи: стикові (С1...С25), кутові (У1...У10), таврові (Т1...Т11) і внапуск (Н1...Н3). Букви означають тип з'єднання, а цифри – порядковий номер: С1 – стикове 1; У7 – кутове 7; Н3 – внапуск 3 і т.п. Чим більша товщина металу, тим більший номер типу шва. Наприклад, за стикового зварювання металу, що має товщину від 4 до 16 мм, може бути вибрано з'єднання С5, а для зварювання металу завтовшки від 12 до 60 мм потрібне з'єднання С21. Крім того, для з'єднань типів У, Т і Н треба проставити мінімальний розмір катета перерізу наплавленого металу К за орієнтовними даними, наведених у табл. 2.1.

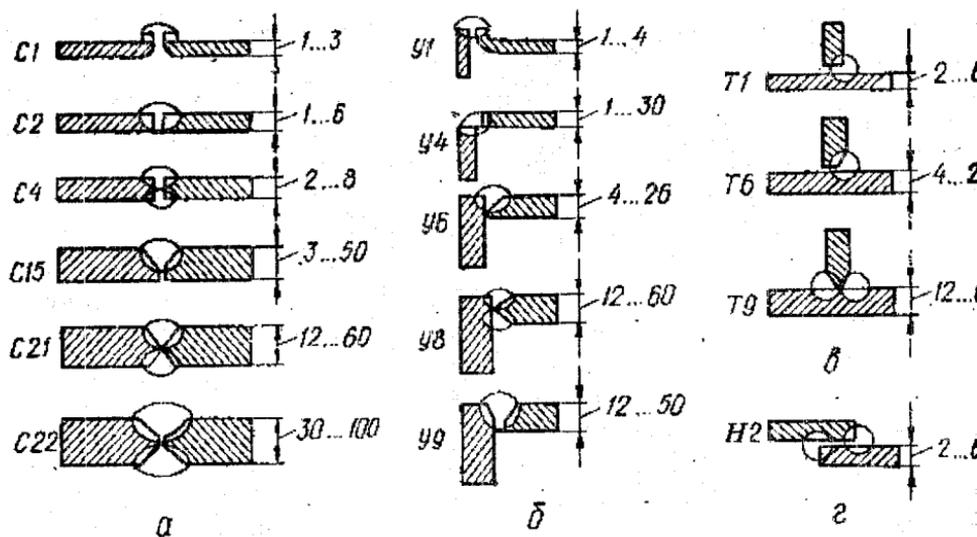


Рис. 2.1. Приклади основних видів зварних з'єднань

Більш детально типи швів показано на рис. 2.2.

Шви бувають однібічні і двобічні, з обробкою крайків та без неї. Обробка крайок з одного боку називається V-подібною, з двох – X-подібною або двобічною, а також U-подібними (рис. 2.3.). Обробляють крайки згідно зі стандартами ДСТУ.

У зварних конструкціях найбільш поширені стикові з'єднання; Вони відзначаються простотою та надійністю і високою міцністю. Підготовка країв при стиковому з'єднанні залежить від товщини металу й способу зварювання. Під час ручного дугового зварювання стикових з'єднань металу товщиною менше 3-4 мм краї стикують без підготовки із зазором до 2 мм або без нього.

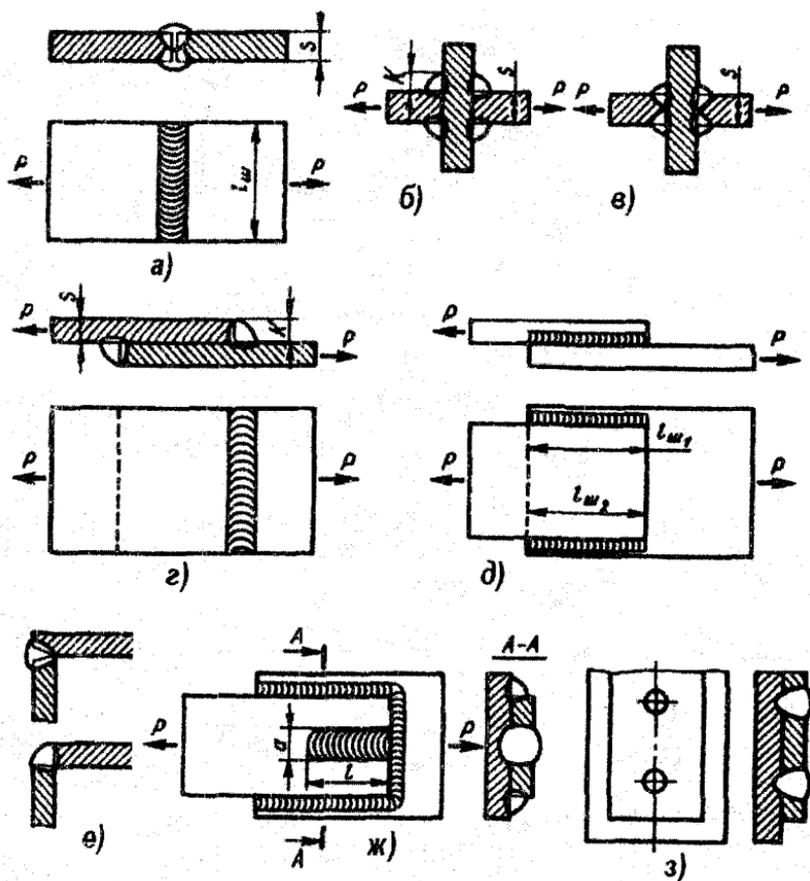


Рис. 2.2. Типи зварних з'єднань: а – встик; б – втавр без підготовки крайків під зварку; в – втавр із підготовкою крайків під зварку; г – внапусток із лобовими швами; д – внапусток із фланговими швами; е – кутове; ж – точкове однозрізне з'єднання внапусток; з – електрозаклепкове; і – прорізне із лобовими і фланговими швами

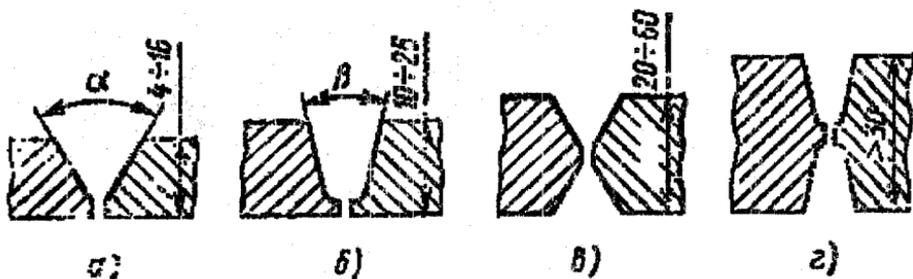


Рис. 2.3.. *Форми обробки крайків перед зварюванням:*
а – V-подібна, б– U-подібна, в – X-подібна, г – двобічна, U-подібна

При товщині металу 3...60 мм стикові з'єднання проводять з V-подібною підготовкою крайків, причому кут розкриття країв становить 60...70° притуплення 2...3 мм, зазор 2...4 мм. Однобічні U-подібні шви мають переваги над V-подібними: під час їх виконання менші витрати електроенергії, матеріалу електрода, а також нижче короблення листів. В деяких випадках, коли це є можливим при товщині металу 12...40 мм застосовують X-подібну підготовку з кутом розкриття, зазором і притупленням подібно до V-подібного розділювання. X-подібне розділювання дає економію електродного матеріалу і зменшує деформації завдяки симетричному розташуванню швів. У деяких випадках при товщині металу 15...100 мм застосовують чашоподібну підготовку з притупленням 2...3 мм і зазором 2...4 мм. Зазор між краями при збиранні стикових з'єднань під зварювання залишають з метою покращення провару. Притуплення кута розділювання (країв) попереджує протоплення листів.

Таврові з'єднання і хрестоподібні застосовують як без скосу країв, так і з одностороннім або двостороннім розділюванням. З'єднання без скосу країв на сталі будь-якої товщини застосовують у конструкціях з малим статичним навантаженням. У відповідальних конструкціях при товщині металу понад 3 мм застосовують односторонні, а при товщині 8...120 мм двостороннє розділювання.

Кутові з'єднання виконуються без скосу країв. Для вигіднішого збирання при товщині металу понад 10 мм зварювальні краї зміщують на 3...5 мм.

З'єднання внапуск, з накладками, таврові та кутові здійснюють за

допомогою кутових швів. Вони можуть виконуватись з одними або двома лобовими швами, зі швами фланговими, комбінованими, прорізними.

Для з'єднань внапуск катет К визначають орієнтовно за найменшим розміром товщини деталі, що зварюється. Величину напуску обирають переважно таку, що дорівнює п'ятикратній товщині найбільш тонкого із зварюваних елементів (табл. 2.1.).

Таблиця 2.1

Орієнтовні значення катета К залежно від товщини металу для з'єднань кутових та внапуск

Тип з'єднання	Товщина металу, S	Мінімальне значення катета К, мм	Тип з'єднання	Товщина металу, S	Мінімальне значення катета К, мм
У	3 - 5	3	Т	3	3
	6 - 9	4		4 - 10	4
	10 - 14	5		12 - 16	5
	>14	6		>16	6

Стиковий та кутовий шви можуть виконуватись нормальними або з підсиленням, а кутовий – поліпшений або з ослабленням.

Ручне електродугове зварювання ефективне при одержанні всіх типів зварних з'єднань і, особливо, при зварюванні коротких, переривчастих швів у важкодоступних місцях і у різних просторових положеннях (рис. 2.4)

Згідно з ДСТУ 2092-92, шви бувають: у нижньому положенні, вертикальні, горизонтальні, стельові (рис. 2.4).

Нижнім називають шов на горизонтальній площині металу або на площині, нахилений до горизонту менш ніж на 45°. *Вертикальним* називають шов на вертикальній площині або під кутом до горизонту, більшим за 45°. *Горизонтальні* шви – це шви, що розміщені на вертикальній площині горизонтально або під кутом до горизонту, меншим за 45°. *Стельовими* називають шви, розміщені на стелі заготовки. Найважчим є виконання стельових швів.

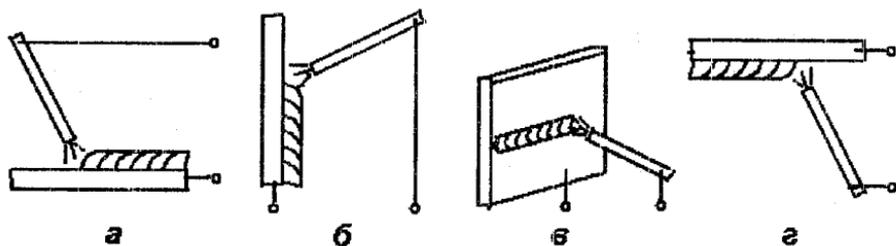


Рис. 2.4. Просторові положення швів при зварюванні:
 а – нижнє, б – вертикальне, в – горизонтальне, г – стельове

При вертикальному, горизонтальному і стельовому зварюванні об'єм рідкого металу зварювальної ванни незначний, тому може утримуватись навіть на вертикальній (рис. 2.4, в) або стельовій (рис. 2.4, г) площині за рахунок сил поверхневого натягу. До недоліків цього способу зварювання відносять важкі умови праці (працювати доводиться із захисною маскою) і низьку продуктивність (швидкість зварювання становить декілька метрів за годину).

Особливість виконання вертикального шва полягає в тому, що при зварюванні треба враховувати, що тепло піднімається знизу вгору. Щоб зменшити вплив тепла на зварювальну ванну, треба вести зварювальний шов зверху вниз. При цьому палик слід нахилити трохи вгору, щоб тепло утримувало зварювальну ванну. Рухатися треба досить швидко, щоб випередити розплавлений метал. Дріт необхідно утримувати на передньому краю ванни.

Дозволяється зварювання заготовок, коли різниця між їх товщинами не перевищує 1, 2, 3 і 4 мм для заготовок завтовшки до 4, від 4 до 20, від 20 до 30 і понад 30 мм відповідно. Якщо різниця товщин заготовок перевищує вказані розміри, перед зварюванням у заготовки, що має більшу товщину, треба робити скіс з одного або двох боків до товщини меншої деталі (рис. 2.5).

Шви можуть бути одношарові або багатшарові, виконані за декілька проходів. Для швів усіх типів обов'язковим є проварювання стику по всьому перерізу, інакше зварне з'єднання буде недостатньо міцним. Щоб запобігти цьому, зварюючи товсті метали, на крайках роблять скоси. Це забезпечує доступ до нижньої частини стику і добре проварювання кореня шва. Далі багатшаровим способом заповнюють простір між крайками металів, у результаті чого утворюється зварний шов.

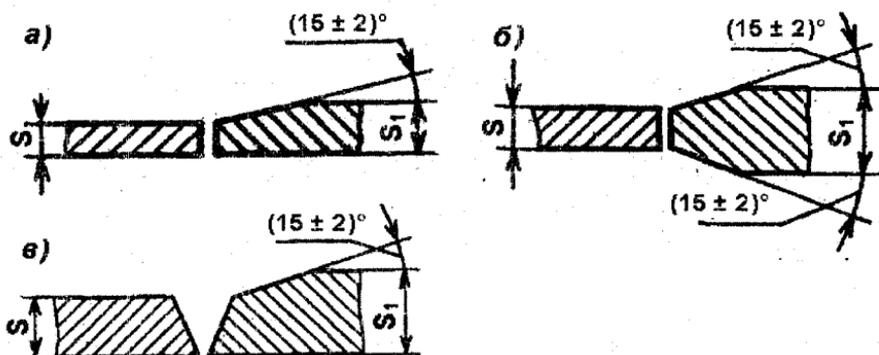


Рис. 2.5 Скоси на заготовках, що мають різну товщину:

а – однібічний, б – двобічний, в – однібічний з обробкою крайків

Шви можуть бути неперервними і перервними залежно від величини активного навантаження в конструкції.

Контрольні запитання для самостійної підготовки

1. Що таке зварювання?
2. Як класифікують способи зварювання?
3. Які позитивні і негативні характеристики мають зварні з'єднання?
4. Які види зварних з'єднань вам відомі?
5. В яких просторових положеннях виконують зварювання?

2.4. ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯМ

Зварювання плавленням виконують із застосуванням різних видів енергії: електричної (електричний струм), хімічної (хімічні реакції з виділенням тепла екзотермічних реакцій) і променевої (застосовують електронний, лазерний, або сонячний промінь). В усіх випадках зварювання відбувається шляхом плавлення крайків заготовок, що з'єднуються, присаджувального металу (коли він надається), утворення зварювальної ванни і її кристалізації. В результаті утворюються дві яскраво виражені ділянки: закристалізований метал шва і зона термічного впливу в основному металі.

2.4.1. Будова зварного з'єднання

На рис. 2.6 відображено послідовність утворення зварного з'єднання плавленням. Перед зварюванням краї металу покриті оксидами і адсорбованими плівками на їх поверхні (рис. 2.6, а). Під впливом зовнішнього джерела тепла краї заготовок розплавляються й утворюється металева зварювальна ванна, поверхневі плівки крайків металу руйнуються і спливають на її поверхню. Рідкий метал змочує оплавлені поверхні, що зумовлює виникнення міжатомних зв'язків між атомами рідини й твердої фази. Унаслідок кристалізації розплавленої ванни металу відбувається утворення зварного шва і міцного нерознімного з'єднання заготовок зі збереженням утворених міжатомних зв'язків (рис. 2.6, б – д). Перехід металу з рідкого стану в твердий являє собою процес, коли посилюється зв'язок між атомами й метал шва набуває литої структури.

Міцність зварного з'єднання залежить від процесів, які відбувалися під час плавлення і кристалізації металу у зварювальній ванні, структурних перетворень в зоні термічного впливу основного металу, а також деформації, пов'язаної з термічним розширенням металів, унаслідок нагрівання і охолодження. У процесі зварювання плавленням розплавляються краї зварюваних заготовок і електродний або присаджувальний метал. Іноді зварювання виконують лише завдяки розплавленню країв основного металу.

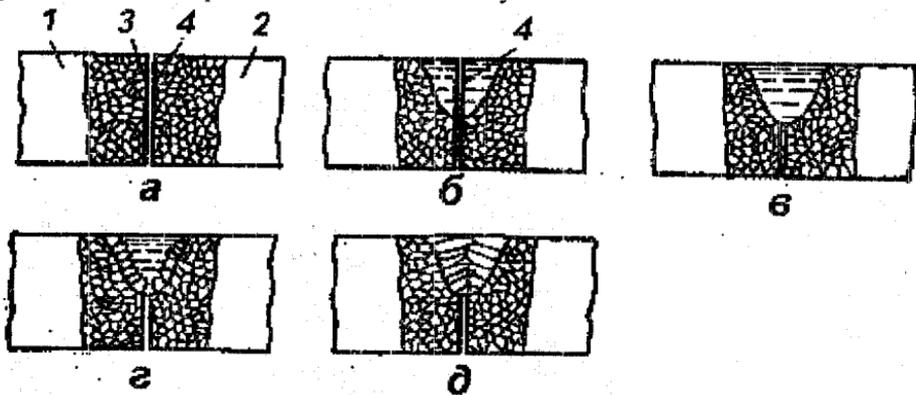


Рис. 2.6. Схема процесу утворення зварного з'єднання шляхом плавлення:

а – початковий стан металів; б – д – стадії утворення зварного з'єднання; 1, 2 – метали, що зварюються; 3 – нерівності поверхні після механічної обробки; 4 – адсорбований шар

Розплавлений метал утворює загальну зварювальну ванну, яка після кристалізації перетворюється в зварний шов. Метал шва має структуру, подібну до структури литого металу. На відміну від відливок, у зварних швах осі кристалітів являють собою просторові криві, спрямовані від стінок ванни в бік руху зварювальної дуги. Структури кристалітів можуть бути комірчастого, дендритного або змішаного виду, відрізняються одна від одної ступенем розвитку ліквіації легувальних елементів і дисперсністю їх розподілу.

Біля зварного шва в основному металі утворюється зона термічного впливу, з кількох ділянок. Ділянки відрізняються одна від одної структурним складом і механічними властивостями через те, що кожна з них під час зварювання нагрівається неоднаково. Ділянка біля самого шва нагрівається до температури, близької до температури плавлення металу. Температури інших ділянок знижуються – від температури солідуса до температури основного металу. В кожній ділянці зони термічного впливу утворюються різні структури. Щодо низьковуглецевих сталей, то утворення структур зварного шва можна уявити, якщо зіставити криву розподілу температур ділянок зони термічного впливу з діаграмою стану «залізо – вуглець» (рис. 2.7).

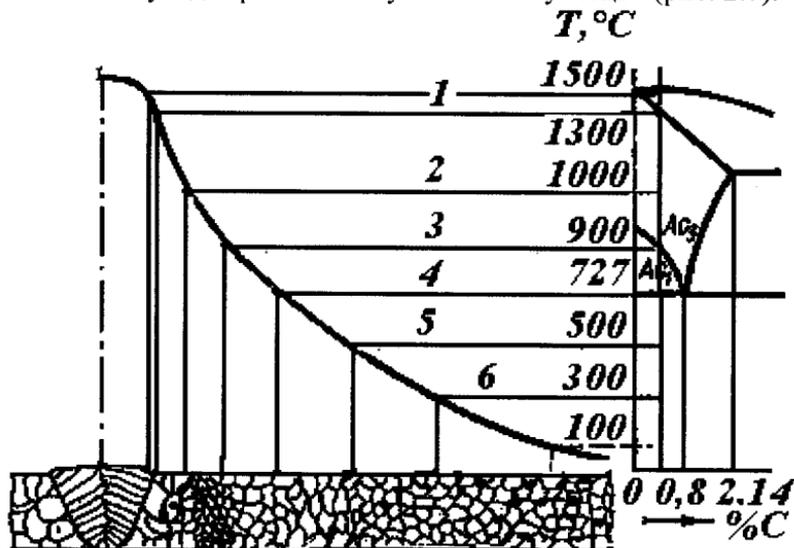


Рис. 2.7. Структури, що утворюються в зоні термічного впливу

У зоні шва спостерігається стовпчаста структура литого металу, міцність якого, в основному, залежить від складу електрода, яким

зварюють метал. Для досягнення рівномірності між наплавленим й основним металами звичайно вибирають електроди, які після розплавлення і змішування з основним металом у ванні утворюють наплавлений метал, що має таку саму або більш високу міцність порівняно з основним металом.

У більшості випадків властивості зварного з'єднання визначаються характером теплової дії на ділянки зони термічного впливу.

Ділянка 1 являє собою ділянку *неповного розплавлення*, яка під час зварювання нагрівається до інтервалу температур між температурами солідус і ліквідус. Ділянка має невелику ширину і характеризується перехідною структурою, яка складається з частково розплавлених зерен основного металу і закристалізованого металу шва. В деяких випадках властивості цієї ділянки мають вирішальне значення для працездатності зварного з'єднання, тому що саме в цьому місці виникають тріщини втоми металу і починає розвиватися корозія.

Ділянка перегріву 2 під час зварювання розігрівається до температур, нижчих від температури плавлення металу, приблизно – до 1100...1200°C. В цій ділянці зерна виростають до великих розмірів, а метал має структуру, де надлишковий ферит виділяється на межах зерен у вигляді довгих голок. Така структура має назву відманштетової, характеризується низькою міцністю, зниженими пластичністю і в'язкістю. Ділянки 1 і 2 є слабким місцем з'єднання. Для зниження впливу цих структур на міцність до зварного з'єднання застосовують відпал або нормалізацію, а в деяких випадках – пластичну деформацію.

Ділянка нормалізації 3, в якій метал був розігрітим від температури A_{c3} до 1100°C, утворюється дрібнозерниста структура. На цій ділянці формується метал із високою міцністю (найбільшою міцністю у зварному з'єднанні). У низьковуглецевих сталей на ділянці 3 утворюється феритно-перлітна структура. Якщо сталь міститиме багато вуглецю ($\geq 0,3\%$), то за швидкого охолодження відбуватиметься гартування; метал на цій ділянці матиме мартенситну структуру, за якої утворюються холодні тріщини.

На ділянці *неповної перекристалізації 4* метал розігрівається вище від A_{c1} , але нижче за A_{c3} , що супроводжується частковим переходом структури в аустеніт. Після охолодження утворюються дрібні зерна перліту, а ферит структури залишається без змін. Така структура металу означає меншу міцність, ніж на ділянці 3.

На ділянці *рекристалізації 5*, на якій температура нагрівання металу була в межах 500°C - A_{c1} , фазові перетворення не відбуваються. В той же час в процесі рекристалізації руйнується стара структура і

утворюється нова, рівноважна, з відносно великими зернами. На цій ділянці підвищується пластичність, а твердість та міцність металу зменшуються.

На ділянці 6 (температури 200 – 500°C), яку називають зоною синьоломкості, структура основного металу залишається смугастою. Ця зона характеризується невеликим зниженням ударної в'язкості, особливо під час роботи в умовах високих температур. Явище синьоломкості пояснюється тим, що відбувається випадіння з твердого розчину субмікроскопічних частинок різних домішок, розміщених на межах зерен.

Ширина зони термічного впливу залежить від способу зварювання, товщини і складу металу й значною мірою – від параметрів зварювання. До таких параметрів належать товщина зварювальної сталі, температура підігріву розплавленого металу, тип з'єднання, величина погонної енергії зварювання q/v . При цьому слід мати на увазі, що формула $q/v = UI/v$ має дві змінних величини, які залежать від технології зварювання. За незмінної напруги зварювання U погонну енергію можна регулювати шляхом зміни зварювального струму I або швидкості зварювання v . Унаслідок зміни цих параметрів змінюються форма проплавлення і ширина зони термічного впливу. Орієнтовно загальна ширина зони термічного впливу й ділянка перегріву для деяких способів зварювання подані в табл.2.2.

Таблиця 2.2.

Орієнтовні значення ширини зони термічного впливу і ділянки перегріву при зварюванні різними способами

Спосіб зварювання	Загальна ширина зони термічного впливу	Ділянка перегріву
Ручне дугове	3...8	0,1...0,3
У захисних газах	3...8	0,1...0,3
Під флюсом	3...15	0,1...0,5
Електрошлакове	5...50	0,5...5
Електронно-променеве	0,3...1	< 0,1
Плазмове	0,3...1	< 0,1
Лазерне	< 0,5	< 0,1

Чим менша ширина зони термічного впливу, тим меншим буде розміщення зварного з'єднання.

2.4.2. Зварність металів і сплавів

За ДСТУ 3761.1-98 поняття *зварності* стосовно всіх способів зварювання, різноманітних типів конструкцій та будь-яких властивостей, які мають бути досягнуті, визначається так: “Металевий матеріал вважається зварним до встановленого ступеня даним способом та для даної мети, якщо за відповідної процедури зварювання досягається суцільність металу, яка гарантує відповідність вимогам, що їх пред’являють до зварних з’єднань як щодо їх властивостей, так і щодо їх впливу на конструкцію, складовою частиною якої вони є.”

Таким чином, *зварність* – це комплексна характеристика, яка вказує на здатність металу утворювати зварні з’єднання відповідно до умов експлуатації. Ця характеристика залежить від багатьох властивостей металу, що підлягає зварюванню, зокрема від таких, як хімічний склад, теплопровідність, коефіцієнт термічного розширення, чутливість до поглинання газів, здатність до окиснювання, здатність до алотропічних перетворень, усадка в процесі кристалізації тощо. Зварність вважають доброю, коли не з’являються тріщини, не зменшуються витривалість, міцність та інші фізичні характеристики, викривлення не відбувається або воно незначне. Зварність тим вища, чим простіша технологія, чим більше способів, які можуть бути застосовані для зварювання, чим менш складними є параметри режимів зварювання, чим ширшою є номенклатура виробів, для котрих можуть бути застосовані зварні з’єднання.

Добре зварюються метали з однаковими кристалічними ґратками, а також такі, що утворюють один з одним тверді розчини. Зварюються також різнорідні метали (наприклад, сталь з міддю, мідь з алюмінієм) і сплави- метали з неметалами (керамікою, склом, графітом, керметами тощо), пластмаси, деякі гірські породи, смоли та інші. Деякі метали, що мають різні кристалічні ґратки (наприклад, мідь і свинець), зовсім не зварюються. До матеріалів, що погано зварюються, застосовують більш складну підготовку (наприклад, попередній підігрів) і спеціальні види зварювання (наприклад, у вакуумі).

Ступінь зварності являє собою характеристику, яка відображає, на скільки змінюються властивості металу внаслідок зварювання, а також можливість зварювання. Можна оцінити міцність, в’язкість, ударну в’язкість та інші властивості до і після зварювання. Наприклад, показник зварності (Z) за тимчасовим опором T_0 (межею міцності) у процесі випробування на розтягання металу зварного з’єднання визначають за формулою

$$Z_{(TO)} = \sigma_{VI} / \sigma_{VM} 100\%,$$

де σ_{VI} і σ_{VM} – тимчасовий опір зразків зварного з'єднання й основного металу відповідно.

У більшості випадків випробування на зварність – це випробування на ймовірність утворення тріщин – виникнення тріщин у зварному шві й основному металі, що свідчить про зниження зварності. Тріщини бувають гарячі і холодні.

Гарячі тріщини – це тріщини, які утворюються за високих температур, переважно в інтервалі між ліквідусом та солідусом, під час охолодження сплавів. Гарячі тріщини можуть утворюватись в металі зварного шва і в зоні термічного впливу. На рис. 2.8 показано характерні гарячі тріщини.

На *стійкість металу зварного шва проти утворення гарячих тріщин* впливає хімічний склад наплавленого металу і спосіб виконання процесу зварювання. Сірка, вуглець, кремній і водень знижують стійкість проти утворення гарячих тріщин, а манган – підвищує. В більшості випадків тріщини мають міжкристалічний характер, коли на межах зерен виділяються плівки евтектичних сплавів або дрібні утворення хімічних сполук, таких, як сульфіди, карбіди, нітриди, сіліциди, які розміцнюють зв'язки між зернами.

Особливості виконання зварювання також можуть впливати на утворення гарячих тріщин. Наприклад, коли зварювальна ванна глибока і вузька, то в процесі кристалізації відбувається зустрічний ріст кристалів (рис. 2.9, а), при цьому по всій висоті розплавленого металу утворюється лінія ослаблення шва (1), де накопичуються сірка, фосфор, водень, кисень, що значно ослаблює метал. Такий шов має велику схильність до утворення тріщин, які називаються кристалізаційними. У разі утворення більш широких швів (рис. 2.9, б) кристали спрямовуються переважно до вершини шва, що сприяє виділенню шлаків і газів під час кристалізації. В такому випадку ймовірність утворення тріщин майже зникає.

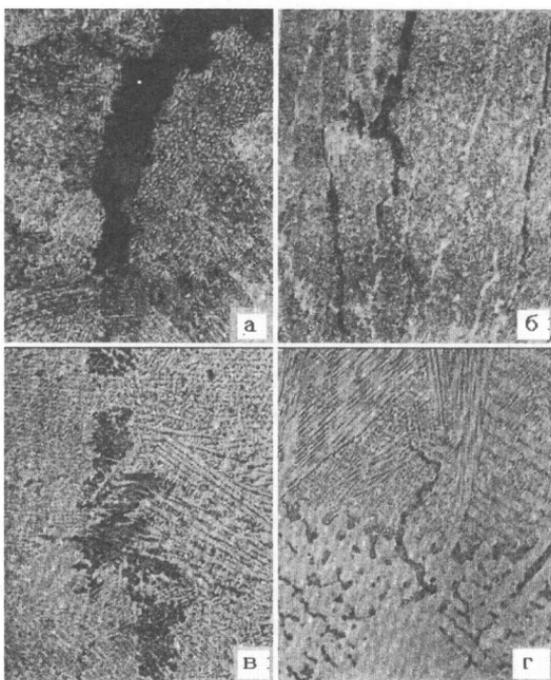


Рис. 2.8. Приклади мікроструктур гарячих тріщин:
 а – міжкристалічна тріщина, $\times 100$; б – сітка міжкристалічних тріщин у низьколегованій сталі, $\times 200$; в – усадкова пухкість, $\times 100$; г – тріщина, яка проходить крізь ділянку перегріву зони термічного впливу (верхня частина мікроструктури) і наплавлений метал (знизу).

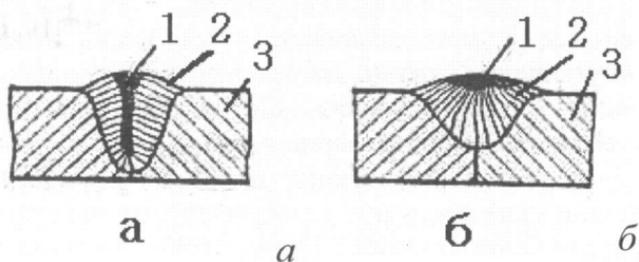


Рис. 2.9. Схеми кристалізації металу шва за глибокого проплавлення (а) і з меншим проплавленням (б):
 1 – метал, що кристалізується в останню чергу; 2 – витягнуті кристали дендритного типу; 3 – основний метал

Гарячі тріщини можуть виникати також у *перехідній ділянці зони термічного впливу*. На рис. 2.10 показано характерні тріщини такого типу.

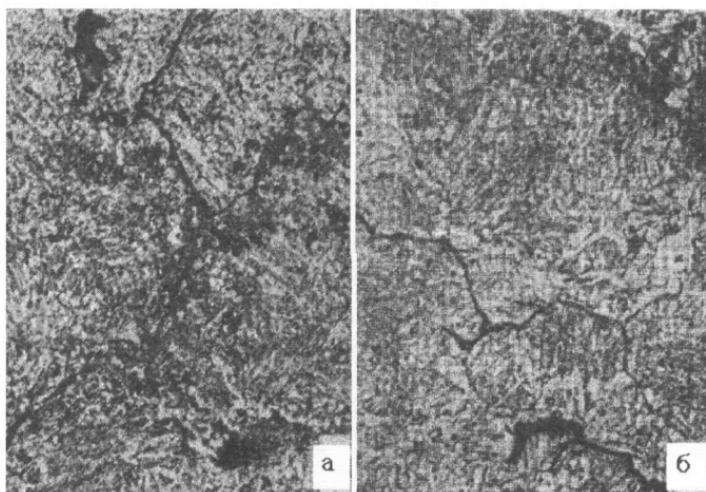


Рис. 2.10. Сітка міжкристалічних тріщин (*гарячі мікронадриви*) на ділянці перегріву зони термічного впливу:

а – *низьколегована сталь, x400*; б – *низьковуглецева сталь, x200*.

Частіше це трапляється, коли на межах зерен основного металу утворюються плівки розплавів сульфідів, сульфокарбідів, сульфонітридів, які мають температуру плавлення, меншу за температуру плавлення основного металу. Ці плівки розплавів знижують когезійну міцність меж зерен, які розкриваються під впливом усадкових напружень розтягання, внаслідок чого утворюється сітка гарячих тріщин. Можуть бути інші причини виникнення гарячих тріщин у зоні термічного впливу, наприклад, унаслідок зниження в'язкості металу через його перегрівання. Після охолодження зварного шва відносно видовження металу ділянки перегріву завжди знижується більш ніж удвічі.

Холодні тріщини виникають у зоні зварного з'єднання після закінчення зварювання або після накладання окремих шарів наплавленого металу за температур, нижчих за 200...250°C. Такі тріщини можуть виникати в зоні термічного впливу і в металі зварного шва. За розміщенням (рис. 2.11) ці тріщини можуть бути поздовжніми

(1) або поперечними (2), наприклад, у зварних швах великої товщини. Часто в зоні термічного впливу (3) холодні тріщини виникають у тій її частині, де температура характеризується певним ступенем перегріву, вищим за точку A_3 . безпосередньо на поверхні металу,

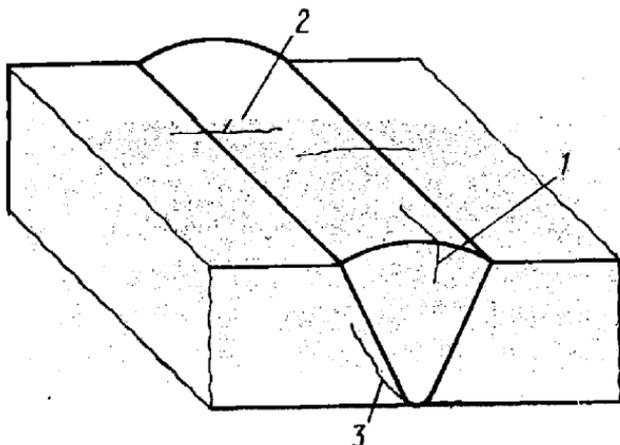


Рис. 2.11. Типи холодних тріщин

тоді як закриті тріщини мають невелику протяжність, тому їх важко виявляти. Для виявлення закритих тріщин застосовують ультразвуковий, рентгенівський або інші методи.

Основні причини виникнення холодних тріщин – структурні перетворення аустеніту в мартенсит, напруга між різними зонами зварного з'єднання, вплив водню, що розчинюється в металі під час зварювання.

Перетворення аустеніту в мартенсит відбувається тоді, коли сталь містить певну кількість вуглецю і легувальних елементів. Таке перетворення може відбуватися лише за швидкого охолодження, що майже завжди буває за дугових видів зварювання.

Перетворення аустеніту в мартенсит у зварному шві і зоні термічного впливу супроводжується збільшенням об'єму, тому що щільність мартенситу нижча за щільність фериту й перліту. Під час охолодження на ділянках мартенситу з'являються напруження розтягу, які звичайно призводять до появи тріщин. Такі явища виникають у вуглецевих і легованих сталей, схильних до гартування. У сталей з малою кількістю вуглецю в зоні термічного впливу холодні тріщини майже не виникають. Таким чином, склад металу і висока швидкість

охладження стають причиною виникнення тріщин під час перетворення аустеніту.

Одним із вагомих факторів, що впливають на утворення холодних тріщин, є водень. Водень потрапляє в рідкий метал зварного шва під час горіння дуги з покриття електродів, флюсу, вологості повітря, неочищених захисних газів, забруднень або іржі, на поверхні дротів і крайків металів, що зварюються. Спочатку водень розчинюється в рідкому металі зварного шва, звідки атоми водню дифундують у зону термічного впливу. Під час охолодження металу водень також дифундує до вільних поверхонь, з яких може виходити у повітря. За температур, нижчих від 200°C , атомарний водень може переходити в молекулярний стан. При цьому виникає високий тиск газу в місцях зварювання. Особливо небезпечними стають дефектні місця (пори, тріщини): коли водень потрапляє в них, під тиском з боку молекулярного водню дефекти можуть перетворюватись у тріщини. Процес виділення водню з металу може тривати протягом кількох годин, днів або тижнів. Тепловий режим, особливо нагрівання після зварювання, суттєво впливає на вихід водню з металу зварного з'єднання. Для зменшення небезпеки насичення металу зварного шва воднем електроди або флюс перед зварюванням необхідно сушити за температури $300...350^{\circ}\text{C}$ упродовж кількох годин.

Запобігти появі гарячих і холодних тріщин можна шляхом застосування більш чистих зварювальних матеріалів, уникнення металів, які здатні до гартування, попереднього підігрівання металів, зміни форми конструкції для зниження її жорсткості, використання потужних джерел тепла тощо.

Залежність зварності сталей від вмісту вуглецю й ступеня легування визначають таким чином. Зварність вуглецевих сталей вважається доброю, коли вміст вуглецю становить менш ніж $0,25\%$, задовільною – за $0,25...0,45\%$ C, обмеженою – за $0,46...0,55\%$ C і незадовільною – за кількості вуглецю понад $0,55\%$. Вуглецеві сталі, що містять $< 0,25\%$ вуглецю, зварюються в будь-яких умовах у широкому діапазоні товщини і форм деталей. Вуглецеві сталі, що містять $0,25...0,45\%$ C, можна зварювати за температур вищих від 5°C , а коли вони мають велику товщину, їх слід підігрівати до температури 150°C . Перед зварюванням сталі, що містять $0,46...0,55\%$ C, треба підігрівати до $150...300^{\circ}\text{C}$, а сталі, що містять $> 0,55\%$ C, – до температури $200...500^{\circ}\text{C}$ і вище.

Легувальні елементи знижують зварність сталей, тому для оцінки зварності легованих сталей слід брати до уваги їх вплив. Попередня

оцінка впливу легувальних елементів на зварність визначається вуглецевим еквівалентом C_e , який орієнтовно розраховують за однією з емпіричних формул, що були визначені різними авторами:

за методом Міжнародного інституту зварювання

$$C_e = C + Mn/6 + (Cr + V + Mo)/5 + (Ni + Cu)/15, \%;$$

за оцінками інших авторів

$$C_e = C + Mn/6 + Cr/5 + V/5 + Mo/4 + Ni/15 + Cu/13 + P/2, \%$$

$$C_e = C + Mn/20 + Ni/15 + (Cr + Mo + V)/10, \%$$

де символи хімічних елементів – вуглецю (C), мангану (Mn), хрому (Cr), ванадію (V), молібдену (Mo), нікелю (Ni), міді (Cu), фосфору (P) – позначають їх процентний вміст у сталі.

Наведені формули принципово схожі, тому можна скористатися однією з них, маючи на увазі, що всі вони дають орієнтовні показники. Чим більшим є вуглецевий еквівалент, тим гіршою вважається зварність. Низьколеговані сталі, які мають C_e менший, ніж 0,2...0,35%, добре зварюються. Сталі, величина вуглецевого еквіваленту яких вища за $C_e = 0,40...0,45\%$, слід вважати чутливими до утворення тріщин. Допускають їх зварювання без підігрівання за товщини металу до 10 мм; за більших значень C_e перед зварюванням метал треба підігрівати. Одним із критеріїв, що вказує на зниження зварності, є твердість зони термічного впливу. Для більшості конструкційних сталей величина твердості, більша за твердість HV 350...400, вказує на ймовірність утворення холодних тріщин.

Деякі низьколеговані сталі (до 5% легувальних елементів) мають схильність до гартування, тому їх зварюють після попереднього підігрівання до 150...300°C, а після зварювання нормалізують або виконують високотемпературне відпускання. Середньо- (5...10% легувальних елементів) і високолеговані сталі (більш ніж 10% легувальних елементів) зварюють із попереднім підігріванням і подальшим відпусканням за 680...780°C.

Прикладом матеріалу, що погано зварюється, є чавун. Зварні конструкції з чавуну не виготовляють. Але після попереднього підігрівання або застосування інших прийомів зварювання чавуну здійснюють, наприклад, для ремонту чавунних відливків з метою виправлення незначних дефектів.

Вплив напружень і деформацій на зварність. Зварність суттєво залежить від залишкових напружень у зварному з'єднанні, які призводять до створення зварювальних деформацій та тріщин. Основними причинами їхнього виникнення є нерівномірність розподілу температури в металах під час зварювання, ливарна усадка металу

зварювальної ванни, а також зміна об'єму металу внаслідок структурних перетворень.

Нерівномірність розподілу температури в металах під час зварювання виникає тому, що метал у зоні зварювання має високу температуру, а метал, що зварюється, залишається відносно холодним. При цьому об'єм гарячих ділянок збільшується, а ділянки холодного металу перешкоджають їх збільшенню. У шві і зоні термічного впливу через нерівномірне розширення металу виникають пластичні і пружнопластичні деформації стискання внаслідок нагрівання й розтягання під час охолодження, що призводить до виникнення напружень на зварюваних ділянках і деформації виробу. Напруження тим більші, чим більші коефіцієнт термічного розширення зварюваних металів, різниця температур між нагрітими й холодними ділянками, а також різниця між показниками щільності металу у твердому і рідкому станах.

Технологічні заходи зварювання для зниження напруги й деформації відображені на рис. 2.12. Зварювання товстого металу за накладання кількох шарів слід виконувати за схемою, поданою на рис. 2.12, а, б. За кутових з'єднань електрод бажано ставити ближче до вертикалі (рис. 2.12, в).

Одношарові шви рекомендовано зварювати окремими ділянками завдовжки 100...350 мм у послідовності, як на рис. 2.12, г. Зварювання багатошарових швів виконують каскадним методом (рис. 2.12, д). В деяких випадках застосовують спосіб зворотних деформацій. Для цього виріб перед зварюванням деформують у зворотному напрямку на величину, що утворюється під час зварювання (рис. 2.12, е). Застосовують також спосіб зварювання, коли деталі закріплюють у кондукторі або маніпуляторі (рис. 2.12, є). При цьому зварювальні напруження усуваються внаслідок пластичних деформацій у наплавленому металі за високих температур. Ефективним також є спосіб прокатування шва за допомогою роликів (рис. 2.12, ж). В цьому випадку пластична деформація металу шва завдяки подрібненню зерен сприяє підвищенню його міцності. Зменшують залишкові деформації також шляхом нагрівання металу перед зварюванням або застосуванням методів термічної обробки: відпалюванням, нормалізацією, високим відпусканням.

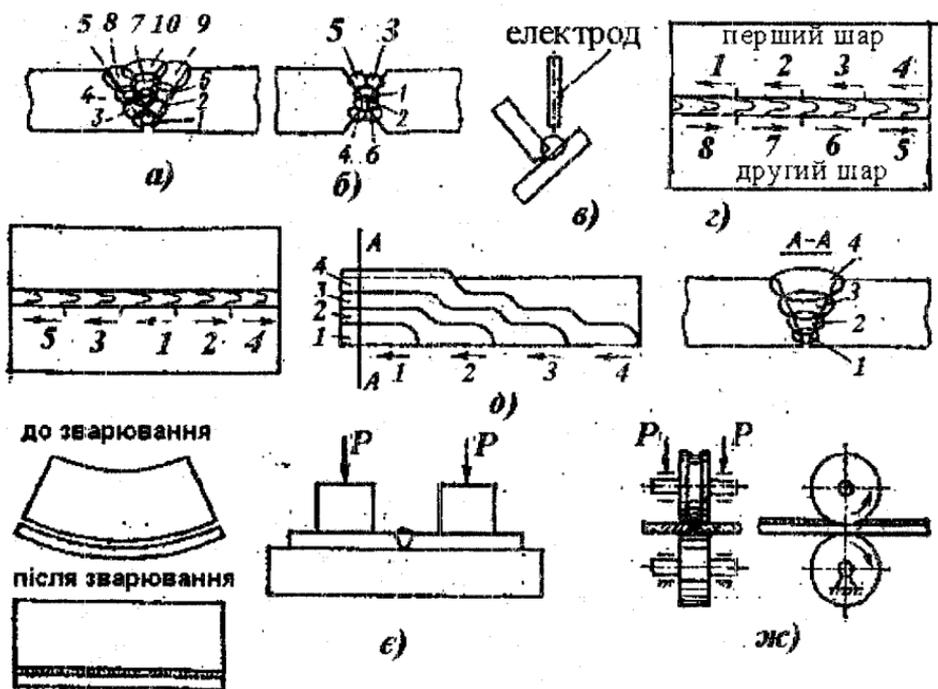


Рис. 2.12. Технологічні заходи зварювання для зниження напруги і деформації (цифри вказують на послідовність накладання швів, а стрілки – на їх спрямування)

2.5. Дугове зварювання

2.5.1. Сутність і способи дугового зварювання

Дугове зварювання належить до зварювання плавленням, коли джерелом тепла є одна або декілька зварювальних дуг. Зварювальною дугою називають стаціонарний електричний розряд у газопаровій атмосфері між електродами, що перебувають під напругою. Відстань між електродами називають областю дугового розряду, або довжиною дуги. Енергія, що утворюється під час горіння електричної зварювальної дуги між електродом і заготовкою, супроводжується виділенням значної кількості тепла, внаслідок чого оплавляються крайки заготовок й розплавляється металевий електрод. Після твердіння розплавленого металу утворюється зварне з'єднання.

Класифікують дугове зварювання залежно від ступеня механізації процесу зварювання, роду струму і полярності, властивостей електроду, виду захисту зони зварювання від кисню повітря тощо.

За ступенем механізації розрізняють зварювання ручне, механізоване й автоматичне.

За *ручного дугового зварювання* процеси запалювання і підтримання певної довжини дуги, маніпуляція електродом для надання шву необхідної форми й ширини, пересування електрода вздовж лінії шва і припинення процесу зварювання виконується робітником вручну без застосування механізмів.

Механізоване зварювання – це зварювання, виконуване із застосуванням машин та механізмів, керованих людиною. До цього виду зварювання належить зварювання за допомогою напівавтоматів, за якого механізованим є подавання електродного дроту в зону горіння електричної дуги. Решта операцій виконується робітником вручну.

За *автоматичного зварювання* всі елементи процесу виконують машини та механізми за заданою програмою без участі людини. Цей спосіб має великі переваги перед попередніми способами, але потребує більшої ретельності і точності в підготовці деталей до зварювання.

За *родом струму* розрізняють зварювання постійним або змінним струмом. Електрична дуга постійного струму може мати пряму і зворотну полярність. За прямої полярності електрод є негативним полюсом, а метал, що зварюється, – позитивним. За зворотної полярності полюси змінюють знаки на протилежні. Дуги постійного струму мають високу стійкість і дають змогу отримувати високоякісні з'єднання. Під час горіння дуги змінного струму негативний та позитивний полюси міняються місцями з частотою, однаковою з частотою струму. Після кожного періоду дуга гасне, а потім запалюється знову. Це знижує стійкість дуги і потребує застосування більш високої напруги.

За *властивостями електрода* розрізняють зварювання електродом, що не плавиться, й зварювання металевим плавким електродом.

Неплавкі електроди виготовляють із матеріалів, що мають високу температуру плавлення, яка під час горіння дуги перевищує температуру нагрівання анода ($>2600^{\circ}\text{C}$). Це вугільні, графітові, які нині майже не використовуються, і вольфрамові електроди, які використовують переважно для автоматичного і механізованого зварювання. Під час *зварювання неплавкими електродами* дуга виникає між електродом 2 (рис. 2.13, а) і зварним виробом 3. Дуга розплавляє крайки заготовок, утворює між ними ванну розплавленого металу, в яку

вводять присадковий матеріал 1, а матеріал електрода під час місцевого оплавлення не переходить до складу металу шва. За такого способу зварювання використовується постійний струм прямої полярності (електрод з'єднується з мінусом джерела струму, а основний метал – із плюсом). Зварювання неплавким електродом застосовують для з'єднання тонких сталевих виробів, кольорових металів та в інших випадках.

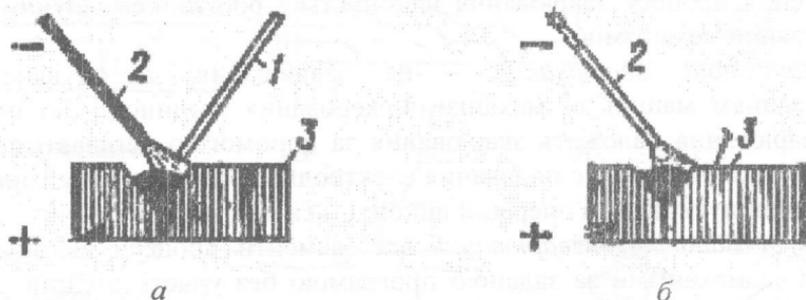


Рис. 2.13. Схеми дугового зварювання електродом, що не плавиться (а) і плавким електродом (б)

Під час зварювання плавким металевим електродом електрична дуга виникає між електродом 2 (рис. 2.13, б) і виробом 3, що зварюється. Дуга розплавляє крайки зварних заготовок та металевий електрод, який переходить до складу металу шва. Розплавлений метал електрода змішується з основним металом, і після кристалізації утворюється зварний шов. Зварювання цим способом здійснюється на постійному та змінному струмі. Зварювання плавким електродом із покриттям, яке, розплавляючись, утворює шлак, що захищає поверхні розплавленого металу від навколишнього середовища, є найбільш поширеним у ручному дуговому зварюванні.

Розрізняють також зварювання дугою прямої дії і зварювання дугою непрямої дії. У разі зварювання дугою прямої дії дуга горить між електродом та з'єднуваними заготовками. За зварювання дугою непрямої дії дуга горить між двома і більше електродами, а температура та інтенсивність нагрівання заготовок залежить від відстані до дуги.

За способом захисту від повітря розрізняють зварювання електродами, що не мають покриття, електродами з покриттям, зварювання під флюсом, під газовим захистом, із комбінованим захистом, у вакуумі тощо.

У технічній літературі способи зварювання мають такі позначення:

MMA (Manual Metal Arc) – ручне дугове зварювання штучним металевим електродом із покриттям;

MIG/MAG (Metal-arc inert gas welding/ Metal-arc active gas welding) – механізоване (напівавтоматичне) зварювання в середовищі захисних газів (інертних або активних);

TIG (Tungsten Inert Gas) – зварювання електродом, що не плавиться, в середовищі інертних газів (наприклад, аргонно-дугове зварювання).

2.5.2. Електрична зварювальна дуга

Зварювальна дуга являє собою електричний розряд у газах подовженої дії між електродами, що перебувають під напругою (рис. 2.15). Одним з електродів може бути метал, що зварюють.

Зварювальна дуга характеризується малою напругою, великою силою струму, високою температурою, наявністю іонізації газів і яскравим світінням. Електрична зварювальна дуга являє собою електропровідник, в якому відбувається складний іонний та електронний процеси переносу електричних зарядів через іонізований повітряний проміжок.

У звичайних умовах газу, які є ізоляторами, електрично нейтральні. Але в процесі загоряння електричної дуги відбувається розігрів поверхні катода (негативного полюса), яка називається катодною плямою. Завдяки емісії з катодної плями з'являються електрони, які під впливом напруги електричного струму відриваються від поверхні нагрітого катода і зі швидкістю 1,5...2 км/с спрямовуються до анода (позитивного полюса). На своєму шляху вони стикаються з нейтральними атомами газів, у результаті чого відбувається іонізація останніх. Але не всі атоми мають здатність до достатньої іонізації. Наприклад, атоми заліза і важких металів за температури горіння дуги майже не іонізуються, тоді як атоми легких металів здатні до іонізації (K, Na, Li, Ca та інші). Тому до покриття електродів, до флюсу додають речовини, що містять ці хімічні елементи. Внаслідок зіткнення електронів із нейтральними атомами в дузі з'являються позитивно заряджені іони легких металів (K^+ , Na^+ , Li^+ , Ca^+ ...). Процес іонізації стає лавиноподібним, що й забезпечує збуджування і стійке горіння дуги після її запалювання. Без умісту в дузі позитивно заряджених іонів металів, які легко іонізуються, зварювальна дуга була б нестійкою і процес зварювання був би неможливим.

Негативні іони й електрони переміщуються до анода, а позитивні

іони – до катода. На поверхнях катода й анода відбувається нейтралізація заряджених частинок і перетворення електричної енергії в теплову.

Зварювальна дуга складається з трьох зон: катодної біля катода, анодної біля анода і стовпа дуги між катодною і анодною зонами. Температура в стовпі дуги сягає $6000 \dots 7000^\circ\text{C}$, а біля катода й анода температура дуги знижується і становить 2400 і 2600°C відповідно (рис. 2.14).

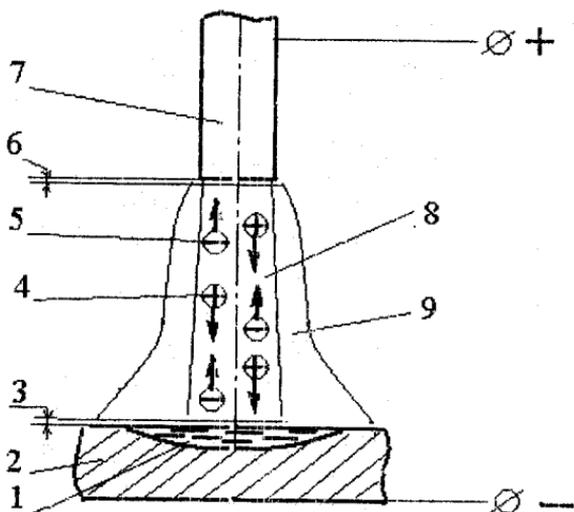


Рис. 2.14. Схематичне зображення зварювальної дуги :

1 – розплавлений метал; 2 – заготовка; 3 – катодна ділянка; 4 – позитивно заряджені іони легких металів; 5 – електрони і негативно заряджені іони; 6 – анодна ділянка; 7 – електрод; 8 – стовп дуги; 9 – газований захисний шар дуги

Довжина катодної і анодної зон дуже мала, але в цих зонах відбувається значне падіння напруги. Значення катодного U_k і анодного U_a падіння напруги не залежать від довжини дуги. Довжина дуги впливає на падіння напруги тільки в стовпі дуги U_c , а саме: за збільшення довжини дуги збільшується U_c за формулою $U_c = vI$, де v – падіння напруги на одиниці довжини стовпа дуги, I – довжина стовпа дуги.

Загальна напруга зварювальної дуги U_d складається із суми падінь напруги в окремих частинах дуги:

$$U_d = U_k + U_a + U_c, \text{ або } U_d = U_k + U_a + v_l.$$

На напругу дуги U_d впливають також сила зварювального струму, матеріал та діаметр електрода, склад і тиск газів та інші фактори.

Теплова потужність дуги визначається за формулою

$$q = KU I \eta, \text{ кал/с,}$$

де K – коефіцієнт несинусоїдальності напруги і струму; U – напруга дуги; V ; I – сила струму, A ; η – ефективний коефіцієнт корисної дії.

Не вся теплова потужність дуги використовується для нагрівання металу. Частина її втрачається в навколишньому середовищі. Для постійного струму $K = 1$, для змінного – $K = 0,7 \dots 0,97$, значення η залежить від виду зварювання і довжини дуги. Для ручного дугового зварювання електродами, що плавляться $\eta = 0,7 \dots 0,85$, для зварювання під флюсом – $\eta = 0,8 \dots 0,95$. Із зменшенням довжини дуги η зростає. У разі живлення дуги постійним струмом температура анода вища за температуру катода завдяки тому, що на аноді виділяється більша кількість тепла дуги (42...43%), а на катоді – менша (36...38%). На стовп дуги припадає приблизно 20...21% тепла, виділеного дугою.

Зварювальна дуга повинна мати такі характеристики: легке загоряння, стійке горіння навіть у разі зміни її довжини в певних межах, швидке повторне загоряння після її погашення, необхідне проплавлення основного металу тощо. На ці характеристики дуги певною мірою впливають сила струму, напруга, рід струму, склад дуги, характер переносу металу в дузі тощо.

Статична вольт-амперна характеристика дуги. Для того щоб зварювання відбувалося надійно, між струмом і напругою повинна бути певна залежність, яку називають статичною вольт-амперною характеристикою дуги. Графічно таку залежність за постійної довжини дуги відображено на рис 2.15. Така залежність характерна для всіх зварювальних дуг. Вона показує, що за невеликої сили струму до 100 А (в ділянці I) напруга дуги U_d зменшується в разі збільшення сили струму. Таку статичну характеристику називають спадною. За більшої сили струму в межах від 100 до 800 А (в ділянці II падіння напруги в дузі майже не залежить від сили струму), таку статичну характеристику називають жорсткою.

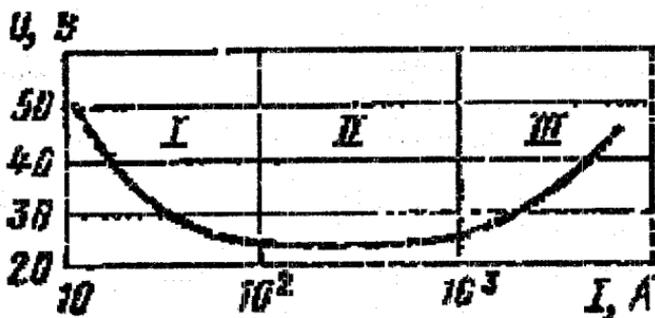


Рис. 2.15. Статична вольт-амперна характеристика дуги за її постійної довжини

Дугу зі спадною і жорсткою характеристиками застосовують для ручного дугового зварювання. За більшої сили струму (в ділянці III) напруга дуги U_d збільшується, а статична характеристика дуги зростає. Дугу із такою характеристикою застосовують для зварювання під флюсом і в захисних газах.

2.5.3. Джерела живлення зварювальної дуги

Виконувати зварювання безпосередньо від електричної мережі неможливо, тому що її електричні параметри не відповідають тим, що потрібні для зварювання. Існує кілька видів джерел живлення зварювальної дуги – трансформатори, дизельні або бензинові електрогенератори, випрямлячі й інвертори.

Застосовують джерела струму, до яких висувають такі вимоги. Джерела струму повинні забезпечувати легке запалення і стійке горіння дуги, при цьому напруга холостого ходу повинна бути достатньо високою для легкого запалення дуги, але не більшою, ніж 80...90 В відповідно до норм безпеки праці. Вони повинні мати пристрій плавного регулювання сили струму й потужність, потрібну для виконання певних зварювальних робіт. Вони не повинні виходити з ладу в разі короткого замкнення, яке часто трапляється під час зварювання; при цьому вони повинні мати добрі динамічні властивості (бути здатними швидко відновлювати режим зварювання після короткого замкнення); повинні забезпечувати потрібну форму зовнішньої характеристики і бути безпечними у роботі.

Однією з найважливіших характеристик зварювального джерела є його зовнішня, або вольт-амперна, характеристика (ВАХ), яка являє собою залежність напруги на його клеммах від зварювального струму. Залежно від призначення ВАХ (рис. 2.16, а) можуть бути крутоспадні (1), зростаючі (2) і пологоспадні, або жорсткі (3). Тип зовнішньої характеристики визначається способом зварювання. Для ручного дугового зварювання застосовують крутоспадну характеристику, для зварювання під флюсом – пологоспадну, при зварюванні в середовищі захисних газів – зростаючу.

Для визначення джерела живлення суміщають на одному графіку ВАХ джерела живлення і статичну характеристику дуги (рис 2.16).

Наприклад, за ручного дугового зварювання використовують джерела живлення з крутоспадною характеристикою (рис. 2.16, а). Якщо сумістити ці криві на одному графіку (рис. 2.16, б), можна проаналізувати роботу джерела живлення таким чином. Для під'єднання джерела до електромережі (перед зварюванням) у точці 1 вказується напруга відповідно до режиму холостого ходу U_{xx} . У момент збудження дуги виникає коротке замикання, яке на графіку позначено точкою 4. При цьому напруга між електродом і металом дорівнює нулю, що вказує на значне зниження потужності струму, який проходить через джерело живлення. Тому в режимі короткого замкнення джерело не перебуває в аварійному стані.

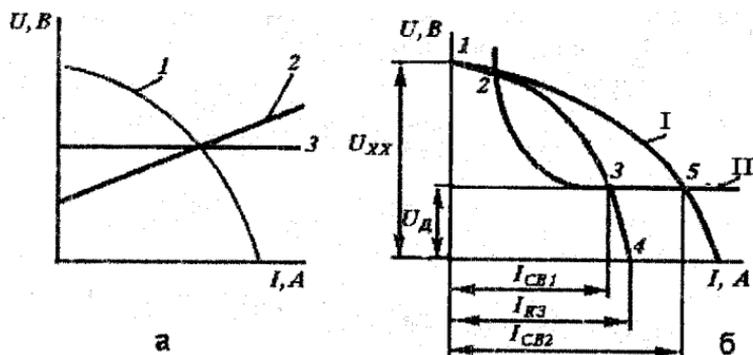


Рис. 2. 16. Основні типи зовнішніх характеристик джерел живлення за дугового зварювання: (а) 1 – крутоспадна; 2 – зростаюча; 3 – жорстка; б – зовнішні характеристики джерел живлення I і статичної характеристики дуги II (б): 1 – напруга холостого ходу; 2 і 3 – точки перетинання вольт-амперних характеристик джерела живлення і дуги, з яких точка 3 визначає умови стійкого горіння дуги; 4 – сила струму короткого замикання дуги; 5 – точка, яка визначає умови стійкого горіння дуги за більшого струму.

У точках 2 і 3 (рис 2.16,б) ВАХ джерела і статична характеристика дуги перетинаються, що означає: в цих місцях сила струму й напруга джерела живлення і в дузі стають однаковими. Стійку рівновагу система має лише в точці 3, яка відповідає горінню зварювальної дуги. У разі збільшення сили струму в дузі конструкцією джерела передбачена можливість регулювання положення кривої ВАХ, на що вказує точка 5. Джерела живлення можуть бути змінного і постійного струму. Для живлення дуги змінного струму застосовують трансформатори різних конструкцій. Для живлення дуги постійного струму використовують зварювальні генератори з приводом від електродвигуна або від двигуна внутрішнього згорання, а також напівпровідникові зварювальні випрямлячі. Застосовують також зварювальні інвертори, які майже завжди є джерелом постійного струму. Більш якісне зварювання можливе за допомогою постійного струму, завдяки якому відбувається стійке горіння дуги, що забезпечує рівномірність прогрівання металу вздовж всієї довжини шва. Приклади характеристик деяких трансформаторів, генераторів, випрямлячів й інверторів наведено в додатках 1, 2, 3, 4.

Трансформатори бувають одно- або трифазні. Регулювання сили струму здійснюється за двома схемами. За першою схемою спадна характеристика джерел живлення створюється наявністю дроселів, за допомогою яких величина зварювального струму регулюється зміною повітряного зазору l між рухомим і нерухомим сердечниками дроселя (рис. 2.17, а). За збільшення зазору l магнітний потік у дроселі зменшується, а зварювальний струм збільшується. Ці трансформатори виготовляли у двокорпусному виконанні (з окремим дроселем) або однокорпусному виконанні (разом із дроселем) (рис. 2.17, а). Вони випускалися двох типів: СТЭ і СТН. На даний час їх не виготовляють.

За другою схемою спадні зовнішні характеристики утворюються за зміни індуктивного опору трансформатора шляхом зменшення або збільшення магнітного розсіювання внаслідок зміни відстані між обмотками (тип ТС-ТД) (рис. 2.17, б) або переміщення магнітних шунтів (тип СТШ). За зближення обмоток, первинної і вторинної, у трансформаторів типу ТС-ТД зварювальний струм збільшується, а за віддалення – зменшується (рис. 2.17, б).

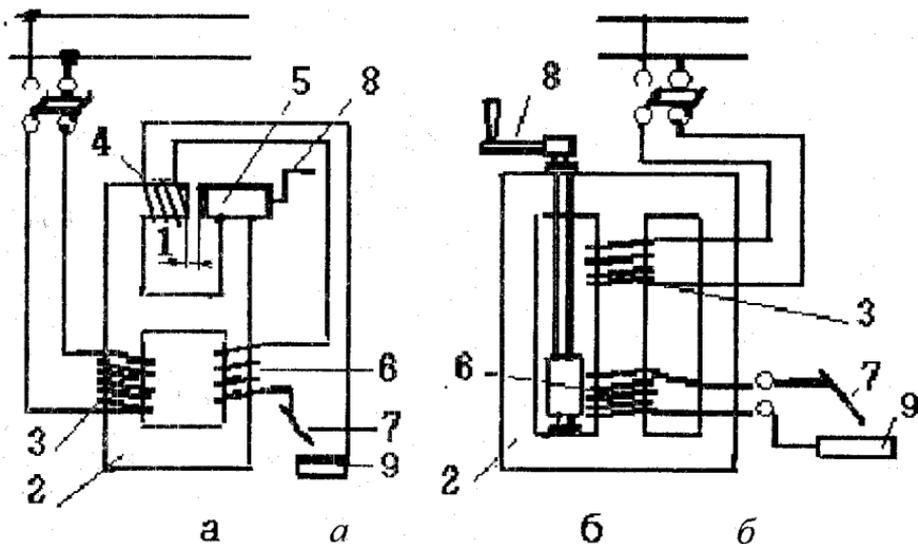


Рис .2.17. Схеми зварювальних трансформаторів:
а – з нормальним розсіюванням (типу СТН); *б* – з підвищеним розсіюванням (тип ТС-ТД); 1 – зазор; 2 – осердя трансформатора; 3 – первинна обмотка; 4 – реактивна обмотка; 5 – рухоме ярмо дроселя; 6 – вторинна обмотка; 7 – електрод; 8 – рукоятка регулювання струму; 9 – заготовка.

Трансформатори типу ТД позначаються таким чином: ТДМ – 317, де: Т – трансформатор, Д – для дугового зварювання, М – механічне регулювання, 31 – номінальний струм 310 А, 7 – номер моделі.

Трансформатори характеризуються великою металоємністю (значні габарити і маса) й тому не дуже мобільні в роботі. Якість зварювання за допомогою трансформаторів є нижчою, ніж у разі зварювання постійним струмом, але затрати енергії менші, ніж у генераторів. у додатку 1 наведено характеристики деяких трансформаторів.

Генераторами постійного струму можуть бути зварювальні перетворювачі, що працюють у комплексі із асинхронними електродвигунами, або зварювальні агрегати, що працюють у комплексі з двигунами внутрішнього згоряння. Перші використовують здебільшого в умовах підприємств, тому що вони потребують наявності електричної мережі, другі - більш металоємні, мають менший коефіцієнт корисної дії; їх застосовують переважно в польових умовах. Характеристики деяких генераторів наведено в додатку 2, серед яких

типи агрегатів АДД-200 1 М, АДД 300 1 М і АДД 400 1 М є більш сучасними. На виході вони можуть працювати на одній або трьох фазах за струму 230 В, 50 Гц. Для них характерні плавне регулювання зварювального струму, легкий підпал дуги і системи захисту складових агрегата. Недоліками зварювальних генераторів можна вважати наявність обертальних частин і низький ККД (до 60%). Більш сучасними й досконалішими джерелами живлення постійним струмом є випрямлячі й інвертори.

Зварювальні випрямлячі складаються з двох частин: трансформатора з пристроєм для регулювання зварювального струму і випрямного блока. Вони надійні в роботі. Більшість сучасних випрямлячів є універсальними. Їх застосовують для комплектації зварювальних напівавтоматів, автоматів і роботів для зварювання в середовищі захисних газів та під шаром флюсу, а також для ручного дугового зварювання і різання електродами з покриттям усіх типів на прямій та зворотній полярності. До таких, наприклад, належать випрямлячі типів КИУ 301, КИУ 501, КИУ 1201 (додаток 3). Деякі з випрямлячів оснащені автоматизованими пристроями “Гарячий старт” і “Форсована дуга”. Під час застосування “Гарячого старту” відбувається короткочасне (~0,5 с) підвищення зварювального струму. Ця функція забезпечує швидке та впевнене загоряння дуги, запобігає прилипанню електрода до деталі й утворенню зварювальних дефектів. Форсування дуги виконується за виникнення короткого замкнення внаслідок тимчасового підвищення зварювального струму. Ця функція забезпечує стабільне горіння дуги, дає змогу зварювати в зручному положенні, полегшує роботу оператора. До випрямлячів із указаними функціями належать ВДИ-200S, ВДИ-200М і ВДИ-200Р, які виготовляє дослідний завод “ПАТОН”.

Випрямлячі позначають так: ВД – 401, де В – випрямляч, Д – для дугового зварювання, 40 – номінальний струм 400 А, 1 – номер моделі.

Найбільш досконалим зварювальним апаратом є інвертор. Інверторний зварювальний апарат з'явився в ХХ столітті, а на початку ХХІ століття став одним із найпопулярніших зварювальних апаратів для всіх видів дугового зварювання.

Інверторні джерела зварювального струму для всіх видів зварювання влаштовані однаково. Відмінність полягає лише в формованій вольт-амперній характеристиці. Тому можливий випуск універсальних інверторів, придатних для різних видів зварювання (ММА, TIG, MIG / MAG).

Робота зварювального інвертора побудована на принципі інверсії

напруги з частоти 50 Гц у високочастотну напругу, що здійснюється за допомогою електронної мікропроцесорної схеми з каскадним збільшенням струму. Завдяки застосуванню цього принципу вдається отримувати широкий спектр вольт-амперних характеристик – від крутоспадної до зростаючої, що дає змогу досягати високої якості зварювання.

Інвентор складається з послідовно розміщених вузлів - випрямляча, перетворювача постійного струму в струм високої частоти, трансформатора, ще одного випрямляча і пристрою керування струмом.

Інвертори працюють від зовнішньої мережі, змінний струм якої спочатку за допомогою випрямляча перетворюється на постійний, а потім за допомогою перетворювача – на струм високої частоти. Необхідність таких перетворень пояснюється тим, що робота інвертора побудована на електрофізичному законі, за яким маса і габарити трансформатора зменшуються пропорційно збільшенню частоти струму. Наприклад, за збільшення частоти струму в 1000 разів розміри трансформатора у складі інвертора зменшуються у 10 разів. Звичайно частота струму інверторів становить 40...45 кГц. Від трансформатора змінний струм за допомогою випрямляча перетворюється в постійний і потрапляє до пристрою керування, де відбувається його стабілізація, завдяки якій зменшується розбризкування металу. Крім того, цей пристрій захищає від дуже високої або низької живлячої напруги, а також дає можливість регулювати силу струму, збільшуючи його в момент, близький до прилипання електрода (форсаж дуги), що особливо важливо в момент запалювання. Всі інвертори мають плавне регулювання зварювального струму, а цифрова схема мікропроцесора і введення комірок пам'яті дозволяє забезпечувати запам'ятовування необхідних режимів зварювання. Завдяки цим пристроям поліпшуються якість і зручність зварювальних робіт.. На рис. 2.18 показано зовнішній вигляд одного з інверторів.

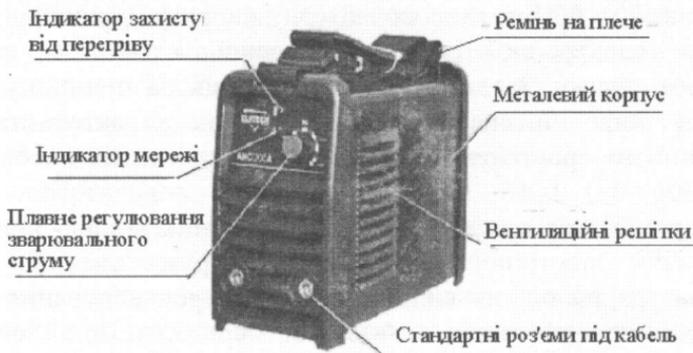


Рис. 2.19 Зовнішній вигляд одного з інвенторів

В табл. 2.3 наведені характеристики зварювальних інвенторів і, для порівняння, - характеристики трансформаторів, із них можна побачити великі переваги, якими володіють інвентори.

Таблиця 2.3

Порівняльні характеристики трансформаторів та інвенторів

Порівняльні характеристики джерел зварювального струму	Трансформатор	Інвентор
Напруга електроживлення	220В або 380В, ± 5 ... 10% п.5.2. ГОСТ 13109-97	220В або 380В, мінус 30% ... + 15%
Електрозахист	Відключається при к.з.	Відключається при: к.з., перегріві, «прилипанні» електрода і т. п.
Зварювальний струм	Тільки змінний, регулювання грубе	Змінний і постійний, регулювання плавна регулювання сили зварювального струму залежно від параметрів зварювального процесу;
Додаткові опції	Нема	- «HOT START» (забезпечує легкий підпал дуги); - «ARC FORCE» (дозволяє уникати прилипання електрода до виробу); - «ANTI STICK» (автоматично вимикає інвентор при

		найменшому електрода зварювання);	прилипанні в процесі
Маса	Велика	Дуже маленька (від 2,5 кг)	
Кваліфікація обслуговуючого персоналу	Низька	Дуже висока	
Мобільність	Для переміщення потрібен транспорт	Легко переміщається в руках	
ККД	Низький (близько 50%)	Високий (до 80-90%)	
Вартість ремонту	Низька	Дуже висока	
Коефіцієнт уривчастості (КП)	Немає такої вимоги	Є при зварюванні на максимальному струмі	

Інвертори мають невелику масу (від 2,5 кг) і відповідні габарити. Коефіцієнт корисної дії інверторів не буває нижчим, ніж 75%, а в більшості випадків дорівнює 80...90%. Напруга холостого ходу становить 80...90 В. Інвертори витримують перепади напруги і мають високу стабільність зварювального струму, завдяки чому зменшується розбризкування іскор та металу. Вони являють собою мобільні джерела струму завдяки малій масі, а також можливості застосування мережевого кабелю великої довжини і скорочення зварювального кабелю. Інвертори малої потужності дуже перспективні для монтажу відповідальних металоконструкцій і трубопроводів, особливо за умов, коли неможливо застосовувати громіздке промислове обладнання. Потужні інвертори промислового типу дають змогу створювати зварювальні комплекси для будь-якого виду дугового зварювання. Їх застосовують для ручного, напівавтоматичного та інших видів зварювання вуглецевих і легованих сталей, кольорових металів тощо. Вартість інверторів вища від вартості звичайних зварювальних трансформаторів та випрямлячів на 25...50%. Але технічні переваги, якість зварних з'єднань, можливість застосування інверторів для виконання електричного зварювання різними методами, а також тенденція до зниження вартості дає змогу прогнозувати збільшення їх частки в загальному обсязі джерел живлення, що застосовуються для зварювання. Принцип роботи зварювального інвертора на порядок вище виробничих характеристик класичних агрегатів зварного промислу. Процес заміщення йде стрімко, і, без сумніву, такі апарати замінять традиційне зварювальне обладнання.

2.5.4. Ручне дугове зварювання

Ручним дуговим зварюванням (РДЗ) називається процес отримання нерознімного з'єднання робітником вручну без застосування засобів автоматизації шляхом розплавлення крайків зварювальних заготовок і присаджувального металу (електродів) завдяки дії електричної дуги, перемішуванню розплавленого металу і кристалізації розплавленої ванни металу, що призводить до утворення зварного шва. Джерелом тепла в цьому процесі є електрична зварювальна дуга. Схема ручного дугового зварювання показана на рис. 2.20.

Для зварювання робітник, використовуючи електроди, виконує три рухи: подавання електрода в напрямку дуги (перший рух) з метою компенсування його довжини під час згоряння, переміщення електрода вздовж (другий рух) і впоперек (третій рух) шва. Головним рухом, що забезпечує з'єднання металів, є рух уздовж шва, а рухи електрода впоперек потрібні для формування його ширини. Якість зварювання цілком залежить від майстерності робітника.

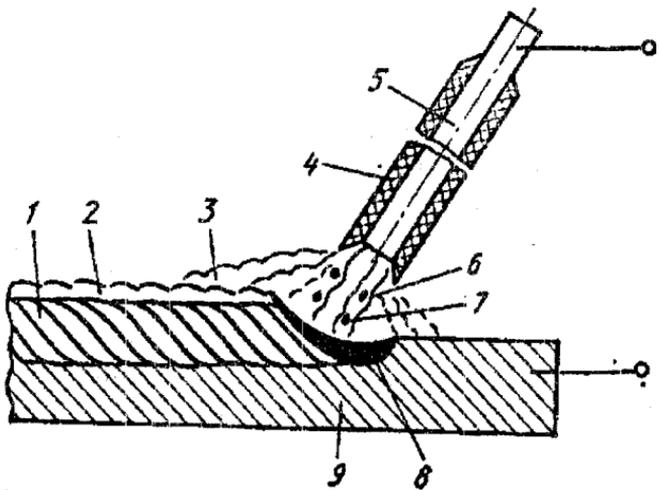


Рис. 2.20. Схема ручного дугового зварювання металевим покритим електродом: 1 – зварний шов; 2 – шлакова кірочка; 3 – захисна газова атмосфера; 4 – електродне покриття; 5 – електродний стрижень; 6 – електрична дуга; 7 – краплі електродного металу; 8 – зварна ванна; 9 – заготовка

Завдяки тому, що РДЗ характеризується мобільністю й

у сотих частках відсотка, а саме, 0,08 % С. Розглянемо інший приклад. У зварювальному дроті 4Св-08ХЗГ2М ГОСТ 2246-70 цифра 4 вказує на діаметр дроту, Св – зварювальний дріт, 08 – 0,08 % С, ХЗ – 3 % хрому, Г2 – 2% мангану, М – на наявність молібдену в кількості, що не перевищує 1,5 %. Таким чином цифри, проставлені в марках дроту, зазначають у відсотках орієнтовну кількість хімічних елементів, що входять до складу дроту.

Сталевий зварювальний дріт за ДСТУ ISO 14171:2008 (ISO 14171:2002 ITD) застосовують для виготовлення електродів із покриттям різного призначення для ручного дугового зварювання, а також для зварювання під шаром флюсу і в захисних газах.

Електроди з покриттям, в основному, повинні забезпечувати стійке горіння дуги, отримання бездефектного металу шва потрібного хімічного складу і властивостей, легке відокремлення шлакової кірки від поверхні шва і мінімальну токсичність у процесі виготовлення і зварювання.

Вказаних вимог дотримують за допомогою застосування відповідних матеріалів електродного дроту й покриття. До складу покриття додають стабілізаційні, шлакоутворювальні, газоутворювальні, розкиснювальні, легувальні та інші матеріали.

До *стабілізаційних* належать матеріали, які підвищують стійкість горіння дуги. Це хімічні з'єднання лужних і лужноземельних металів К, Na, Са, а також кальцинована сода, мармур, крейда тощо, що мають низький потенціал іонізації.

Шлакоутворювальні матеріали при розплавленні утворюють шлак, який захищає краплі електродного металу і зварну ванну від повітря. До них належать манганова руда, кварцовий пісок, граніт, мармур, доломіт тощо.

Газоутворювальні матеріали захищають зварну ванну. Це крохмаль, декстрин, целюлоза тощо.

Розкиснювачі очищують розплавлений метал від кисню. До них належать фероманган, феросиліцій, феротитан тощо, які мають більшу, ніж залізо, здатність з'єднуватись із киснем.

Легувальними є феросплави – ферохром, феросиліцій, феротитан та інші.

ДСТУ ISO 2560:2004 передбачено структурну схему позначення електродів згідно з тією, що на рис. 2.22.

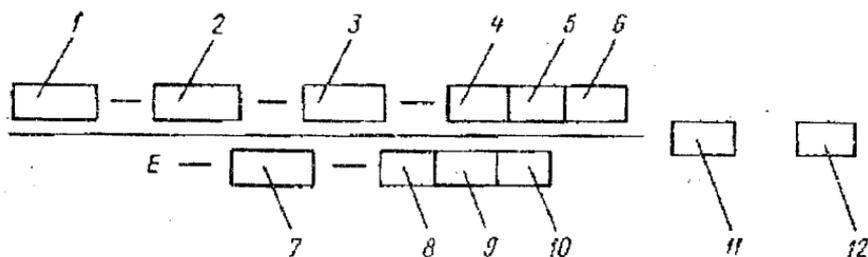


Рис. 2.22. Схема умовного позначення електродів

Номерами на рисунку позначені такі характеристики:

1. Тип електрода.

2. Марка електрода.

3. Діаметр електрода.

4. Призначення електродів, яке позначається літерами: У – для зварювання конструкційних вуглецевих і низьколегованих будівельних сталей із межею міцності $\sigma_b \leq 600$ МПа, Л – для зварювання легованих конструкційних сталей із межею міцності $\sigma_b \geq 600$ МПа, Т – для зварювання високолегованих сталей з особливими властивостями, Н – для наплавлення.

5. Товщина покриття позначається літерами: М – тонке покриття, коли відношення діаметра електрода з покриттям D до діаметра стрижня d становить $D/d < 1,2$; С – середнє покриття, коли $1,2 < D/d < 1,45$, Д – товсте покриття, коли $1,45 < D/d < 1,8$, Г – особливо товсте покриття, коли $D/d > 1,8$.

6. Групи за якістю, які встановлюються залежно від кількості сірки і фосфору у наплавленому металі. В електродів першої й другої груп сірки повинно бути менше, ніж 0,030...0,035%, фосфору – менш ніж 0,035...0,040%, в електродів третьої групи сірки менше, ніж 0,020...0,025%, фосфору – менш ніж 0,030...0,040%. Для кожного типу електродів за ГОСТ 10051 – 75 в таблицях зазначено більш точні показники вмісту сірки і фосфору.

7. Група індексів, що вказують на механічні характеристики наплавленого металу шва за державними стандартами України (ДСТУ 2651:2005 тощо). Наприклад, в електродів для зварювання вуглецевих і низьколегованих конструкційних сталей індекси 41 0, 41 2, 41 3...41 7 вказують на межу міцності σ_b , відносне видовження δ і максимальну температуру T_x (°C), за якою ударна в'язкість металу шва КС становить не менш, ніж 35 Дж/см². А саме: 41 вказує

на те, що $\sigma_b = 410$ МПа, а індекси, що стоять за індексом 41, вказують на відносне видовження δ , яке згідно з таблицями, що містяться в ГОСТ 9467-75, змінюється від 20 до 24% за збільшення їх значень від 0 до 7. Відповідно до зростання значень цих індексів змінюються також значення T_x (°C) від +20 до -60°C

8. Позначення виду покриття. Розрізняють такі види покриттів: кисле - А, основне - Б, целюлозне - Ц, рутилове - Р, змішане покриття - відповідно подвійне позначення, інші види покриття - П.

9. Позначення припустимих просторових положень зварювання: для всіх просторових положень - 1; для всіх положень, крім вертикального знизу вгору, - 2; для нижнього, горизонтального і вертикального знизу вгору - 3; для нижнього і нижнього "у човник" - 4.

10. Позначення роду струму і полярності: 0 - на постійному струмі зворотної полярності; 1 - на постійному струмі будь-якої полярності; 2 - на змінному струмі.

11 і 12. Номери державних стандартів, які прийняті в Україні..

Наприклад, розшифруємо позначення, що може стояти на одній із пачок електродів:

Э-42А - УОНИ 13/45 - 4,0 - УД2

Е - 41 2 - Б10

ГОСТ.9466-75. ГОСТ.9467-75

Ці написи свідчать про таке: Э-42А - тип електрода, УОНИ13/45 - марка електрода, 4,0 - діаметр електрода, мм, У - електроди, призначені для зварювання вуглецевих і низьколегованих будівельних конструкційних сталей, Д - товсте покриття, 2 - друга група якості, 41 2 - індекси, з них 41 вказує на те, що $\sigma_b = 410$ МПа, а індекс 2 вказує на відносне видовження δ , яке згідно з таблицями, що містяться в ГОСТ 9467-75, дорівнює 22%, а T_x становить 0°C, Б - основне покриття, 1 - зварювання можливе в усіх просторових положеннях, 0 - зварювання на постійному струмі зворотної полярності. У додатку 5 наведено деякі характеристики електродів.

Просторове положення зварювання на упаковці імпортних електродів може бути зображене за схемою, наведеною на рис 2.23.

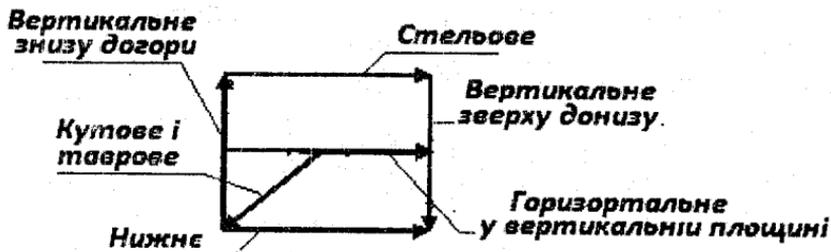


Рис. 2.23. Схематичне зображення просторового положення під час зварювання

Неплавкі електроди, що використовуються для зварювання способом Бенардоса, бувають вугільними, графітовими та вольфрамовими.

Якість зварювання залежить від правильно вибраного режиму зварювання: діаметра електрода, сили зварного струму, напруги зварювання, довжини дуги, швидкості зварювання та виду шва. Спочатку, залежно від товщини зварного металу S і типу зварного з'єднання, вибирають діаметр електрода d_e згідно з табл. 2.4.

Таблиця 2.4

$S, \text{мм}$	0,5...2	1,1...2	2,1...5	5,...10	10...15	15...20	>20
$d_e, \text{мм}$	1...1,5	1,5...2,5	3...4	4-5	5...6	5...8	5...10

За вибраним діаметром електрода d_e (без обмазки) визначають силу струму I , користуючись формулою

$$I = k d_e,$$

де I – сила струму під час зварювання, А; k – коефіцієнт. Для зварювання низьковуглецевої сталі металевим електродом k становить 40...60 А/мм, а для високолегованої сталі – 25...40 А/мм; вугільним електродом – 5...8 А/мм і графітовим – 18...22 А/мм.

Робоча напруга для постійного струму становить 20-25В, для змінного – 25-30 В.

Довжина дуги l орієнтовно визначається діаметром електрода і міститься в межах

$$l = 0,5(d_e \pm 1,2), \text{ мм.}$$

Зменшення довжини дуги погіршує формування шва і навіть може призвести до короткого замикання. Збільшення довжини дуги спричиняє зниження глибини проварювання, збільшення

розбризування електродного металу і погіршення механічних властивостей.

Швидкість зварювання орієнтовно можна визначити за формулою:

$$V = L / t_0, \text{ м/год,}$$

де L – довжина шва, м; t_0 – основний час горіння дуги, год.

Наведені параметри є орієнтовними. Електрозварювальник, маючи належний практичний досвід, корегує їх залежно від якості зварювання. Наприклад, якщо розрахована сила струму не забезпечуватиме нормального горіння дуги з певним характерним звуком, а електрод почне прилипати до металу, що зварюється, тоді електрозварювальник підвищує силу струму, а в разі сильного розбризування металу – навпаки, знижує силу струму.

До технологічних параметрів дугового зварювання належать також коефіцієнти наплавлення і розплавлення, а також коефіцієнт витрат на згорання й розбризування.

Коефіцієнт наплавлення – це маса електродного металу, що наплавляється за одну годину і припадає на один ампер зварювального струму. Він визначається за формулою

$$K_n = 3600 \frac{M_n}{It_0}, \text{ г/ А} \cdot \text{год,}$$

де M_n – маса металу, що наплавляється, г; I – сила струму, А; t_0 – час горіння дуги, с.

Коефіцієнт розплавлення – це маса електродного металу, що розплавляється за одну годину і припадає на один ампер зварювального струму. Він визначається за формулою

$$K_p = 3600 \frac{M_p}{It_0}, \text{ г/ А} \cdot \text{год,}$$

де M_p – маса електродного металу, що розплавляється, г.

Коефіцієнт розплавлення завжди більший, ніж коефіцієнт наплавлення, через згорання і розбризування частини електродного металу.

Коефіцієнт витрат на згорання й розбризування визначається за формулою

$$\Psi = 100 \frac{M_p - M_n}{M_p}, \%$$

Зазначені коефіцієнти застосовують для нормування ручного дугового зварювання.

Час горіння дуги визначається за формулою

$$t_0 = \frac{M_n}{IK_n}, \text{ год.}$$

Час зварювання:

$$t = \frac{t_0}{K_n}, \text{ год,}$$

де K_n – коефіцієнт застосування зварювального поста.

За умов підприємств $K_n = 0,7 - 0,8$; за польових умов $K_n = 0,4 \dots 0,6$.

Витрати електродів:

$$M_{\text{ЕЛ}} = \frac{M_n}{1000} \left(1 + \frac{\psi}{100}\right) K, \text{ кг}$$

де K – коефіцієнт, у якому враховано масу недогарків і масу покриття. Маса недогарків визначають як 10-15% маси електрода, а масу покриття – 15-35%.

За нормального режиму ручного дугового зварювання досягається провар на 3-4 мм. Для запобігання непровару перед зварюванням роблять скоси крайків металів (рис. 2.5). Стикові з'єднання з V-подібною обробкою (зі скосом однієї або двох крайок) рекомендовано застосовувати для металів завтовшки від 4 до 26 мм. За більшої товщини металу застосовують U-подібні скоси однієї або двох крайків. За можливості кантування стикового з'єднання або зручного доступу з обох боків на металі завтовшки від 12 до 40 мм виконують K-подібну, а за товщини від 12 до 60 мм – X-подібну підготовку крайків. В останньому випадку кількість наплавленого металу порівняно з наплавленим металом з V-подібною обробкою крайків зменшується майже у 2 рази. Зменшуються також напруження і деформації в металі.

Для запалювання дуги треба кінцем електрода торкнутися до металу в місці зварювання, а потім швидко відвести електрод на 2-3 мм, тобто на відстань довжини дуги (рис. 2.24, а). У момент відведення електрода запалюється дуга, постійну довжину якої підтримують під час зварювання. На рис. 2.24, б показана інша схема запалювання дуги способом коливання кінчика електрода. Для запалювання електричної дуги потрібна напруга джерела живлення за змінного струму не менш ніж 55...65 В, а за постійного – 40...60 В. Дуга за постійного струму горить більш стійко, якість зварювання краща, проте витрата електроенергії і вартість зварювання – вищі.

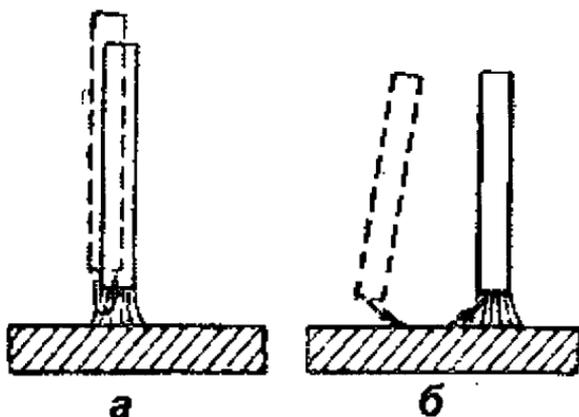


Рис. 2.24. Способи запалювання дуги

Для надійного проплавлення крайок заготовок й отримання потрібної якості наплавленого металу треба утримувати постійну довжину дуги. У разі пересування електрода без коливань ширина валика дорівнює $v = (0,8 \dots 1,5) d_e$. Такі валики утворюються у процесі виконання першого шару багатопрохідного шва, під час зварювання тонкого металу, а також у разі зварювання електродом із товстим покриттям короткою дугою. В більшості випадків для виконання однопрохідного шва зварювання здійснюють із поперечним коливанням кінця електрода в певних межах. Тоді шов має ширину $v = (2 \dots 4) d_e$. Схеми коливань кінця електродів показана на рис. 2.25.

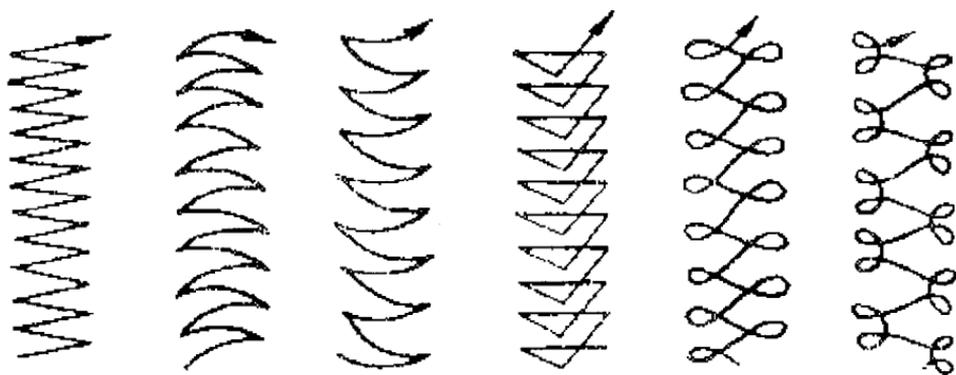


Рис. 2.25. Схеми коливань кінця електродів

Коливання кінця електрода сповільнюють вистигання зварювальної ванни, покращують прогрівання країв шва і забезпечують отримання

більш однорідного наплавленого металу з кращим проварюванням кореня шва. Тонкі листи металів (до 3...4 мм) зварюють без розділення крайок (рис. 2.26, а).

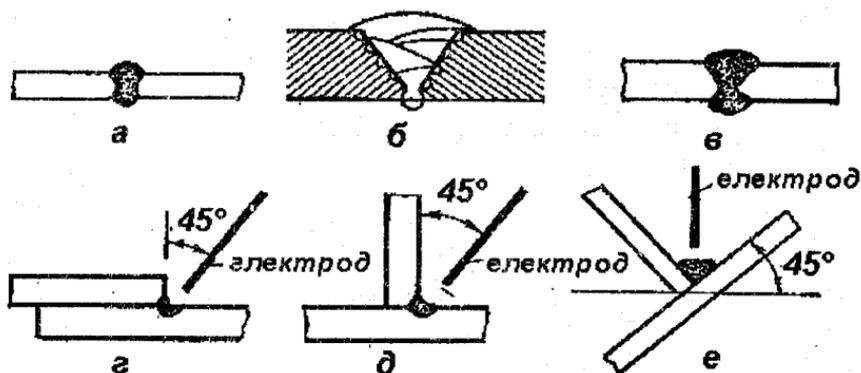


Рис. 2.26. Схеми дугового зварювання залежно від положення заготовок і їх товщини

Більш товсті листи з V-подібним розділенням крайок зварюють за один або декілька проходів (рис. 2.26, б). Процес починають із запалювання дуги поблизу скосу крайок. Далі на тому ж рівні виконують наплавлення валика металу за один або декілька проходів. Кількість проходів визначають, зважаючи на діаметр електрода і товщину листа. Товщина кожного шару наплавленого металу дорівнює $(0,8...1,2) d_{ел.}$. Х-подібні шви виконують шляхом змінного накладання валиків з обох боків, завдяки чому зменшується деформація (рис. 2.26, в). Для виконання кутових швів електрод розміщують під кутом 45° до поверхні деталі (рис. 2.26, г, д, е).

Застосовують РДЗ для виготовлення і монтажу будівельних конструкцій, закладних деталей, для монтажних з'єднань елементів арматури залізобетонних конструкцій, стикового зварювання труб тощо. РДЗ застосовують для з'єднання металів, що мають товщину в межах від 1 до 30 мм.

Продуктивні способи ручного дугового зварювання.

Продуктивність зварювання залежить від організаційних і технічних заходів. Ми розглянемо лише технічний бік процесу й визначимо продуктивність з огляду на кількість наплавленого металу за годину зварювання. Тоді продуктивність Π буде дорівнювати $\Pi = K_n I$, де K_n – коефіцієнт наплавлення, який указує на те, скільки грамів металу (електрода) здатні розплавлятися за одну годину за сили струму I в один ампер (г/А год). Відповідно до цієї формули продуктивність

можна збільшувати завдяки підвищенню K_n , сили струму I або обох показників одночасно.

Підвищувати K_n можна шляхом підбору електродів із більшим коефіцієнтом наплавлення. Наприклад, заміна електрода марки ОММ, що має коефіцієнт наплавлення 7,5 г/А год на електрод марки ЦМ-7, що має коефіцієнт наплавлення 11 г/А год, скорочує основний час зварювання майже в 1,5 рази.

Збільшувати K_n можна також, якщо в обмазку електрода додавати 50 – 60% залізного порошку або феросплавів. До таких електродів належать АН-1, ОЗС-3, ЗРС-1. Продуктивність зварювання такими електродами збільшується в 1,5-2 рази.

Підвищення продуктивності зварювання РДЗ завдяки підвищенню зварювального струму має певну межу, тому що за великого струму збільшується сила електромагнітного дуття, яка за певних великих значень струму призводить до розбризкування і виплескування металу із зварної ванни. Однак можна підвищувати продуктивність завдяки збільшенню сили струму, застосовуючи електроди більшого діаметра.

Для збільшення продуктивності РДЗ застосовують також такі способи: зварювання електродом, що опирається на чохольчик покриття, пучком електродів, похилим, лежачим електродом і трифазною дугою.

Зварювання електродом, що опирається на чохольчик покриття, виконують електродом із збільшеною товщиною покриття, яке розплавляється пізніше, ніж метал стрижня. Завдяки цьому на кінці електрода утворюється конусоподібний чохольчик (рис. 2.27).

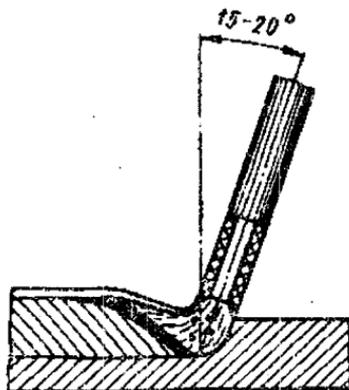


Рис. 2.27. Зварювання електродом, що опирається на чохольчик покриття

Під час зварювання електрод опирається чохлачком у метал і пересувається без поперечних рухів уздовж осі шва під кутом $70 - 85^\circ$. Силу зварювального струму при цьому можна збільшувати на 20 і більше відсотків. За такої схеми зварювання досягається більш глибоке проплавлення завдяки належній концентрації тепла в металі і меншим втратам на розсіювання, а швидкість пересування дуги збільшується. Порівняно із звичайним ручним дуговим зварюванням продуктивність підвищується в 1,5 – 2 рази.

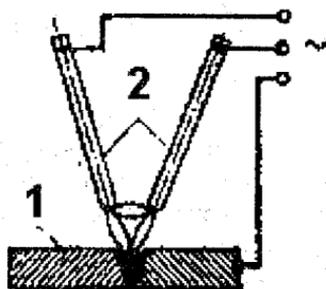
У разі зварювання похилим або лежачим електродом досягається горіння короткої дуги і глибоке проплавлення металу. В цих випадках економно витрачається тепло, завдяки чому продуктивність підвищується приблизно в 1,5 рази.

Методи зварювання електродом, що опирається на чохлачок покриття, похилим та лежачим електродом застосовують переважно для зварювання у нижньому положенні кутових, стикових і таврових з'єднань.

Для зварювання пучком електродів два, три чи більше електродів з'єднують у пучок, який вставляють в електродотримач. У процесі зварювання всі електроди не горять одночасно. Дуга горить на електроді, ближчому до поверхні металу. Після оплавлення цього електрода дуга перекидається на інший електрод, який у цей момент буде на найближчій відстані від металу. Такий процес перескакування дуги з одного електрода на інший триває, поки відбувається зварювання. Продуктивність завдяки застосуванню цього методу підвищується в 1,5 рази.

Під час зварювання трифазною дугою діють одночасно три зварювальні дуги: дві між електродами і металом й одна між електродами (рис 2.28). Продуктивність при цьому підвищується в 2-3 рази .

Рис. 2.28. Схема зварювання трифазною дугою:
1 – заготовка; 2 - електроди



2.5.5. Автоматичне зварювання

Найчастіше застосовують автоматичне зварювання під флюсом.

Автоматичне зварювання під флюсом – це процес, коли дуга горить під шаром сипкого гранульованого флюсу, що, розплавляючись, утворює шлак, який захищає зону зварювання від навколишньої атмосфери (ДСТУ 3761.2 2-98). Електрод при цьому у вигляді металевого дроту автоматично подається у зону горіння зварювальної дуги і одночасно перусувається вздовж шва. Схему горіння дуги за зварювання під флюсом наведено на рис. 2.29.

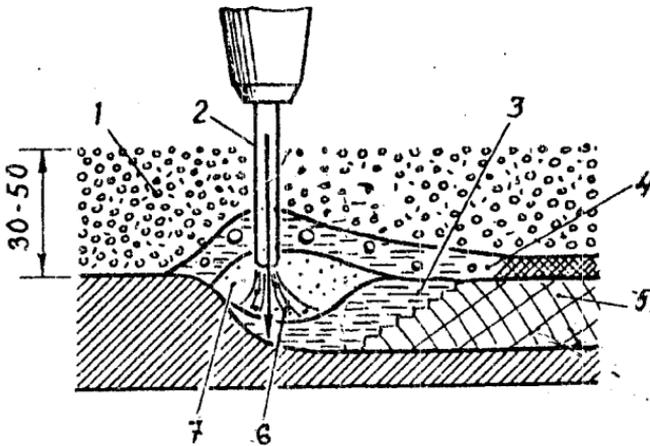


Рис. 2.29. Схема горіння дуги зварювання під флюсом:

1 – шар флюсу; 2 – електрод; 3 – зварювальна ванна; 4 – шлакова кірка;
5 – шов; 6 – дуга; 7 – газовий міхур

Під час горіння дуга (6) плавить метал і флюс (1) над поверхнею металу. Призначення флюсу – запобігання контакту зони зварювання з повітрям. Крім того, флюс сприяє підвищенню стійкості горіння дуги, кращому формуванню поверхні шва, розкисленню, легуванню наплавленого металу. Після охолодження розплавлений флюс перетворюється у шлакову кірку (4), яка повинна легко відділятися від наплавленого металу.

Горіння дуги відбувається в газовому міхурі (7), вкритому зверху розплавленим флюсом. В об'ємі цього міхура завдяки застосуванню струму великої сили відбувається розбризкування розплавленого

металу, стікання його донизу і притиснення в напрямку, протилежному руху дуги, що забезпечує надійне формування зварного шва. Саме завдяки наявності газового мішура з'являється можливість підвищувати зварювальний струм і, як наслідок, підвищувати продуктивність зварювання.

Зварювання під флюсом виконують сталевим дротом без покриття в автоматичному або механізованому режимі.

На рис. 2.30 зображено схему установки автоматичного дугового зварювання під флюсом, розроблену Інститутом електрозварювання ім. Є. О. Патона. Електродний дріт 4 подається до місця зварювання зварювальною голівкою зі швидкістю, яка дорівнює швидкості плавлення дроту у зварювальній дузі. Струм від джерела живлення підводять до зварного виробу і до зварювальної головки. Під час зварювання на підготовлені краї заготовок до місця зварювання 1 попереду електрода подається зі спеціального бункера 2 гранульований флюс. Нерозплавлена частина флюсу автоматично відсмоктується в бункер через сопло і шланг 3.

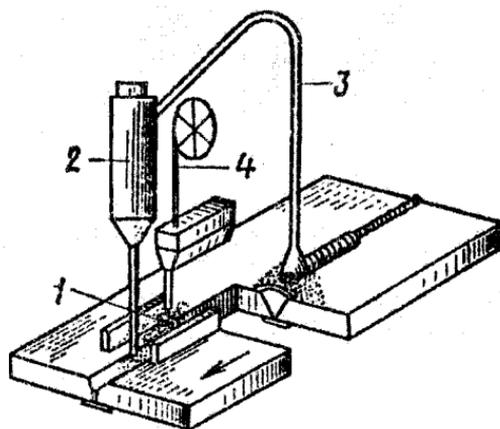


Рис. 2.30 Схема автоматичного зварювання під флюсом

Режимами зварювання передбачені сила струму від 150 до 2000 А (іноді застосовують струм до 4000 А); напруга на дузі – 22...55 В; швидкість зварювання – 30...120 м/год.

Продуктивність способу зварювання під флюсом перевищує продуктивність ручного дугового зварювання у 6-10 разів переважно

завдяки можливості збільшити силу зварного струму порівняно з силою струму під час зварювання відкритою дугою. За ручного дугового зварювання неможливо, підвищуючи силу струму, досягти високої продуктивності, тому що в цих умовах відбуватиметься розбризування металу під дією електромагнітних сил, а в умовах зварювання під флюсом розбризування не страшно, тому що весь розплавлений метал стікає з поверхні газового міхура донизу й утворює надійний зварний шов. Цей шов має лускоподібну поверхню, вкриту шлаковою кіркою, що легко відділяється від поверхні шва. Значна величина струму дає змогу проплавляти метал на глибину 60 мм. Перевагами автоматичного зварювання під шаром флюсу є також висока економічність і кращі умови праці.

Для зварювання вуглецевих і низьколегованих будівельних сталей звичайно застосовують електродний дріт низьковуглецевих марок Св-08, Св 08А, Св-08ГА та ін. діаметром 1,6-6 мм.

Флюси бувають *плавлені і керамічні*. До плавлених флюсів належать флюси марок АН-348А, ОСЦ-45, АН-60, АН-60СМ та інші (ГОСТ 9087-69). Їх виготовляють шляхом плавлення компонентів в електропечі з подальшою грануляцією отриманого розплаву. Компонентами є манганова руда, плавиковий шпат, кварцовий пісок та інші складові. Ці флюси містять невелику кількість легувальних елементів.

Керамічні флюси виготовляють шляхом змішування порошків компонентів із рідким склом до утворення однорідної тістоподібної маси, наступного сушіння, спікання і дроблення. В результаті отримують флюс, що складається з гранул певних розмірів. Ці флюси можуть містити багато легувальних домішок, тому більшість з них використовують для зварювання легованих сталей і кольорових металів. Для зварювання будівельних конструкцій застосовують флюси К1, К2, АНК-30 та інші. Останнім часом почали виготовляти флюси АНК-561 і АНК-57, що мають поліпшені санітарно-гігієнічні властивості.

Як обладнання для автоматичного зварювання під флюсом застосовують зварювальні трактори й головки (див. додаток 5). Зварювальний трактор – це самохідний пристрій, який рухається вздовж шва і виконує зварювання в автоматичному режимі (рис. 2.31). Він складається з самохідного візка (1), колонки (2), пульта управління (3), касети для електродного дроту (4), бункера з флюсом (5), зварювальної головки (6) з мундштуком (7).

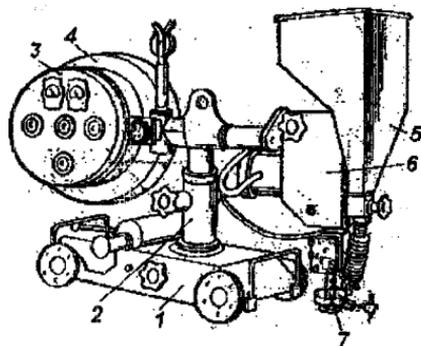


Рис. 2.31. Трактор для автоматичного зварювання під флюсом

Зварювальні трактори застосовують для швів великої довжини і простої конфігурації в нижньому положенні.

Зварювальні головки, на відміну від тракторів, є стаціонарним обладнанням, а рухаються зварювальні заготовки. Вони широко застосовуються в станах для виготовлення зварних труб та інших виробів.

Широко застосовують автомати таких марок: ТС (трактор зварювальний), АДС (автомат дуговий зварювальний), УТ (універсальний трактор) тощо.

Щоб не сталося пропалювання під час зварювання під флюсом, вживають різноманітних заходів. Наприклад, за стикового зварювання часто застосовують двобічні шви (рис. 2.32, а); за однічного зварювання – мідні підкладки, які вилучають, або сталеві підкладки, що залишаються після зварювання (рис. 2.32, б і в). Застосовують також зварювання з попереднім ручним або автоматичним підварюванням кореня шва (рис. 2.32, г), а також зварювання на флюсовій подушці (2.32, д). Для виконання кутових швів застосовують зварювання “у човник” (рис. 2.32, е і ж).

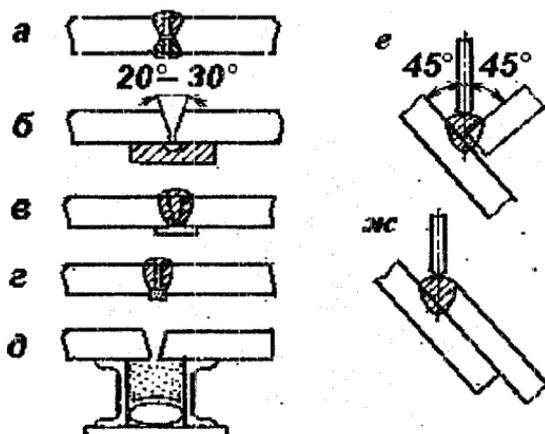


Рис. 2.32. Формування шва за автоматичного зварювання: а – двобічний шов; б – на мідній підкладці, що вилучається; в – на підкладці, яка залишається; г – з ручним підварюванням кореня шва; д – на флюсовій подушці; е і ж – зварювання «у лодочку».

Автоматичне зварювання під шаром флюсу доцільно застосовувати в серійному виробництві для зварювання прямолінійних швів значної довжини, наприклад, у виготовленні балок, листових конструкцій, шви яких мають велику протяжність.

Крім зварювання під шаром флюсу можливо застосування також інших видів автоматичного зварювання: автоматичне зварювання в захисних газах, а також зварювання порошковим дротом, але автомат для зварювання цими видами зварювання повинен бути переобладнаним певним чином

2.5.6. Механізоване зварювання

При механізованому (напівавтоматичному) зварюванні застосовують напівавтомати. Зварювальний напівавтомат – це електромеханічний прилад для виконання зварювального процесу шляхом механізованої подачі зварювального дроту до місця зварювання (до зварювальної ванни). Швидкість подачі дроту встановлюється зварювальником на самому апараті, а швидкість і стабільність швидкості переміщення пальника вздовж шва залежить тільки від робітника. В ролі джерела живлення в напівавтоматі може використовуватися трансформатор, випрямляч або інвертор. Від вибору варіанта джерела живлення будуть залежати габ-

ритні розміри, вага і ціна пристрою. Для кращої якості зварного шва й спрощення умов роботи, рекомендується використовувати зварювальний інвертор. Напіваавтоматів є велика кількість. Кожен напіваавтоматичний апарат складається з наступних незамінних блоків:

1. джерело струму для зварювання,
2. редуктор з двигуном і механізмом для переміщення дроту,
3. пальник з рукавом,
4. зварювальний кабель для підключення затиску до зварюваної деталі (це щоб замкнути зварювальний ланцюг),
5. рукав для подачі газу до вхідного штуцера апарату,
6. балон із знижуючим тиск редуктором (при зварюванні у захисних газах),
7. система управління, яка управляє пуском, зупинкою дроту, регулюваннями швидкості подачі і потужності дуги.

На рис. 2.33 показано зовнішній вид одного з напіваавтоматів інверторного типу для зварювання за способом MIG, на якому показано корпус напіваавтомата (1); який містить джерело струму для зварювання – інвертор, систему управління потужністю дуги тощо, 2- зварювальний кабель для підключення затиску до зварюваної деталі з рукавом для подачі газу й зварювального дроту, система, яка управляє пуском, зупинкою дроту, регулюваннями швидкості подачі зварювального дроту; 3 – пальник.

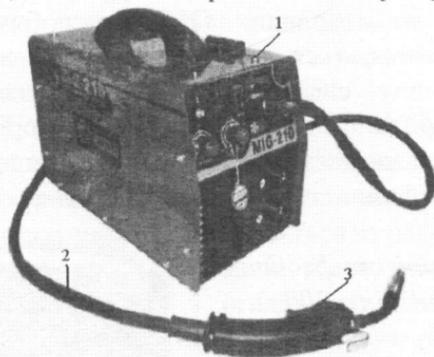


Рис. 2.33. Зовнішній вигляд одного з напіваавтоматів інверторного типу для зварювання за способом MIG: 1 – корпус напіваавтомата, який вміщує джерело струму для зварювання – інвертор, систему управління, яка управляє потужністю дуги тощо; 2 - . зварювальний кабель для підключення затиску до зварюваної деталі з рукавом для подачі газу і зварювального дроту; 3 – пальник

Зварювальні напіваавтомати можна розділити на дві категорії за

виконанням: однокорпусні, ті, в яких механізм подачі дроту, джерело зварювального струму і система управління розміщені в одному корпусі та більш складні, які розділені на дві і більше частин, в яких механізм, що подає зварювальний дріт з пальником міститься в одному блоці, а джерело зварювального струму з керуванням – в іншому. При великих навантаженнях рекомендується дообладнувати пальник спеціальним водяним охолодженням з блоком циркуляції. Апарати для напівавтоматичного зварювання розділяють також за способом живлення, за типом пристрою, що подає дріт, за ціною категорією тощо. За способом живлення розділяють напівавтомати однофазні (220), які дуже зручні при виконанні робіт «на виїзді», а також трифазні (380), які не скрізь мають можливість житися, але мають більшу стабільність у роботі при різних навантаженнях. Також вони рівномірно розподіляють навантаження за всіма трьома фазами і менше навантажують мережу.

За ціною категорією зварювальні напівавтомати поділяють на побутові та такі, що мають більшу ціну, й професійні. Побутові зварювальні напівавтомати застосовують для нетривалих навантажень. Вони виконані у вигляді моноблока і здатні чимало років працювати, якщо експлуатуються епізодично. Напівавтомати, які мають більшу ціну більш витривалі, часто мають гарну фурнітуру і можуть використовуватися на невеликих СТО і виробництвах. Професійні напівавтомати розробляються для промислового використання. Вони мають більш складну систему управління і володіють великим функціоналом у порівнянні з попередніми категоріями. Ресурс такого обладнання набагато вище загальнодоступних апаратів. На рис. 2.34 представлений трьохфазний напівавтомат для професійного зварювання.

Рис. 2.34. Трьохфазний професійний напівавтомат Aurora 200

Напівавтомати цієї компанії базуються на технологіях IGBT і MOSFET, що забезпечують високу якість інверторного обладнання, призначеного для ефективного зварювання. Лінійка зварювальної техніки фірми досить широка, але ми докладно опишемо один популярний апарат під цим брендом - SPEEDWAY 175.



Даний напівавтомат є універсальною установкою, що дозволяє виконувати такі види зварювання:

- MMA - ручна дуга з штучними стрижнями;
- MIG / MAG - в середовищі газу (нейтрального / активного);
- TIG DC - аргонодуга на постійному струмі;
- NO GAS – самозахисна із порошковим дротом

Широку гаму зварних напівавтоматів випускають українські заводи під брендом Патон серії Standart та PRO. Зварювальні напівавтомати ПАТОН поєднують у собі всі переваги сучасних інверторів - високу надійність, технологічність, компактність і простоту у використанні. Напівавтомати ПАТОН інверторного типу за рахунок своєї універсальності, надійності і відмінних експлуатаційних параметрів визнані одними з найефективніших агрегатів для зварювання металевих конструкцій і виробів. Інверторні напівавтомати ПАТОН відразу завоювали ринок. Причому переваги використання напівавтоматичних інверторів оцінили як любителі, так і справжні професіонали зварювальної справи. Обов'язковим механізмом, який має інвертор-напівавтомат, є пристрій, що подає в зону зварювання дріт. Це може бути будь-який дріт діаметром від $\varnothing 0,6\text{мм}$ до $\varnothing 1,2\text{мм}$. Зварювальні напівавтомати інверторного типу ПАТОН дають можливість швидко і ефективно виконувати зварювання в механізованому режимі за допомогою електрода, що плавиться в середовищі захисного газу. З їх допомогою здійснюють з'єднання виробів з алюмінію, корозійностійких і низьколегованих сталей.

Апарати ПАТОН, що працюють у режимі MIG/MAG, який дозволяє використовувати інертний і активний газ, що захищає зварювальну зону від негативного впливу кисню й здійснює окислювальну дію на зварюваний метал. Електрична дуга в апаратах утворюється за рахунок наявності в них постійного струму. Інвертори також застосовуються для зварювання листового тонкого металу, але з огляду на технічний потенціал їх зараховують до універсальних установок. Принцип роботи напівавтомата ПАТОН полягає в тому, що він перетворює змінний струм, який потрапляє в нього при підключенні агрегату до електричної мережі, в постійний. Для цих цілей у ньому є спеціальний модуль, високочастотний трансформатор і кілька випрямлячів. Вся операція зварювання інверторним напівавтоматом ПАТОН управляється мікропроцесором. Він постійно стежить за робочими характеристиками агрегату і безпосередньо за процесом зварювання. Як тільки процесор фіксує зміну будь-якого з параметрів, він миттєво коригує роботу обладнання.

До найважливіших переваг інверторного напівавтоматичного

обладнання ПАТОН відносять такі фактори:

- висока продуктивність зварювання;
- наявність термозахисту інтегрованого виду зі світловими індикаторами;
- ефективне охолодження агрегату повітрям;
- можливість застосування знімних пальників різних типів за рахунок наявності євророз'єму;
- наявність безлічі додаткових функцій (захист від перепадів напруги, вбудовані вимірювальні прилади, автоматична зупинка і підтримання в стані горіння електродуги, захист від перегріву і багато інших);
- можливість плавного регулювання (з урахуванням використовуваної сили струму) робочої напруги;
- точне регулювання струму, необхідного для з'єднання конструкцій з різних матеріалів;
- невелика маса.

Також варто відмітити дуже високий коефіцієнт корисної дії напівавтоматів ПАТОН, відсутність явища розбризкування киплячого металу. Звичайно, невеликі бризки при зварюванні все ж утворюються, але вони не стають причиною появи напливів на з'єднаних поверхнях та інших аналогічних вад зварювальної операції.

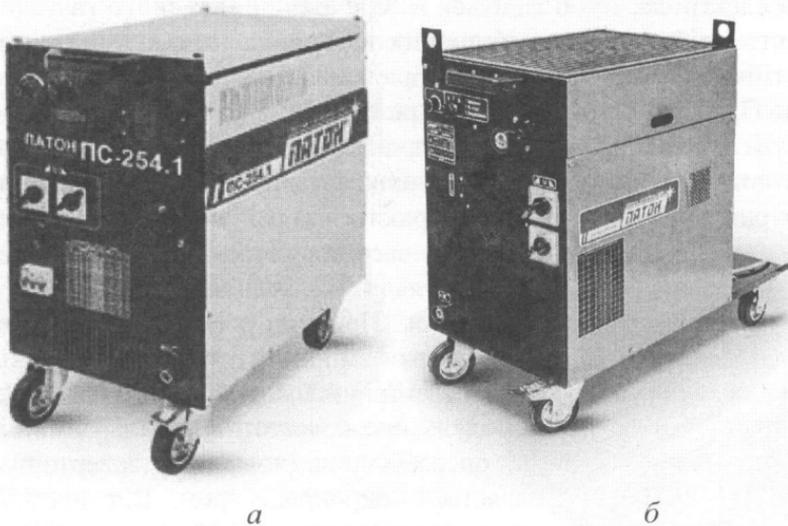


Рис. 2.35. Зварні інвентарні напівавтомати однокорпусні (бренд Патон): а - 254.1 ; б - PC-350.1 DC

Окремо відзначимо ще одну перевагу застосування напівавтоматичних

інверторів ПАТОН, пов'язану з тим, що дріт в них подається рівномірно з постійною швидкістю. Напівавтомати ПАТОН здатні здійснювати зварювання за допомогою електродів, що плавляться. У цьому випадку газ подавати не потрібно, так як зварювальний електрод, що плавиться, вже забезпечений своїм власним флюсовим захистом. Крім того, інвертори ПАТОН можуть використовувати і різні за перетином штучні електроди. А якщо апарат оснащується вентиляним пальником, він підходить і для аргонодугового зварювання. Інвертори напівавтоматичного типу (ПАТОН) зараховують до універсальних зварювальних агрегатів. Їх універсальність також обумовлюється тим, що вони однаково добре працюють і з тонколистовими заготовками, і з великими конструкціями з металу.

Зварювальні напівавтомати можуть мати різні механізми пристрою, що подають дріт: механізм, який проштовхує дріт у рукав, механізм, який тяне дріт і механізм, що штовхає-тягне дріт. Механізм, який проштовхує дріт в рукав має такий недолік. При зварюванні тонкого, алюмінієвого або флюсованого дроту можливі застрягання дроту всередині рукава. Механізм, який тягне дріт, розташовують у ручці пальника. В механізмі, що штовхає-тягне дріт є два синхронних пристрої. Один пристрій штовхає присадний дріт з корпусу апарата, а другий підтягує його до місця зварювання. Механізми пристроїв, що подають дріт можуть мати одну або дві пари роликів. Механізми з однією парою роликів найпоширеніші і використовуються з пальниками, довжина рукава яких не більше 3,5 метра. Для комфортної подачі дроту в рукав довжиною більше 4 метрів рекомендується використовувати механізми, які подають дріт, з двома парами роликів. Для зварювання кольорових і чорних металів із застосуванням дуже довгих рукавів рекомендується використовувати здвоєний механізм, що штовхає і тягне.

У кожного напівавтомата передбачено регулювання зварювального струму і швидкості подачі дроту. Ці регулювання можуть бути як ступінчастими, так і плавними. У деяких апаратів передбачена залежність швидкості подачі дроту від струму. Найчастіше плавні регулювання присутні у напівавтоматів, джерело зварювального струму яких є інверторного типу. Для виконання якісного зварювання в напівавтоматах використовується джерело постійного струму з жорсткою і полого-падаючою вольт-амперною характеристикою. Якщо в джерелі передбачена жорстка ВАХ, то в моменти відриву краплі розплавленого металу істотно скорочується довжина дуги і сила струму автоматично збільшується. У цей момент напруга залишається

стабільною. При полого-падаючої характеристики зі збільшенням сили струму напруга трохи зменшується. При роботі, коли необхідно цілими днями варити "кузовщину", потрібно застосовувати зварювальний напівавтомат із показником ПВ. Цей параметр вказує на тривалість включення, при якому обладнання може безперервно працювати без відключення на відпочинок. За способом захисту зварювальної ванни від окислювальних процесів: застосовують таку класифікацію: напівавтоматичне зварювання під шаром флюсу, напівавтоматичне зварювання в захисних газах (інертних або активних) і напівавтоматичне зварювання для робіт порошковим дротом.

2.5.7. Механізоване зварювання під шаром флюсу.

Напівавтомати для зварювання під шаром флюсу складаються із джерела живлення дуги, механізму подавання дроту, пальника з бункером флюсу і шланга, за допомогою якого подається зварювальний дріт до пальника (рис. 2.36). Застосовують напівавтомати марок ПШ-5, ПШ-54, ПДШ-500.

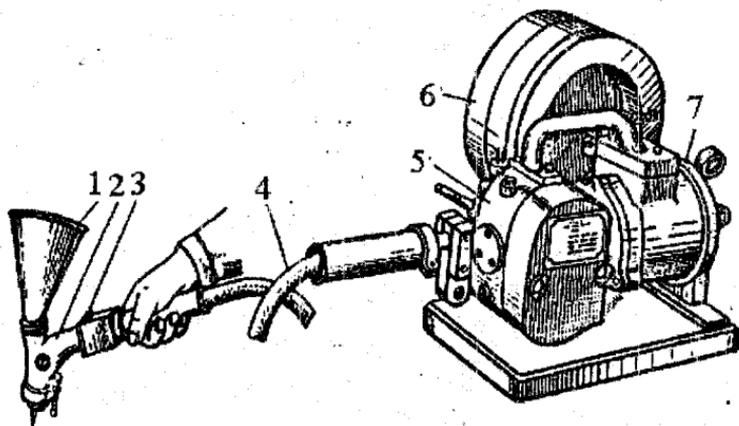


Рис. 2.36. Напівавтомат для зварювання під шаром флюсу:
1 – бункер для флюсу; 2 – пальник; 3 – кнопка пуску; 4 – шланг; 5 – механізм подавання дроту; 6 – бункер для дроту; 7 – бандаж

Зварювання під шаром флюсу може застосовуватись для швів будь-якої конфігурації як в умовах підприємств, так і в монтажних умовах. Застосовують його у випадках, коли неможливо або економічно не вигідно застосовувати автоматичний спосіб зварювання (короткі шви, шви непрямої конфігурації, тупикові шви).

Режими зварювання під флюсом складаються з глибини

проплавлення, діаметра присаджувального дроту, сили струму, робочої напруги, швидкості зварювання.

Глибина проплавлення h для стикових з'єднань дорівнює товщині металу S . Для кутових і таврових з'єднань $h = 0,65S$, мм.

Силу струму I розраховують за формулою

$$I = (80 \dots 100) h, \text{ А.}$$

Діаметр зварювального дроту d підбирають емпірично згідно з наведеною таблицею 2.5.

Таблиця 2.5

$I, \text{ А}$	190-250	250-600	350-800	470-1000	625-1350
$d, \text{ мм}$	2	3	4	5	6

Час і швидкість зварювання визначають відповідно до коефіцієнта наплавки $K_H = 14-16 \text{ г/А год}$.

2.5.8. Дугове зварювання порошковим дротом

Дугове зварювання порошковим дротом виконують за допомогою напівавтоматів або автоматів, схожих на ті, що застосовуються для зварюванні під флюсом. У ролі електрода застосовують безперервний порошковий дріт, котрий являє собою металеву оболонку (1), всередині якої міститься шихта (2), складена з порошоків, що призначені для захисту і легування зварного шва (рис. 2.37).

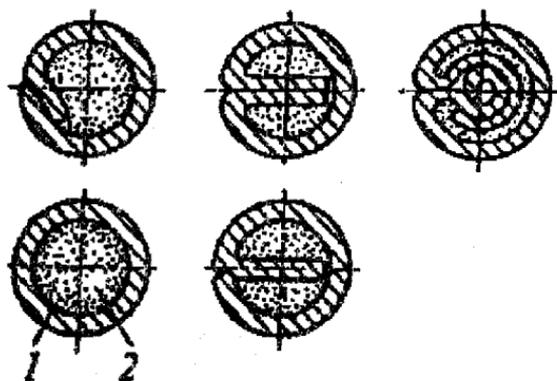


Рис. 2.37. Різновиди порошкових дротів:

1 – сталева оболонка; 2 – шихта (порошковий наповнювач)

Порошковий дріт виготовляють із тонкої сталевий стрічки, яку згортають у трубку діаметром 2...5 мм і заповнюють порошком

потрібного складу. Під час розплавлення порошкового дроту утворюється однорідний рідкий сплав, хімічний склад якого попередньо розраховується. На рис. 2.38 наведено схеми горіння електричних дуг під час зварювання ручним електродом із покриттям (а) і порошковим дротом (б), з яких видно, що процес плавлення порошкового дроту може бути більш легким порівняно з плавленням електрода для ручного дугового зварювання, і ця перевага стає тим більшою, чим більшими будуть діаметри електродів. До складу порошку, що міститься в порошковому дроті, входять порошки металів, феросплави, які плавляться за менших енергетичних витрат. Тому в разі зварювання порошковим дротом коефіцієнт наплавлення K_n і продуктивність зварювання можуть бути більшими, ніж за ручного дугового зварювання. Але з рис. 2.38 також зрозуміло, що захист металу від окислювання повітрям під час зварювання порошковим дротом буде меншим. Це пояснюється тим, що в разі зварювання покритими електродами покриття розміщується на всій поверхні металевого стрижня і краплі розплавленого металу переміщуються в зварювальну ванну в оболонці з газів. У разі застосування порошкового дроту порошок, що містить захисні речовини, розміщений всередині дроту й поверхня контакту розплавленого металу із захисними газами і шлаком стає меншою, що за певних режимів зварювання знижує захист металу від окислення. Крім того, взаємодія між краплями металу і шлаку під час зварювання порошковим дротом теж є меншою. Відповідно меншою буде і повнота реакцій між ними.

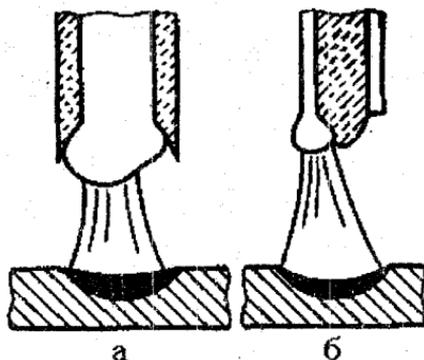


Рис. 2.38. Схеми горіння електричних дуг під час зварювання ручним електродом з покриттям (а) і порошковим дротом (б)

Для зварювання вуглецевих і низьколегованих сталей застосовують порошкові дроти марок ПП-АН4, ПП-АН8 тощо. Для зварювання цих сталей у вертикальному положенні з примусовим формуванням шва застосовують самозахисний порошковий дріт марки ПП-АН-19Н. Його рекомендують також для зварювання у нижньому положенні будівельних конструкцій і арматури.

Порошковий дріт використовують також при зварюванні на напівавтоматах з захисним газом. Для напівавтоматичного зварювання у вуглекислому газі рекомендують застосовувати порошковий дріт марки ПП-АН-63, який забезпечує глибоке проварювання в усіх просторових положеннях. Зварювання виконують на напівавтоматах А-765, А-1036М, А-1147 та ін. за допомогою струму зворотної полярності.

Перевагою порошкового дроту є те, що він здебільшого дешевший, ніж легований суцільний дріт. Крім того, він дає змогу більш гнучко регулювати хімічний склад наплавленого металу шляхом підбору певного складу шихти порошкового дроту і виконувати зварювання за підвищеної щільності струму, завдяки чому досягається висока продуктивність; зварювання можна виконувати в усіх просторових положеннях. До недоліків способу можна віднести те, що треба жорстко дотримуватись параметрів зварювання, таких як напруга, сила струму, виліт електрода, а у випадках недотримання параметрів зварювання є ймовірність отримати пористий зварний шов.

2.5.9. Дугове зварювання у захисних газах

Дугове зварювання у захисних газах (вуглекислому, аргоні, гелії, водні тощо) – це зварювання, за якого дуга та розплавлений метал, а в деяких випадках і шов, що вистигає, містяться в середовищі захисного газу, який подають у зону зварювання (ДСТУ 3761.2 2-98). Процес відбувається за схемами рис. 2.39 і рис 2.40, на яких зображено зварювання відповідно неплавким і плавким електродами. Таке зварювання забезпечує надійний захист розплавленого металу від дії кисню й азоту повітря, а також більшу концентрацію тепла, яка дає можливість зменшувати зону термічного впливу. Завдяки цьому зменшується вплив зварного шва на розміщення зварного з'єднання. Спосіб дозволяє отримати гарну якість при зварюванні металів, товщина яких становить від часток до десятків міліметрів, а також металів, що мають різну товщину. Цей спосіб також характеризується високою швидкістю розплавлення дроту. Завдяки цьому підвищується

продуктивність зварювання в два-три рази. Такі характеристики сприяють широкому використанню напівавтоматичного зварювання при ремонті автомобілів. Вибір захисного газу визначається хімічним складом металу, який зварюють, вимогами щодо зварного з'єднання, економічністю процесу тощо.

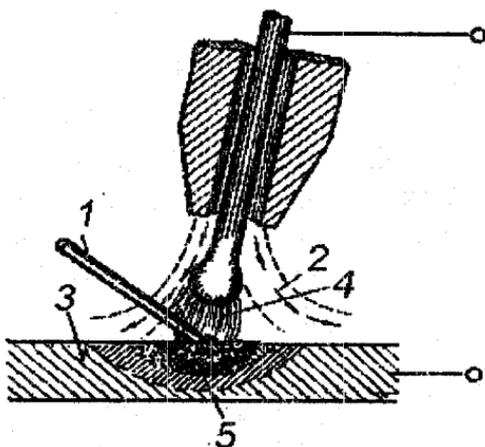


Рис. 2.39. Схема зварювання неплавким електродом:

1 – присаджувальний пруток; 2 – аргон; 3 – основний метал; 4 – дуга;
5 – розплавлений метал

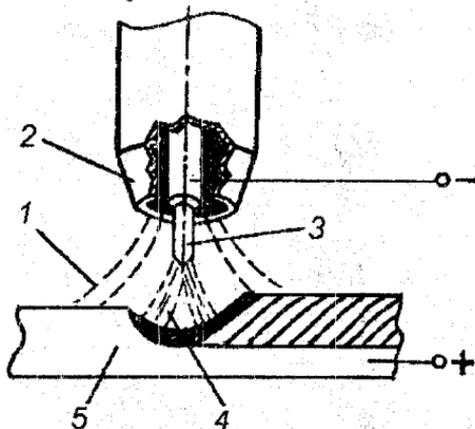


Рис. 2.40. Схема зварювання в атмосфері захисних газів електродом, що плавиться: 1 – потік газу; 2 – сопло; 3 – електрод (дріт)

Зварювання в захисних газах широко використовують у будівництві, суднобудуванні, автомобілебудуванні та інших галузях виробництва.

Дугове зварювання в активному газі - це процес зварювання, під час якого використовується захисний газ (наприклад, вуглекислий), який вступає у хімічну реакцію з матеріалами електрода та зварюваних заготовок. Для зварювання вуглецевих і низьколегованих сталей звичайно використовують вуглекислий газ, який є доступнішим з усіх захисних газів. Технологія зварювання у вуглецевому газі швидко і легко засвоюється. Для покращення якості зварювання застосовують також суміші аргону з активними газами, такими як 1...5 % кисню, 10...20 % CO₂, тощо. Домішки активних газів поліпшують стабільність горіння дуги, формування швів, зменшують розбризкування металу і запобігають пористості. Процес виконується на постійному струмі зі зворотною полярністю, що запобігає появі пористості в наплавленому металі і дає змогу зварювати листові заготовки з вуглецевої й низьколегованої будівельної сталі. Зварювання може виконуватись у механізованому, автоматичному або роботизованому режимі.

Процес звичайно відбувається за схемою зварювання електродом, що плавиться, за допомогою пальників-тримачів (рис. 2.40). Електродний дріт 3 автоматично подається в зону горіння дуги, де плавиться, утворюючи зварювальну ванну. Вуглекислий газ проходить через сопло 2 і захищає наплавлений метал від повітря.

Пальники для зварювання у вуглекислому газі відрізняються за потужністю. На струмах до 250...350 А застосовують пальники з натуральним охолодженням. Коли зварювальний струм перевищує 350 А, застосовують пальники з примусовим водяним охолодженням.

Особливістю цього методу є те, що захист розплавленого металу від окиснення відбувається за допомогою хімічних елементів, які містяться у складі зварювального дроту. Вуглекислий газ CO₂ за високої температури горіння дуги дисоціює на оксид вуглецю CO й атомарний кисень, який активно окиснює метал. Для запобігання окисненню розплавленого металу застосовують зварювальний дріт, який містить 2...3% розкиснювачів, таких, як кремній, манган, алюміній тощо. Наприклад, розкиснення заліза за допомогою кремнію і марганцю відбувається за реакціями:



Часто застосовують зварювальні дроти марок Св-08ГС, Св-08Г2СА, порошковий дріт ПП-АН-63 та інші.

Параметрами режиму автоматичного і механізованого зварювання у вуглекислому газі є діаметр зварювального дроту, сила струму, напруга, затрати вуглекислого газу за одиницю часу, швидкість зварювання.

Діаметр дроту, силу струму, напругу і затрати газу за одиницю часу визначають за табл. 8.3: $K_n = 14-16$ г/Агод.

Зварювання у вуглекислому газі виконують на обладнанні, що комплектується з джерела живлення, напівавтомата (або робота), який складається з механізму подавання зварювального дроту, касети зі зварювальним дротом, гнучким шлангом із пальником, блоком керування тощо, а також газовим балоном і газовим редуктором. Як джерело живлення використовують випрямлячі й інвертори. У табл. 2.6 наведені орієнтовні параметри режимів зварювання у вуглецевому газі.

Таблиця 2.6

Параметри режимів зварювання у вуглекислому газі

Товщина металу, мм	Діаметр дроту, мм	Струм, А	Напруга, В	Витрати CO ₂ , л/хв
0,8 – 1,0	0,6–0,8	50–60	18	6–7
1,2 – 2,0	0,8–1,0	70–110	18–20	10–12
3 – 5	1,6–2,0	160–200	27–29	14–16
6 – 8	2	280–300	28–30	16–18

Напівавтомати для механізованого зварювання призначені для зварювання сталі дротом з діаметром від 0,8 до 2 мм або порошковим дротом із діаметром від 1,2 до 3 мм. У додатку 6 наведено характеристики деяких напівавтоматів для дугового зварювання у вуглекислому газі.

Перевагами зварювання у вуглекислому газі є висока якість зварювального шва, зручність і швидкість процесу завдяки тому, що не треба замінювати електроди й захищати шви від шлаку. Однак цей спосіб застосовують переважно в стаціонарних умовах через неможливість виконання його на вітрі й необхідність мати поблизу важкий газовий балон.

Дугове зварювання в інертному газі - це процес, під час якого використовують захисний газ (наприклад, аргон, гелій), що не вступає в хімічні реакції з матеріалами електрода і зварюваних заготовок. Процес застосовують для зварювання нержавіючих сталей, титану, алюмінію, міді, нікелю, магнію та сплавів на їх основі. При цьому використовують аргон, гелій або їх суміші, а також суміші інертних газів з азотом або воднем. Для зварювання міді і мідних сплавів можна застосовувати азот. Додавання до захисного газу галогенідів та хлоридів підвищує теплову потужність дуги. Газів, що містять кисень, застосовувати не

можна, оскільки вони окислюють і при цьому руйнують вольфрамовий електрод, а також розплавлений метал. Таке зварювання виконується вольфрамовим електродом, що не розплавляється (режим зварювання TIG), або електродом з металу, що плавиться (режим зварювання MIG/MAG), або вольфраму з домішками оксидів торію, лантану, ітрію, які покращують запалювання й горіння дуги. Під час зварювання неплавким електродом в зону дуги вручну або автоматично подається присадковий дріт, а захисний газ, що виходить з мундштука, захищає дугу і рідкий метал зварювальної ванни від окиснювання (рис. 2.31.). Витрати вольфрамових електродів невеликі: залежно від товщини зварного металу вони становлять від 5 до 170 г на кожні 100 м зварного шва.

Дугове зварювання вольфрамовим електродом призначене для створення всіх типів зварних з'єднань у різних просторових положеннях. Цей спосіб зручний для з'єднання металів завтовшки до 5...6 мм. Застосовують його і для зварювання металів більшої товщини (до 60 мм). Спосіб дає змогу зварювати також метали невеликої товщини, яка дорівнює частці міліметра. Для цього використовують джерела живлення, які виробляють імпульсний струм. Завдяки використанню струму, достатнього для стабільного горіння дуги, і такого, що подається періодично імпульсами, можна зменшувати розміри зварювальної ванни і зварювати встик тонкі метали у різних просторових положеннях.

Для аргонно-дугового зварювання застосовують змінний або постійний струм, низьку напругу (10...12 В), силу струму від 30 до 400 А; витрати аргону становлять 300...900 л/год. Зварні шви мають високі механічні властивості і добру якість. Зварювання виконують на установках УДГУ-200, УДГ-161, УДГ-180, УДГУ 251, УДГУ 501 ("Фірма СЕЛМА") та на інших.

Способи підвищення продуктивності зварювання за режимами MIG/MAG. Традиційні способи зварювання в середовищі захисних газів дають можливість досягти продуктивності розплавлення близько 6 кг/год. Для підвищення продуктивності фірмою Фроніус удосконалено обладнання і запропоновані такі способи: зварювання двома дротами (спосіб Time Twin digiteal), зварювання дротом прямокутного перерізу й дротом великого діаметра. Ці способи зварювання можна застосовувати в механізованому, автоматичному і роботизованому режимах.

Зварювання двома дротами виконують так. Два електродних дроти одночасно за допомогою пристрою подаються через один газовий

пальник оригінальної конструкції. Між електродами і металом відбувається горіння двох окремих дуг, розміщених на близькій відстані одна від одної, в результаті чого утворюється загальна зварювальна ванна. Кожний електродний дріт ізольовано один від одного та під'єднано до окремого джерела живлення. За допомогою синхронізатора гармонізується робота двох зварювальних електродів, завдяки чому синхронізується перенесення металу з обох електродів та знижується кількість бризок. Спосіб дає можливість, не знижуючи якості зварювання, підвищувати його продуктивність до 30 кг/год.

Зварювання дротом прямокутного перерізу потребує вдосконалення системи його подачі. Ідея цього способу полягає в тому, що зміна перерізу дроту з круглого на прямокутний сприяє більш швидкому його розплавленню. Крім того, в цьому випадку утворюється овальна зварювальна ванна, яка забезпечує більш низький тиск дуги. В результаті з'являються переваги: значно підвищується продуктивність розплавлення і збільшується швидкість зварювання. Наприклад, завдяки застосуванню дроту з прямокутним перерізом 4,5 x 0,5 мм продуктивність зварювання сталі дорівнює 11 кг/год, алюмінію – 4 кг/год.

Зварювання дротом великого діаметра (до 3,2 мм). Звичайно для зварювання в захисних газах застосовують зварювальний дріт, діаметр якого не перевищує 0,8...2 мм. Збільшення діаметра дроту пов'язано з певними труднощами. Відомо, що продуктивність можна підвищувати завдяки збільшенню сили струму. Досягти цього можна, збільшучи діаметр дроту. Для реалізації способу було застосоване джерело живлення, що забезпечувало струм 900 А, і розроблено конструктивні елементи обладнання подачі дроту від механізму до блока охолодження пальника. Такі вдосконалення дали можливість досягати продуктивності більш ніж 25 кг/год (у випадку зварювання сталі) і 5 кг/год (у випадку зварювання алюмінію).

2.6. Плазмове зварювання

Плазмове зварювання – це дугове зварювання, під час якого стовп дуги або частина стовпа стискується потоком газу або магнітним полем (ДСТУ 3761.2 2-98). Плазма – це іонізований газ, який містить однакову кількість позитивно і негативно заряджених зарядів. Під час плазмового зварювання носієм теплової енергії є плазма і частково або повністю газ, що складається з нейтральних атомів та молекул, іонів і електронів. Плазма утворюється внаслідок проходження газів (аргону, азоту, аміаку, інших газів та їх сумішей, парів води) через дуговий

розряд у дугових полуменевих пальниках – плазмотронах (рис. 8.33).

Плазмотрони бувають прямої і непрямої дії. В *плазмотронах прямої дії* дуга горить між вольфрамовим електродом та виробом (рис. 2.33, а). Плазмова *дуга непрямої дії* горить між вольфрамовим електродом і соплом плазмотрона, а плазма видувається через отвір сопла (рис. 2.33, б). Такий тип плазми використовують для зварювання та різання неелектропровідних матеріалів. Газ, що подається в сопло плазмотрона, проходить крізь стовп дуги й іонізується, збільшується в об'ємі, стискає дугу, завдяки чому підвищується температура

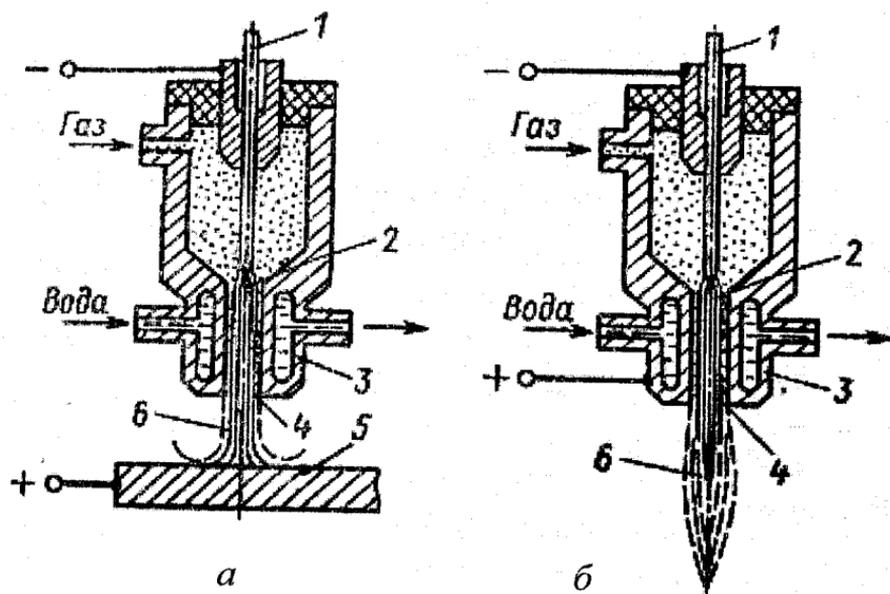


Рис. 2.41. Зварювальні плазмотрони прямої (а) і непрямої (б) дії:

1 – вольфрамовий електрод, 2 – дуга, 3 – сопло пальника,
4 – канал пальника, 5 – заготівка, 6 – плазмовий струмінь

У вузькому каналі, що інтенсивно охолоджується за допомогою води, відбувається різке збільшення іонізації і підвищення температури стовпа дуги до 10 000...50 000°C. Температура плазми залежить від конструкції пальника та складу газу. В пальниках непрямої дії вона сягає 15 000...20 000°C, а в пальниках прямої дії – до 30 000°C. Після додавання в плазмовий струмінь парів лужних металів температура може підвищуватись до 50 000°C.

Пальники прямої дії застосовують для зварювання металів, які

проводять електричний струм, – низьковуглецевих, нержавіючих сталей, нікелевих сплавів, вольфраму, молібдену тощо. Пальники непрямої дії застосовують для зварювання металів і напівпровідників та непровідників.

Плазмоутворювальними газами звичайно є аргон або його суміші з гелієм або воднем. Для зварювання низьковуглецевих або низьколегованих будівельних сталей використовують вуглекислий газ, для зварювання легованих сталей, міді, нікелю – суміш аргону з воднем. Для зварювання титану і цирконію використовувати водень або кисень в суміші газів не можна через близьку спорідненість газів із цими металами.

Плазмова дуга живиться постійним струмом за мінуса на електроді. Джерела струму повинні мати кругоспадну ВАХ із напруженням в процесі холостого ходу до 120 В під час зварювання і до 300 В під час різання.

Зварний шов утворюється внаслідок розплавлення крайок заготовок і, за потреби, присадкового металу. Без обробки крайків за один прохід можна зварювати метали завтовшки до 15 мм, використовуючи присадковий дріт, який вводять у кінець зварювальної ванни.

Завдяки широкому регулюванню потужності плазмового струменя можна зварювати листи завтовшки від 0.1 до 50 мм. Плазмове з'єднання деталей, які мають товщину, меншу за 1 мм, називають мікроплазмовим зварюванням.

Окрім зварювання, плазмовий струмінь застосовують для різання алюмінію, міді, корозійностійкої сталі, кераміки тощо. Плазмовий струмінь застосовують також для плавлення металів, термічної строжки, нанесення покриття та в інших випадках.

2.7. Електрошлакове зварювання

Електрошлакове зварювання (ЕШЗ) – це зварювання плавленням, під час якого нагрівання здійснюється теплом, що виділяється під час проходження електричного струму між електродом та з'єднуваними заготовками через розплавлений шлак (рис. 2.42). Це бездуговий процес з'єднання металів. Шлак повинен проводити електричний струм і мати великий електроопір.

Перед зварюванням здійснюється ретельна підготовка: зварювальні деталі 1, яку розміщують вертикально із зазором 20...40 мм, а з боків встановлюють мідні повзуни 2, знизу підкладають металеву планку, на яку насипають певну кількість флюсу. Процес зварювання починається

з підпалу і підтримання дуги (дуг) під флюсом між електродом (електродами) 4 і початковою планкою.

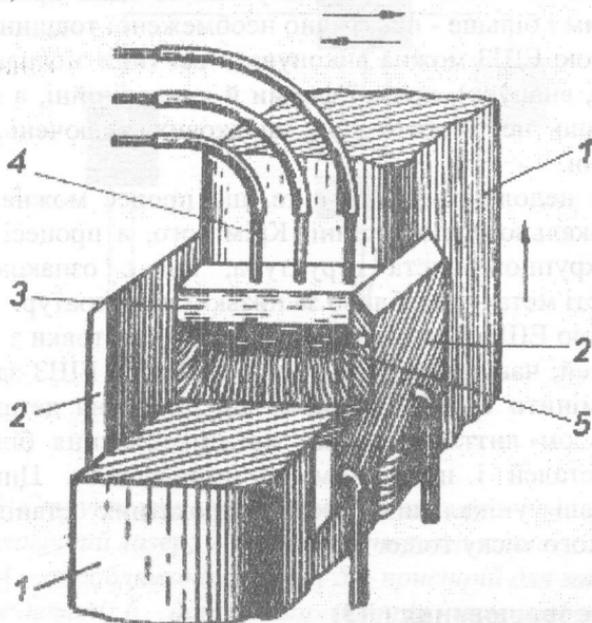


Рис. 2.42.. Схема електрошлакового зварювання:

- 1 – зварювані деталі; 2 – мідний повзун, що охолоджується водою;
3 – шлакова ванна; 4 – електроди; 5 – зварювальна ванна

Електродами можуть бути металеві дроти, пластини або мунштук, що розплавляється. Після розплавлення флюсу й утворення шлакової ванни 3 дуга гасне й електричний струм починає текти через рідкий розплавлений флюс, який називають шлаком. Зварювальний процес з електродугового переходить у електрошлаковий. Тепло, що виділяється під час проходження струму через розплавлений шлак, забезпечує розплавлення основного й електродного металів, які утворюють загальну зварювальну ванну 5, температура якої сягає 3000°C. Зварювальні електроди пересуваються разом із мідними повзунами знизу вгору, утворюючи зварний шов. Зварювання закінчують після того, як виведуть зварний шов на рівень, який перевищує поверхню деталей, за допомогою заздалегідь установлених верхніх планок. Виведення зварювальної ванни виконують обов'язково тому, що у її верхній частині скупчуються газові пухирі, шкідливі включення й

флюс. Після зварювання верхні планки разом із металом і флюсом відрізають У такий спосіб зварюють устик за один прохід заготовки завтовшки 20 мм і більше - практично необмеженої товщини.

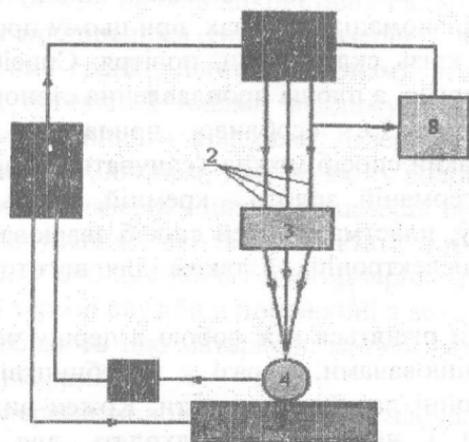
За допомогою ЕШЗ можна виконувати всі типи з'єднання (стикові, кутові, таврові, внапуск), прямої форми й криволінійні, а наплавлений метал практично не містить пор, шлакових включень, шкідливих домішок, тріщин.

Основними недоліками ЕШЗ є те, що процес можна виконувати тільки у вертикальному положенні. Крім того, в процесі зварювання утворюється крупнозерниста структура, що є ознакою зниження ударної в'язкості металу, особливо за низьких температур.

За допомогою ЕШЗ з'єднують товстостінні заготовки з вуглецевих і легованих сталей, чавуну та інших металів. Часто ЕШЗ застосовують, коли треба замінити складні процеси виготовлення деталей великих розмірів способом лиття, куванням на виготовлення більш дрібних частин цих деталей і наступним їх зварюванням. Цим способом зварюють деталі унікальних пресів, прокатних станів, кораблів, емностей високого тиску тощо.

2.8. Лазерне зварювання (ЛЗ)

Це зварювання, під час якого нагрівання та плавлення з'єднуваних заготовок здійснюють когерентним променем монохроматичного світла. Джерелом оптичного когерентного випромінювання є лазер (оптичний квантовий генератор). Когерентний промінь характеризується високою направленістю і великою щільністю енергії. Назва лазера походить від англійської фрази "Light Amplification by Stimulated of Radiation", що означає "підсилення світла внаслідок змушеного випромінювання". Принцип дії лазера оснований на властивості атомів і атомних систем поглинати й випромінювати порції (кванти) електромагнітної енергії. Для отримання світлового лазерного променя у зварюванні застосовують твердотілі (наприклад, рубінові) і газові лазери. Перші мають к.к.д. від 0,1 до 3 %, другі – до 10%. Лазерне зварювання – доволі новий вид зварювання. Однак на сьогодні існує велика кількість конструкцій лазерів різного виду, що обумовлено великою специфікою їх застосування. Структурна схема лазерної технологічної установки представлена на рис. 2.43.



*Рис. 2.43. Структурна схема лазерної технологічної установки:
 1 – технологічний лазер; 2 – лазерне випромінювання; 3 – оптична система; 4 – оброблювана деталь; 5 – пристрій для закріплення та переміщення деталі; 6 – датчик параметрів технологічного процесу; 7 – програмний пристрій; 8 – датчик параметрів випромінювання.*

Одними з перших були розроблені рубінові лазери, у яких основним оптичним елементом є монокристал рубіна, що містить активні атоми хрому (0,05%). Кристал рубіна має форму стрижня, торець якого строго перпендикулярний відносно його осі. Торець мусить бути полірований і покритий тоненькою плівкою із срібла для доброго відбиття світла. Поряд із рубіновим стрижнем розміщують електронну лампу накачування. Внаслідок освітлення рубінового стрижня цією лампою значна кількість атомів хрому, що міститься в рубіні, переходить у збуджений стан. Однак такий стан не є стійким. Під час переходу в початковий стан кожний атом хрому випускає фотон. При цьому фотони, рух яких спрямований уздовж осі стрижня, взаємодіють зі збудженими атомами і сприяють утворенню фотонів того ж напрямку. Цей процес стає лавиноподібним завдяки тому, що фотони, які відбиваються від торців кристала, безперервно взаємодіють зі збудженими атомами. Інтенсивність випромінювання фотонів зростає завдяки багаторазовому відбиттю. В результаті настає момент ефекту квантового посилення, і з торця рубінового стрижня за частки секунди випромінюється інтенсивний потік фотонів.

За допомогою рубінового лазера можна виконувати зварювання в повітрі, вакуумі й різноманітних газах, при цьому промінь лазера може вільно проходити крізь скло, кварц, повітря. Спосіб дає можливість точно дозувати енергію, а площа проплавлення становить десяті частки міліметра, тому він є особливо придатним для виконання мікроз'єднань. У такий спосіб можна з'єднувати однорідні та різнорідні метали (золото – германій, золото – кремній, нікель – тантал тощо) і неметали (кераміку, пластмаси). Цей спосіб зварювання застосовують переважно в мікроелектроніці, а також для виготовлення отворів й різання.

Лазерні системи різняться між собою в першу чергу вбудованими лазерними випромінювачами. Наразі у виробництві поширені газові CO₂-лазери, волоконні лазери і ванадати. Кожен вид лазера має свої особливі переваги і недоліки й підходять для обробки певних матеріалів.

CO₂-лазери - це газові лазери, основа яких вуглекислий газ, що збуджується за допомогою електрики. Такі лазери з довжиною хвилі 10,6 мкм підходять, у першу чергу, для хутрообробки і більшості пластиків. CO₂-лазери мають досить високий рівень потужності й дуже гарну якість променя. За рахунок цього вони є одними з найбільш поширених видів лазерів. Вони підходять для обробки таких матеріалів: дерево, акрил, скло, папір, текстиль, пластики, плівка, шкіра, камінь. Використання лазерів безперервної дії на вуглекислому газі дає змогу отримувати з'єднання сталі завтовшки до 15 мм. Треба зауважити, що газові лазери дають інфрачервоне випромінювання, тому скло для нього непрозоре і оптику для них слід виготовляти не із скла, а тільки із сольових кристалів. Через це ускладнюється процес фокусування, тому газові лазери застосовують здебільшого для різання.

Волоконні лазери належать до групи твердотільних лазерів. Вони виробляють лазерний промінь за допомогою так званих затравочних лазерів і підсилюють його в спеціально вбудованому скловолокна, з яким через діод накачування надходить енергія. Волоконні лазери мають довжину хвилі 1,064 мкм та дуже маленький діаметр фокуса, в результаті чого інтенсивність променя з 100 раз перевищує газовий CO₂-лазер при однаковій випромінюваній потужності. Волоконні лазери застосовують для маркування металу, гравіювання на металі, для контрастного маркування пластиків, а останнім часом – при виробництві автомобілів. Волоконні лазери, як правило, не потребують технічного обслуговування і мають довгий термін служби, який налічує до 25000 годин. Їх застосовують для обробки таких матеріалів: метали, метали з покриттям, пластики.

Як і волоконні, лазери на основі кристалів належать до твердотілих лазерів. Найбільш поширеними типами лазерів у цій категорії є Nd: YAG (алоомо-ітрієвий гранат, легований іонами неодиму) і Nd: YVO (ітрієвий ваданат, легований іонами неодиму), названі так завдяки легуванню неодимом чинного кристала. Лазери на основі кристалів мають довжину хвилі - 1,064 мем, таку ж, як і у волоконних лазерів. На відміну від волоконних лазерів у цих типів лазерів застосовують досить дорогі діоди накачування, які в результаті зношування повинні замінюватися кожні 8.000 ... 15.000 годин лазерних робіт. Сам кристал має більш низький термін служби в порівнянні з волоконним лазером. З їх допомогою обробляють такі матеріали: метали, метали з покриттям, пластики, частково кераміку.

Завдяки своїм перевагам волоконні лазери набувають усе більшого значення в сучасному автомобілебудуванні. Їх основними перевагами є висока оптична якість випромінювання, невеликі габарити і можливість убудовування у волоконні лінії. При їх використанні створюються високопродуктивні способи зварювання і пайки, отримуються якісні з'єднання матеріалів, мінімізуються витрати на повторну обробку. Можливість управління процесами зварювання дозволяє уникнути виникнення дефектів. Лазери широко застосовують для різання листового метала, маркування продукції, зварювання. Почали застосовувати їх також в роботизованих системах виробництва автомобілів при зварюванні кузовних деталей замість контактного зварювання. Метод дозволяє істотно підвищити якість, завдяки тому, що роботизовані системи управління зварюванням реагують значно швидше, а також забезпечують більш високу точність процесу зварювання і стабільну повторюваність.

На відміну від дугових видів, при лазерному зварюванні ванну розплаву створює сфокусований лазерний пучок і шов можна зробити дуже тонким. Завдяки цьому досягається висока міцність шва з дуже малою зоною термічного впливу. Регулювання за інтенсивністю зварювання можуть проводитись у великому діапазоні. Крім того, чистова обробка після такого зварювання стає кращою, а деформації металевих поверхонь після охолодження мінімальними.

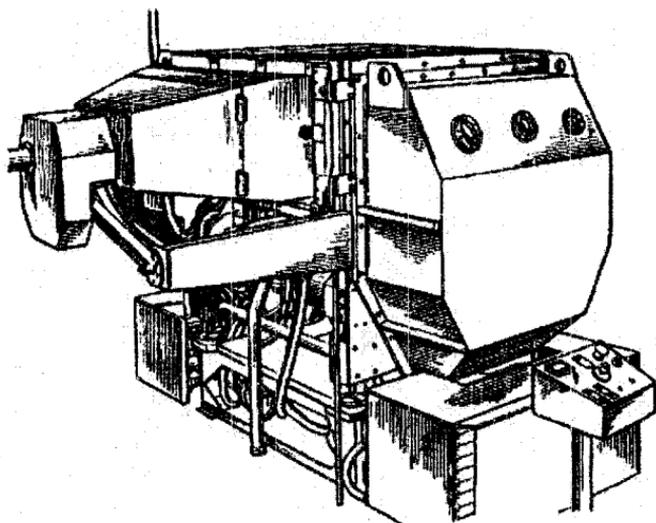


Рис. 2.44. Зовнішній вигляд блока генерації випромінювання швидкопротокового промислового лазера для зварювання і різання титу ТЛ-5 (габарити - 2,5 x 2,4x1,7 м, потужність – 5 кВт, активний елемент - CO_2 ; N_2 ; He)

Недоліком лазерного зварювання можна вважати дуже низький ККД в порівнянні зі звичайним зварюванням. У зв'язку з цим лазерне зварювальне обладнання споживає в рази більше енергії, в порівнянні з іншими видами зварювання. В результаті застосування лінії автоматичної лазерного зварювання в масштабах заводу стає мегазатратним заходом. Незважаючи на це лазерне зварювання, завдяки високій якості все частіше знаходить застосування у виробництві.

2.9. Газове зварювання

Газове зварювання – це зварювання плавленням, під час якого нагрівання та плавлення з'єднуваних заготовок здійснюють теплом газів, що згоряють (ДСТУ 3761.2 2-98). На рис. 2.45 показана схема газового зварювання. Процес починають із нагрівання газовим полум'ям 4 крайків заготовок 1 до їх розплавлення, після чого в полум'я пальника 3 вводять присадковий метал 2, кінець якого

розплавлюється; розплавлений метал заповнює зазор між заготовками. Після твердіння металу утворюється зварний шов.

Газове полум'я отримують від згорання горючого газу в атмосфері технічно чистого кисню. Застосовують такі горючі гази: ацетилен, пропан-бутан, водень, пари бензину, газу тощо. Найчастіше використовують ацетилен, тому що температура його полум'я (3000-3400 °С) під час згорання в кисні є вищою, ніж від згорання інших газів, і достатньою для зварювання сталей і більшості інших металів та сплавів.

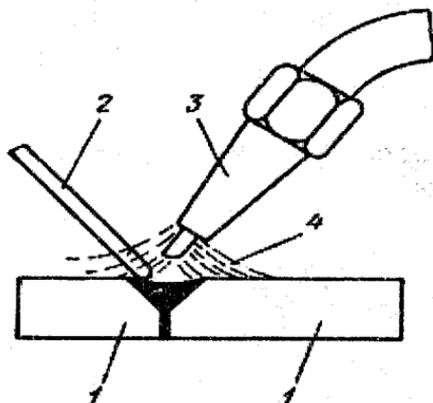
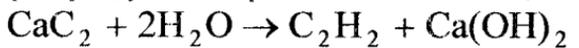


Рис. 2.45. Принципова схема газового зварювання

Ацетилен (C_2H_2) виготовляють двома способами: 1) за допомогою хімічної реакції взаємодії карбіду кальцію (CaC_2) з водою; 2) термоокиснювальним піролізом метану з киснем (піролізний ацетилен). Найбільш поширеним є перший спосіб, коли ацетилен отримують безпосередньо на зварювальному майданчику в ацетиленових генераторах, у яких карбід кальцію взаємодіє з водою за реакцією



Реакція відбувається швидко, причому з 1 кг чистого карбіду кальцію виділяється до 300 л ацетилену. В додатку 7 наведено характеристики деяких ацетиленових генераторів для газового зварювання.

За другим способом піролізний ацетилен виготовляється на заводі і в балонах доставляється на зварювальний майданчик. У балонах ацетилен перебуває під тиском 1,5–1,6 МПа. Для повної безпеки балони з ацетиленом заповнюють деревним вугіллям, яке утворює систему капілярних місткостей. Це пов'язано з тим, що в посудинах значних

об'ємів ацетилен за стискання понад 0,18 МПа стає вибухонебезпечним. Крім того, за концентрації в повітрі від 2,8 до 65% він утворює вибухонебезпечну суміш. Ацетилен можна використовувати для зварювання безпосередньо від генераторів або dopravляти на місце зварювання в балонах.

Технічний кисень (98,5–99,5%) для зварювання надходить у балонах під тиском 15 МПа. Стандартний балон для кисню місткістю 40 дм³ являє собою сталюю посудину циліндричної форми. Треба бути особливо обережними під час роботи з кисневими балонами, оскільки деякі речовини (жири, мастила) в середовищі стиснутого кисню здатні до samozапалювання. Кисневі балони фарбують у синій колір, ацетиленові – в білий.

На рис. 2.46 наведено схему поста газового зварювання з живленням від балонів. Для зниження тиску кисень від балона 3 проходить крізь редуктор 4, після чого по шлангу 1 надходить до газового пальника 5.

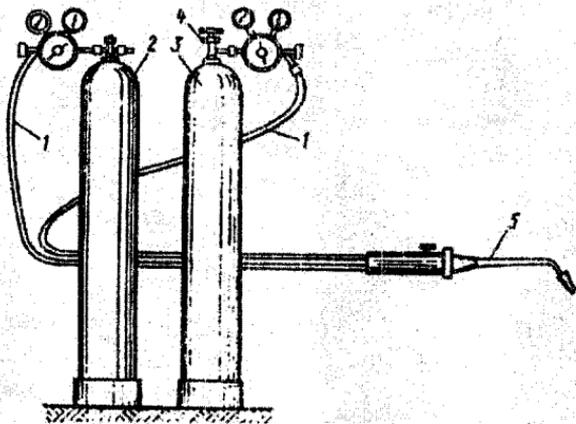
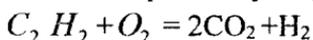


Рис. 2.46. Схема поста газового зварювання

Щоб випустити ацетилен з балона 2, відкривають вентиль редуктора, при цьому тиск газу знижується, і ацетилен виділяється з розчинника. Ацетилен по шлангу 1 також надходить до газового пальника 5. Газові пальники призначені для дозування і змішування кисню та горючого газу, для утворення стійкого й концентрованого газового полум'я. Схема ацетиленокисневого полум'я показана рис. 8.36. Факел полум'я виконує захисні функції, покриваючи рідкий метал зварної ванни від проникнення кисню й азоту з повітря. Залежно від

співвідношення кисню і ацетилену, які подаються до пальника, змінюється склад полум'я. Ацетиленоокисневе полум'я буває нормальне, з надлишком кисню – окиснювальне і з надлишком ацетилену – науглецьовувальним. Нормальним вважається ацетиленоокисневе полум'я, в якому співвідношення кисню й ацетилену становить 1,1–1,3, достатнього для зварювання сталей і більшості інших металів та сплавів.

Нормальне полум'я (рис. 2.47) складається із світлого ядра (1), темнішої за кольором відновної зони (2) і факела (3). У зоні 1, яка називається ядром полум'я, відбувається неповне згорання ацетилену:



Розжарені продукти CO_2 і H_2 заповнюють відновну зону 2. Довжина зони 2 сягає 20 мм від кінця ядра залежно від номера мундштука. У середній частині цієї зони (2–6 мм від кінця ядра) полум'я має найвищу температуру. Цією частиною полум'я користуються для зварювання металу. У зоні 3 (факел полум'я) відбувається повне згорання газів третьої зони завдяки кисню повітря:

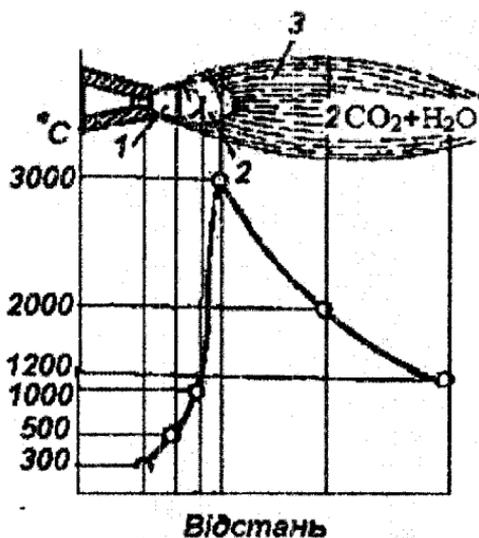
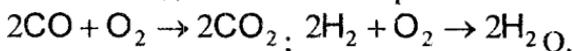


Рис. 2.47. Схема ацетиленоокисневого полум'я:

1 – ядро полум'я, яке містить суміш $C_2H_2 + O_2$; 2 – робоча або відновна частина полум'я, яка складена з $CO + H_2$; 3 – факел, який містить суміш продуктів згорання CO_2 , H_2O і повітря

У більшості випадків для газового зварювання використовують нормальне полум'я, яке застосовують для зварювання низьковуглецевих, низько- і високолегованих сталей, алюмінію, міді тощо.

Регулюють характер полум'я на око за його кольором. Окиснювальне полум'я має світло-блакитний відтінок. Температура окиснювального полум'я вища за температуру нормального полум'я. Воно може окиснювати зварюваний метал, у результаті чого буде утворюватись крихкий і пористий шов. Однак окиснювальне полум'я застосовують для зварювання сталі з метою підвищення продуктивності процесу; при цьому обов'язково використовують присадковий дріт, який містить підвищену кількість мангану і кремнію в якості розкиснювачів. Окиснювальне полум'я використовують також для зварювання латуней.

Навуглецьовувальне полум'я має червонуватий відтінок, коптить. Його використовують для зварювання чавуну, наплавлення твердих сплавів. Полум'ям із незначним надлишком ацетилену зварюють алюмінієві і магнієві сплави.

За принципом дії газові пальники бувають інжекторні (всмоктувальні) – низького тиску та безінжекторні – високого тиску. В інжекторний пальник (рис. 2.48, а) ацетилен або інший газ подають шлангом і регулюють його подавання краном 6. Кисень до пальника подається під тиском 200–300 кПа. Витікаючи із сопла інжектора 5, струмінь кисню утворює розрідження в каналі 4 і засмоктує ацетилен у змішувальну камеру 3, звідки ця суміш через трубку 2 та мундштук 1 виштовхується в атмосферу і утворює зварювальне полум'я. Швидкість витікання горючої суміші з пальника повинна перевищувати швидкість її згорання, щоб полум'я не проникло в пальник. Тиск ацетилену для спалювання в інжекторних пальниках повинен бути досить низьким (1–2 кПа).

На рис. 2.48, б зображено схему безінжекторного пальника. Кисень і горючий газ подаються за підвищеного тиску і дозуються за допомогою кранів 7 і 8. Безінжекторні пальники можуть працювати тільки за тиску горючого газу 100–150 кПа, тому їх застосовують у разі живлення від балонів.

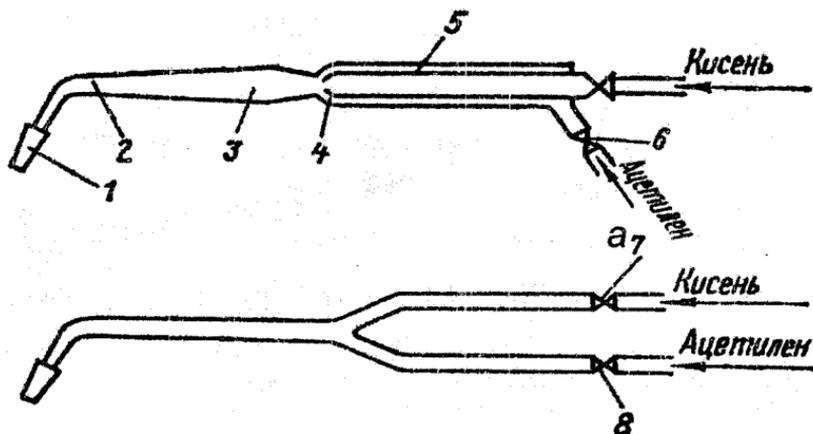


Рис. 2.48. Схеми газових пальників

Під час зварювання пальник переміщують уздовж шва, причому дотримуються потрібного кута нахилу мундштука пальника до зварювальної поверхні. Цей кут нахилу змінюється від 20° (для зварювання листів товщиною до 1 мм) до 80° (з товщиною 15 мм і більше).

Режим газового зварювання визначають за способом зварювання, діаметром присадкового дроту, номером наконечника, тиском та питомими витратами ацетилену і кисню, кутом нахилу полум'я до зварювальної поверхні, швидкістю зварювання.

Лівий спосіб зварювання застосовують за товщини зварювального металу не більшої від 4 мм. За більшої товщини металу застосовують правий спосіб.

Діаметр присадкового дроту також залежить від товщини основного металу. За товщини основного металу, меншої від 5 мм:

$$d_{\text{пр}} = 0.5S + 1, \text{ мм}$$

де S – товщина основного металу, мм. За товщини основного металу понад 5 мм :

$$d_{\text{пр}} = S$$

Номер наконечника пальників типу “Москва”, ГС, “Зірочка”, а також тиск кисню знаходять за табл. 2.7.

Тиск ацетилену беруть у межах 0,01-0,03 МПа.

Питомі витрати ацетилену:

$$A = \kappa S, \text{ л/год}$$

де κ – коефіцієнт пропорційності (для сталі – 100-120).

Питомі витрати кисню:

$$K = (1,2 - 1,3)A, \text{ л/год}$$

Таблиця 2.7

Товщина основного металу, мм	0,2–0,7	0,5–1,5	1–2,5	2,5–4,0	3,5–7,0
Номер наконечника	0	1	2	3	4
Тиск кисню, МПа	0,05–0,4	0,15–0,4	0,2–0,4	0,2–0,4	0,2–0,4

Кут нахилу полум'я до поверхні, що зварюється, визначають за табл. 2.8.

Таблиця 2.8

Товщина основного металу, мм	До 1	1-3	5-7	10-12	Більше 15
Кут нахилу полум'я, град.	10	20	40	60	80

Швидкість зварювання:

$$V_{зв} = \frac{a}{S}, \text{ м/год,}$$

де a – емпіричний коефіцієнт (12...15 мм·м/год).

Газове зварювання менш продуктивне, ніж дугове. Звичайно його використовують для зварювання металів, товщина яких не перевищує 6 мм. У промисловому будівництві та автомобілебудуванні газове зварювання застосовують при з'єднанні труб малих і середніх діаметрів, металевих листів із легкоплавких кольорових металів (алюмінієвих сплавів, міді, латуні, свинцю), високоміцного та ковкого чавунів тощо.

Контрольні запитання для самостійної підготовки

1. Опишіть будову зварного з'єднання.
2. Що таке зварність металів і як вона визначається?
3. Що таке гарячі і холодні тріщини і як вони виникають?
4. Що таке дугове зварювання і які є способи його виконання?
5. Охарактеризуйте склад і властивості зварювальної дуги.
6. Які є джерела живлення зварювальної дуги і чим вони характеризуються?
7. Що таке ручне дугове зварювання, для чого воно застосовується?
8. Опишіть призначення покриття і металевого дроту штучного електрода для ручного дугового зварювання.
9. Охарактеризуйте параметри ручного дугового зварювання.
10. Охарактеризуйте продуктивні способи ручного дугового зварювання.
11. Що таке дугове зварювання під флюсом? Охарактеризуйте його.
12. Що таке порошковий дріт? Охарактеризуйте спосіб дугового зварювання порошковим дротом.
13. Які види дугового зварювання в захисних газах ви знаєте? Охарактеризуйте їх.
14. Охарактеризуйте особливості зварювання у вуглекислому газі.
15. Охарактеризуйте особливості зварювання в інертних газах.
16. Що таке плазма? Дайте основні характеристики плазмового зварювання.
17. Що таке електрошлакове зварювання? Вкажіть його призначення.
18. Що таке лазерне зварювання?
19. Що таке газове зварювання? Вкажіть його призначення.
20. Яке обладнання застосовують у газовому зварюванні?

2.10. ЗВАРЮВАННЯ ТИСНЕННЯМ

Зварювання тисненням здійснюється пластичним деформуванням усіх або однієї із з'єднуваних заготовок у місці з'єднання шляхом докладення зусилля стиснення (ДСТУ 3761.2 – 98). Методи зварювання тисненням мають певні переваги перед методами зварювання плавленням. Застосування цих методів значно розширює діапазон зварюваних матеріалів, включаючи різномірні матеріали. Важливим є також те, що завдяки унеможливленню виникнення тріщин, пористості,

зменшення деформації, а також уникненню зміни складу металу зварного шва і створенню більш дрібної структури підвищується якість зварних з'єднань. Під час застосування більшості методів зварювання тисненням завдяки легкості механізації процесів досягається їх висока продуктивність. Однак визначаючи методи зварювання, треба мати на увазі, що пружнопластичні деформації, які відбуваються під час виконання зварювання тисненням без підігріву, можуть призводити до зниження пластичності. Слід також пам'ятати, що деякі особливості зварювання тисненням можуть обмежувати їх застосування для отримання певних конструкцій.

Відомі такі способи зварювання тисненням: контактне, холодне, тертям, вибухом тощо. Не всі з них застосовують у автомобілебудуванні. У посібнику розглянуто лише ті способи, які широко впроваджені або мають перспективу застосування автомобілебудівному виробництві.

2.10.1. Контактне зварювання

Контактне зварювання – це зварювання тисненням із попереднім нагріванням з'єднуваних поверхонь заготовок теплом, що виділяється в місцях їх контактування під час проходження електричного струму (ДСТУ 3761.2 – 98). У місці контакту через збільшений електроопір порівняно з іншими ділянками підвищується температура і, як наслідок, підвищується пластичність заготовок. Після досягнення потрібної пластичності зварювані заготовки стискають для отримання нерознімного з'єднання.

Кількість тепла, що виділяється в зоні зварювання внаслідок проходження електричного струму, визначається за законом Джоуля–Ленца:

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

де: I – зварювальний струм, R – електроопір у місці контакту металів, що зварюються, t – час зварювання. Виходячи з цієї формули, можна сказати, що для регулювання теплового режиму контактного зварювання першочергове значення має сила струму (I^2). Тому в установках для контактного зварювання застосовують трансформатори, які знижують напругу і збільшують струм. Вторинна обмотка такого трансформатора складається з одного витка, зробленого з мідної фольги, або литого порожнистого виробу, який може охолоджуватись водою. Вторинна робоча напруга становить 1,5...12 В, а сила струму – від 10 000 до 50 000 А.

Розрізняють три основні види контактного зварювання: стикове, точкове та шовне.

Стикове зварювання – це контактне зварювання, під час якого з'єднання відбувається за стичними поверхнями заготовок. За стикового зварювання заготовки 1, що з'єднуються, (рис. 2.49) затискають у контактних колодках 2 зварювальної машини і пропускають через них струм значної величини, що індуктується у вторинній обмотці 3 трансформатора. При цьому в зоні контакту частин заготовок виділяється значна кількість тепла, завдяки чому вони нагріваються до термопластичного стану. Після цього заготовки стискають, і в місці їх контакту відбувається зварювання.

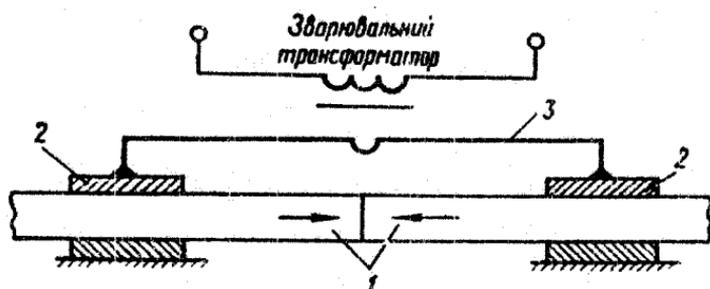


Рис. 2.49. Принципова схема стикового зварювання

Розрізняють два способи стикового зварювання: електроопором і оплавленням.

Стикове зварювання опором – це контактне зварювання стичних з'єднань, під час якого нагрівання здійснюють теплом, що виділяється електричним струмом на контактному опорі між попередньо стиснутими з'єднуваними поверхнями заготовок. Для зварювання електроопором спочатку з'єднують торці металів, що підлягають зварюванню, і за їх незначного стискання вмикають електричний струм. Після того як торці і прилегла до них зона розігрівається до стану високої пластичності, виконують осадку (стискання металів). Процес зварювання триває короткий час (секунди). Завдяки високій пластичності металу в зоні зварювання застосовують відносно низький тиск. Для якісного проведення процесу треба здійснити ретельну механічну підготовку торців перпендикулярно осі заготовок таким чином, щоб вони добре прилягали один до одного. Цей спосіб застосовують для з'єднання деталей простих форм (квадрат, круг) і невеликих розмірів.

Зварювання оплавленням – це зварювання, під час якого з'єднання стичних торців заготовок супроводжується їх короточасним оплавленням. Перед зварюванням торці ретельно не готують – вони можуть мати невеликі виступи. Це зварювання виконують таким чином. Перед з'єднанням заготовок вмикають електричний струм. Далі заготовки, які перебувають під напругою, з'єднують і після безперервного короточасного оплавлення торців із певною швидкістю виконують осадку. В момент зближення торців деталей (рис. 2.50, а) починається розплавлення одного або невеликої кількості виступів (рис. 2.50, б). Плавлення відбувається миттєво. При цьому частина рідкого металу у вигляді іскор розлітається навсідч, а решта залишається на поверхні торців заготовок, що з'єднуються. Далі внаслідок зближення деталей кількість контактів зростає (рис. 2.50, в), процес закінчується, коли обидві торцеві поверхні покриються тонким шаром рідкого металу (рис. 2.50, г). Потім починається процес осадки, коли розплавлений метал разом з оксидами та іншими забрудненнями

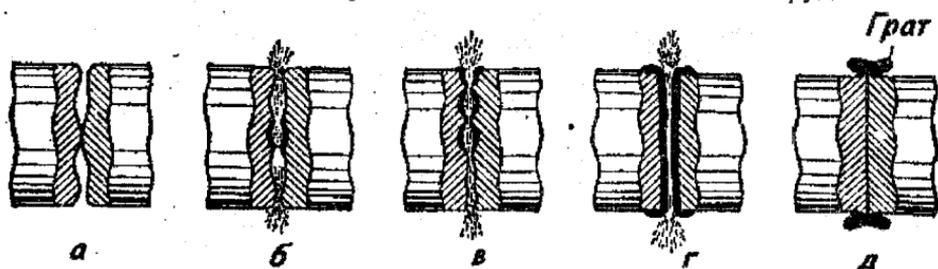


Рис. 2.50. Послідовність оплавлення при контактному стиковому зварюванні оплавленням.

видавлюється із стику, утворюючи грат (рис. 2.50, д). При цьому перегрітий метал навколо шовної зони пластично деформується, утворюючи зварне з'єднання, характерне для процесу зварювання у твердому стані.

Стикове зварювання використовують у виробках із низьковуглецевої сталі, кольорових металів та їх сплавів. Міцність шва стикового зварювання не поступається перед міцністю основного металу. Тому стикове зварювання застосовують для відповідальних з'єднань.

Стиковим зварюванням з'єднують арматуру залізобетону, труби водо- і газопроводів різних діаметрів, елементи з відходів профільного прокату для їх подальшого застосування в конструкціях, рейки трамвайних та залізничних шляхів тощо.

Точкове контактне зварювання – це зварювання заготовок точковими швами внапуск, під час якого нагрівання та плавлення з'єднаних поверхонь відбувається у межах точкового контакту між (під) електродами, що підводять електроенергію та здійснюють тиск. Цей процес застосовують для з'єднання листових або стержневих заготовок. Точкове зварювання буває двостороннім і одностороннім. За двостороннього точкового зварювання заготовки 2, що зварюються, затискають між двома електродами 1 (рис. 2.51, а) й короткочасно пропускають електричний струм значної сили. Під дією струму метал між електродами нагрівається, і в місці контакту утворюється лите ядро 3. Потім струм вимикають і заготовки здавлюють. За одностороннього точкового зварювання струм підводять з одного боку від заготовок згідно зі схемою, показаною на рис. 2.52. Обидва види точкового зварювання застосовуються майже для всіх металів і сплавів. Особливо добре зварюються низьковуглецеві та нержавіючі сталі. Задовільно зварюються алюмінієві сплави, латуні та бронзи.

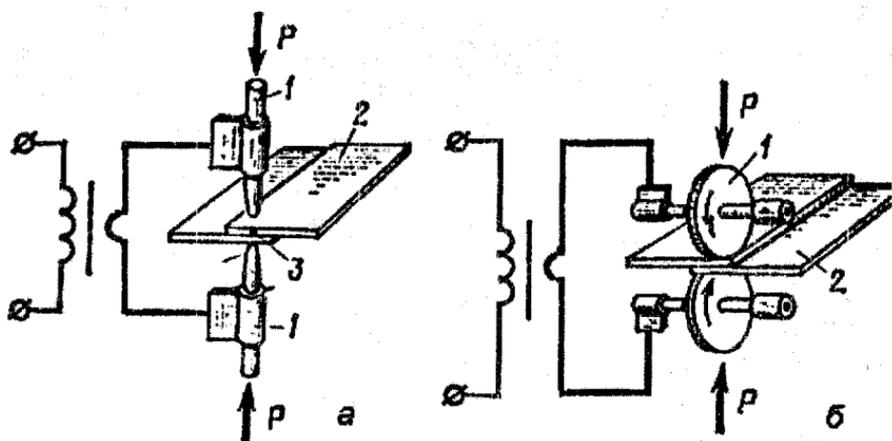


Рис. 2.51. Принципові схеми точкового (а) і шовного контактного (б) зварювання

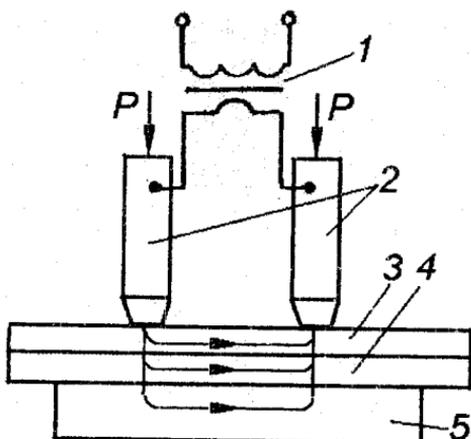


Рис. 3.52. Схема одностороннього точкового зварювання:
 1 – трансформатор; 2 – електроди; 3 – верхня заготовка;
 4 – нижня заготовка; 5 – мідна підкладка

Якість точкового зварювання значною мірою залежить від вибраного режиму зварювання (сили струму, часу проходження струму і тиску на електроди). Так, для зварювання алюмінієвих сплавів завтовшки 0,5–2,0 мм параметри режиму зварювання змінюються в таких межах: сила струму 13 000–30 000 А, час зварювання 0,1–0,3 с, зусилля на електродах 1000–4500 Н. Точкове зварювання широко застосовують для виконання хрестоподібних з'єднань арматури. Зварюють також листові елементи однакової або різної товщини внапуск, листові елементи зі стрижнями або стрічками.

Шовне контактне зварювання – це зварювання, під час якого утворюється безперервне з'єднання внапуск між внутрішніми поверхнями заготовок внаслідок відносного переміщення вздовж шва обертових роликів електродів. Це зварювання відрізняється тільки тим, що замість стрижневих електродів застосовують електроди 1 у вигляді роликів (рис. 2.51, б). До роликів докладається зусилля і їм надається обертовий рух, у результаті чого зварювані заготовки 2 переміщуються між роликами. При цьому зварний шов має вигляд суцільної стрічки. Електроди-ролики, як і електроди-стержні для точкового зварювання, виготовляють із міді або мідно-кадмієвого сплаву. Діаметр роликів береться в межах 40–350 мм, а ширина їх робочої частини – 4–6 мм. За роликівого зварювання шов може бути суцільним або перервним залежно від режиму подавання струму. Режими шовного зварювання визначають залежно від хімічного складу

та товщини матеріалу зварюваних заготовок. Сила струму – в межах 20 00–50 000 А, зусилля на ролики сягає 6000 Н, а швидкість зварювання коливається в межах 0,5–3,5 м/с.

Крім описаного, є метод шовного зварювання з роздавлюванням крайок (ДСТУ 3761.2 – 98), схему якого подано на рис. 2.53. Суть цього методу полягає в тому, що стикове з'єднання утворюється між заготовками однієї товщини, зібраними з контрольованим вузьким напуском, який роздавлюється роликами в момент його плавлення.

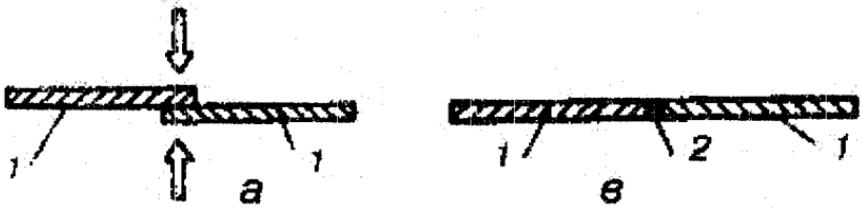


Рис. 2.53. Схема шовного зварювання з роздавлюванням крайків:
а – до зварювання, в – після зварювання

Контактне зварювання вирізняється високою продуктивністю і якістю, може підлягати механізації, автоматизації і роботизації. Застосування роботів, комплексних ліній, гнучких виробничих систем є одним з основних напрямків автоматизації точкового контактного зварювання в автомобілебудуванні

Серед механізованих способів контактне зварювання із застосуванням роботів впевнено посідає одне з перших місць. Слід зазначити, що найвище насичення промисловими роботами в галузі контактного точкового зварювання досягнуто в зварювальних лініях виробництва автомобілів. У зв'язку з тим, що час контактного зварювання однієї точки дуже малий, для підвищення продуктивності виготовлення автомобіля зберігається тенденція підвищення швидкостей і прискорень переміщень роботів. Розвиток систем керування роботами відбувається в напрямку спрощення програмування, діагностики та усунення збоїв і відмов.

Дуже поширене точкове зварювання у вагонобудуванні при з'єднанні обшивки з рамкою, при виробництві тракторів і комбайнів, побутових приладів – холодильників, пральних машин, спортивного інвентарю (наприклад, на автоматичних лініях зварювання лез із кронштейнами хокейних ковзанів), при виготовленні будівельних

панелей, каркасів і т. п. Особливе місце займає точкове зварювання при виробництві конструкцій відповідального призначення. Так, на деяких сучасних пасажирських літаках кількість точок зварювання досягає 1,5 млн. Значно поширене точкове зварювання в приладобудуванні (чутливі елементи, реле, корпуси приладів) і особливо в радіоелектроніці (з'єднання інтегральних схем, провідників, електронно-оптичні системи кінескопів тощо).

Шовним зварюванням з'єднують листові заготовки незначної товщини (до 3 мм) з низьковуглецевої сталі, кольорових металів та їх сплавів. Також шовним зварюванням отримують герметичні з'єднання, що працюють як при високому тиску, так і в умовах глибокого вакууму (наприклад, паливні баки автомобілів і сільськогосподарської техніки, баки пральних машин, корпуси холодильників та інших ємностей: вогнегасників, бідонів, мембранних коробок і сильфонів в приладобудуванні). При цьому швидкість зварювання герметичних швів досягає 10-15 м / хв.

2.11. Зварювання тертям

Зварювання тертям – це зварювання тисненням із нагріванням з'єднуваних поверхонь заготовок внаслідок їх тертя одна відносно одної під час обертання чи зворотно-поступального руху. Можливим є також використання робочого інструмента. Під час зварювання тертям тіл циліндричної форми одна із заготовок обертається навколо своєї осі з певною частотою, а інша притискується до неї осьовим тиском (рис. 2.54).

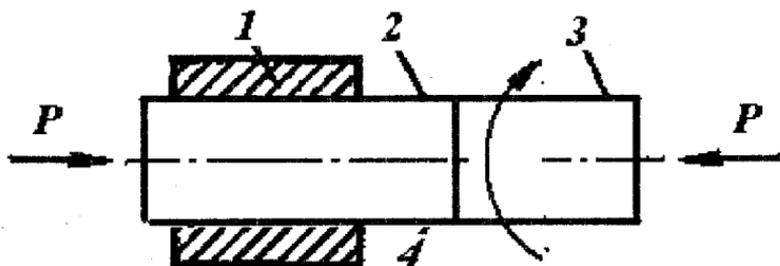


Рис 2. 54. Схема зварювання тертям за взаємного тертя поверхонь заготовок:

1 – затискний пристрій, 2 – нерухома заготовка, 3 – заготовка, що обертається, 4 – поверхня тертя

Унаслідок тертя зварювання заготовки нагріваються на невелику глибину за досить короткий час. Самі заготовки майже не нагріваються. У зв'язку з цим витрати енергії в 5...10 разів менші, ніж за контактного електрозварювання, за якого значна кількість енергії витрачається на непотрібне нагрівання заготовок. Після нагрівання торців до потрібної температури (1000...1300°C для сталей) обертання припиняють і збільшують осьовий тиск, унаслідок чого відбувається пластичне деформування й утворення металевих зв'язків між поверхневими атомами. Зварювання відбувається у твердому стані без розплавлення. При цьому руйнуються оксидні плівки, які видаляються в радіальному напрямі. В тому ж напрямі видавлюється пластичний метал стику – грат, який має характерну форму подвійного кільця.

Час зварювання залежить від діаметра заготовок, частоти обертання, тиску, матеріалу тощо. Наприклад, для зварювання заготовок із низьковуглецевих сталей діаметром 20 і 50 мм час нагрівання становить 6 і 20 с за частоти обертання 1000 і 400 об/хв і зусилля 15 і 100 кН відповідно. Висока продуктивність процесу і висока якість продукції досягається завдяки тому, що за пластичної деформації металу в зоні шва відбувається подрібнення зерен металу. Утворюється зварний шов, який не містить укралень та інших макродефектів; його міцність і пластичність, а також прилеглих до шва зон не менші, ніж в основного металу.

Зварювання тертям ускладнюється деякими труднощами, пов'язаними зі швидким гальмуванням зварювальних деталей. У зв'язку з цим були розроблені різновиди зварювання тертям: за допомогою обертання допоміжного тіла й одночасного зварювання трьох деталей на машині з двома шпинделями, рис. 2.55.

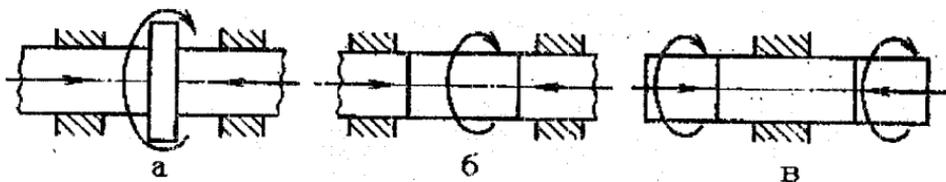


Рис. 2.55. Різновиди процесу зварювання тертям:

а, б – зварювання за допомогою обертання допоміжного тіла; в – одночасне зварювання трьох деталей на машині з двома шпинделями

При зварюванні за схемами, що подані на рис. 2.55, *а* і *б*, зварюють дві нерухомі деталі за допомогою обертання затиснутого між ними третього тіла. Як третє тіло можна використовувати тонкий диск, що має діаметр, більший за діаметр заготовок, або вставку, діаметр якої дорівнює діаметру заготовок. Зварювання за схемою на рис. 2.55, *в* виконують із метою підвищення продуктивності праці. При цьому зварюють одночасно три заготовки, середня з котрих залишається нерухомою.

Зварювання тертям можна легко автоматизувати. За допомогою цього способу з'єднують однорідні і різнорідні метали. За винятком чавуну, добре зварюються всі чорні метали, сталі майже всіх класів, алюміній, мідь, латунь, алюміній із міддю, мідь зі сталлю. Цей спосіб придатний для виготовлення різальних інструментів (свердел, фрез), ріжучу частину яких із дорогої швидкорізальної сталі (P9, P18 та інших сталей) приварюють до хвостовика, що виготовляється з дешевшої сталі 45. Цей спосіб застосовують також для виготовлення ступінчастих валів, клапанів двигунів внутрішнього згоряння, газових балонів тощо.

Для з'єднання листових матеріалів, переважно алюмінієвих, застосовують *зварювання тертям із перемішуванням* (ЗТП), схему процесу відображено на рис. 2.56. Перед зварюванням заготовки очищують від бруду і жорстко закріплюють на робочому столі, притуляючи одну до одної. Для отримання зварного з'єднання треба робочий твердосплавний інструмент 1, який обертається навколо вертикальної осі зі швидкістю $V_{об}$, із зусиллям F , занурити в стик, щоб наконечник 2 проник у метал, а бурт 3 торкнувся поверхонь зварюваних деталей. Завдяки теплоті, що виділяється від тертя робочих поверхонь бурта і наконечника інструмента, матеріал крайків нагрівається до пластичного стану і починає перемішуватись навколо наконечника інструмента. У процесі переміщення інструмента вздовж стику зі швидкістю $V_{зв}$ утворюється зварний шов. Спосіб зварювання тертям із перемішуванням дає змогу виконувати стикові, кутові, таврові та напускові з'єднання (рис. 2.56, *а* – *з*). Обладнання для зварювання цим способом є досить дорогим. Але завдяки відносно незначним енергетичним і виробничим затратам спосіб може бути економічно вигідним у виробництві.

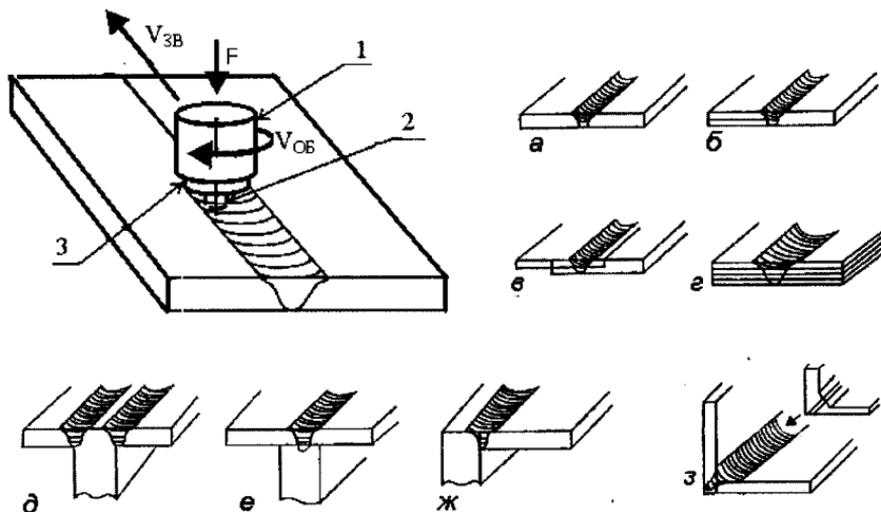


Рис. 2.56. Схема процесу зварювання тертям із перемішуванням:
 1 - робочий інструмент; 2 - наконечник; 3 - бурт.

Основні типи з'єднань, які можна виконати за допомогою цього способу зварювання:

а - стикове; б - напусково-стикове; в - напускове; г - багатошарове напускове; д - двохпрохідне таврове; е - таврове прорізне; ж, з - кутове.

Контрольні запитання для самостійної підготовки

1. Що таке зварювання тисненням? Які способи тисненням вам відомі?
2. Що таке контактне зварювання?
3. Які є види контактного зварювання і де їх застосовують?
4. Що таке зварювання тертям?
5. Для чого застосовують зварювання тертям із перемішуванням?

2.12. ОСОБЛИВОСТІ ЗВАРЮВАННЯ РІЗНИХ МАТЕРІАЛІВ

Сталі, чавуни, сплави кольорових металів та інші матеріали відрізняються своїми властивостями. Вони мають різну температуру плавлення, температурні коефіцієнти розширення, тепло- і електропровідності, корозійну стійкість, різні об'єми в рідкому і твердому станах, структурні перетворення під час нагрівання й охолодження у твердому стані тощо. всі ці характеристики визначають особливості зварювання певних груп металів і навіть окремих матеріалів.

2.12.1. Особливості зварювання сталей

Розглядають окремо зварювання конструкційних низьковуглецевих і низьколегованих сталей, конструкційних середньовуглецевих, високовуглецевих, середньолегованих, високолегованих сталей, а також окремих важкозварюваних сталей. Суттєво впливають на зварність і вибір способу зварювання такі фактори, як уміст вуглецю, кількісний і якісний склад сталей, а також попередня обробка тиском (наприклад, прокатуванням), термічною обробкою тощо. За цими ознаками сталі умовно поділили на групи.

2.12.2. Зварювання низьковуглецевих і низьколегованих конструкційних сталей

Низьковуглецеві конструкційні сталі (Ст0, Ст1, Ст2, Ст3, Сталі 10, 15, 20 та інші) містять невелику кількість вуглецю ($< 0,25\%$ C) і обмежену кількість домішок, завдяки цьому вони добре зварюються. Виняток становить зварювання сталей великої товщини за знижених температур. Технологія їхнього зварювання звичайно вибирається за умови рівномірності зварного з'єднання й основного металу, а також відсутності в ньому дефектів. Метал шва під час зварювання низьковуглецевих сталей відрізняється меншою кількістю вуглецю і трохи підвищеною кількістю мангану і кремнію. Основний метал у зоні термічного впливу внаслідок зварювання трохи зміцнюється. За потреби зняти напруження, що виникають у зварних конструкціях, виконують термічну обробку (високе відпускання). В усіх випадках на необхідність термічної обробки вказують у проектно-технологічній документації на виготовлення конструкції.

Збільшення кількості вуглецю в середньовуглецевих сталях зумовлює появу структур гартування і підсилення ліквіації сірки у шві,

що може призвести до утворення гарячих тріщин. Тому середньовуглецеві сталі належать до сталей з обмеженою зварністю.

Для зварювання низьковуглецевих конструкційних сталей у машинобудуванні застосовують переважно ручне дугове зварювання, автоматичне і механізоване (напівавтоматичне) під флюсом та в середовищі захисних газів, електрошлакове і меншою мірою газове зварювання. Таким чином для зварювання цих сталей можна застосовувати будь-який з описаних вище методів.

Низьколеговані будівельні сталі можуть бути низьковуглецевими і середньовуглецевими.

Низьковуглецеві низьколеговані будівельні сталі відрізняються від низьковуглецевих тим, що містять не більш як 0,22 % вуглецю і < 5 % легуючих елементів, таких як манган, хром, кремній, ванадій, мідь, молибден, нікель, тощо. З огляду на низький уміст вуглецю ці сталі характеризуються доброю або задовільною зварністю. Порівняно з низьковуглецевими низьколеговані сталі більш чутливі до нагрівання при зварюванні. Більшість з них мають схильність до утворення структур гартування у металі шва і зоні термічного впливу за підвищеної швидкості охолодження, що призводить до зменшення пластичності металу та його стійкості до крихкого руйнування. Для зварювання таких сталей, особливо великої товщини, рекомендується попередній підігрів і наступна термічна обробка, зокрема й високотемпературне відпускання.

Потрібно застосовувати також зварювальні дроти з малою кількістю вуглецю і сірки, витримувати послідовність накладання зварних швів. Рекомендується застосовувати зварювання в захисних газах (зварювання у вуглекислому газі, аргоні, аргоні з додаванням вуглекислого газу). Для підвищення продуктивності і покращення властивостей зварного з'єднання застосовують порошкові дроти. Застосовується також ручне зварювання покритими електродами, наприклад, такими, як Э42А, Э50А, Э60А.

Існують деякі особливості зварювання низьколегованих сталей із підвищеною (клас міцності С330...400) і високою міцністю (клас міцності С450...600). Міцність у них досягається певною термічною обробкою: нормалізацією та високим відпуском, гартуванням і відпуском, контрольованим прокатуванням, старінням. Добрих властивостей досягають за певного легування, наприклад, за комплексного легування ванадієм й азотом (сталь 16Г2АФ), ванадієм і міддю (15Г2СФД) або молибденом та бором (сталь 14Х2ГМР). Завдяки застосуванню вказаних засобів обробки структура сталей стає

дрібнозернистою, підвищується межа текучості, покращується в'язкість, знижується поріг холодноламкості. Застосовуючи технологію зварювання цих сталей, слід мати на увазі ймовірність появи холодних тріщин у зварному з'єднанні внаслідок утворення мартенситної або бейнітної структури за швидкого охолодження, щоб забезпечити якнайменше зниження пластичності й ударної в'язкості металу шва і зони термічного впливу внаслідок росту зерна, а також зменшення міцності основного металу в зоні термічного впливу. Особливо це стосується *середньовуглецевих низьколегованих конструкційних будівельних сталей* (наприклад, сталі 35ГС), в яких за швидкого охолодження обов'язково виникають напруження, пов'язані з утворенням у зоні термічного впливу мартенситної структури, яка є причиною появи холодних тріщин. Практично для запобігання цьому вдаються до таких технологічних прийомів: попередній або супутний підігрів крайок зварюваних металів, застосування окиснювальних флюсів, ретельне очищення поверхні основного металу і зварювального дроту, збільшення кількості проходів під час зварювання, використання легованих зварювальних дротів, зменшення погонної енергії зварювання тощо. Для зменшення ймовірності утворення кристалізаційних тріщин слід застосовувати зварювальний дріт, що містить малу кількість вуглецю й сірки. Іноді безпосередньо після зварювання металів великої товщини рекомендується виконувати підігрів зварного шва протягом 1 години і довше за температури 200°C.

2.12.3. Зварювання середньо- і високовуглецевих сталей

Середньовуглецеві сталі (вміст вуглецю 0,26...0,49%) застосовують переважно у машинобудуванні у вигляді деталей невеликих розмірів (осі, вали, шестерні тощо) після нормалізації, поліпшення або поверхневого гартування. Залежно від кількості вуглецю вони належать до задовільно і обмежено зварюваних сталей. Зварювання слід виконувати таким чином, щоб знизити вміст вуглецю в металі шва, що досягається застосуванням електродного дроту або електродів із низьким умістом вуглецю і зменшенням частки основного металу в металі шва, а також дотриманням більшості рекомендацій, що були надані для зварювання середньовуглецевих низьколегованих сталей. Здебільшого застосовують ручне дугове зварювання й механізоване зварювання у вуглекислому газі.

Високовуглецеві сталі (вміст вуглецю більш ніж 0,5%) належать до погано зварюваних сталей, тому для виготовлення зварних конструкцій

їх не застосовують. Але за потреби ці сталі зварюють, вживаючи заходів, що запобігають появі холодних тріщин (попереднє підігрівання, відпалювання або відпускання після зварювання і т.п.)

2.12.4. Зварювання високолегованих сталей

До високолегованих умовно належать сталі, які більш ніж на 45 % складаються із заліза, а кількість легуючих домішок перевищує 10%. Основним легуючим елементом високолегованих сталей є хром. Крім хрому, для надання певних властивостей до цих сталей додають інші легуючі елементи. Залежно від того, який елемент переважає, сталі поділяють на хромисті, хромонікелеві, хромоманганові, хромоманганозотисті. За властивостями їх поділяють на корозійностійкі, жаростійкі і жароміцні. Залежно від того, яка структура утворюється внаслідок охолодження на повітрі, високолеговані сталі поділяють на мартенситні, мартенситноферитні, феритні, аустенітно-мартенситні, аустеніт-ноферитні й аустенітні.

Структурний клас хромистих сталей залежить переважно від вмісту в них вуглецю і хрому. За вмісту 12...13% хрому сталі можуть належати до різних структурних класів: сталь 12X13 – до мартенситно-феритного класу, сталі 20X13, 30X13 і 40X13 – до мартенситного класу. Взагалі, за малої кількості вуглецю і вмісту 13...16% хрому сталі належать до мартенситно-феритного класу, а за вмісту хрому понад 16 % - до феритного класу. Від збільшення кількості вуглецю структура сталі змінюється в бік сталей мартенситного класу. Введення до сталі інших елементів може змінювати структуру, і тоді клас структури може змінюватись на інший.

У процесі зварювання відбувається розплавлення присадного й основного металів, а під час охолодження – термічна обробка металу шва і шару основного металу (зони термічного впливу). При цьому будуть змінюватись структура та, безумовно, властивості, а також можуть з'явитися дефекти. Під час нагрівання й охолодження виникають пружнопластичні деформації, які також впливають на якість металу. Зміна структури внаслідок зварювання сталей різного структурного класу має особливості, які майже завжди ускладнюють процес зварювання. Отже, в сталях, що містять 10,5...12% хрому і додатково леговані молібденом, вольфрамом, ніобієм і ванадієм, залежно від температури термічної обробки й експлуатації може виникнути крихкість, а в хромистих феритних сталях за певних швидкостей охолодження – схильність до міжкристалітної корозії.

У процесі зварювання феритних сталей можливе утворення холодних тріщин. Крім того, зварювання супроводжується укрупненням зерна в металі шва і в зоні термічного впливу. Це ускладнює застосування супутнього або попереднього підігріву для запобігання появі холодних тріщин.

Аустенітні сталі мають хромонікелеву або хромоманганову основу. Під час охолодження на повітрі у цих сталях не відбувається структурних перетворень. Однак у процесі їхнього зварювання можуть утворюватись гарячі тріщини. Це можуть бути дрібні мікротріщини, а також макротріщини. Тріщини виникають також під час термічної обробки або роботи конструкції за підвищеної температури. Їх поява пояснюється наявністю напружень, що з'являються внаслідок усадки, а також утворенням крупнозернистої структури. Для запобігання цьому явищу застосовують багато методів. Найчастіше вдаються до методу утворення у шві двофазної структури шляхом додавання в присадний метал феритоутворювальних елементів, таких як титан, молібден, кремній тощо. Застосовують також методи, які сприяють подрібненню кристалів.

Більшість високолегованих сталей широко застосовують як корозійно-стійкі матеріали. В зв'язку з тим, що вони різноманітні за складом і своїми структурними характеристиками, а також мають різні фізичні властивості, під час зварювання слід брати до уваги їх специфічні особливості. Наприклад, сталі феритного класу мають схильність до росту зерна і під дією зварювального нагрівання значно знижуються їх пластичність й ударна в'язкість. У сталей мартенситного класу виникають великі напруження внаслідок мартенситного перетворення. Для уникнення цього явища доцільно перед зварюванням задля зниження напружень підігрівати сталь до 300°C, а після зварювання виконувати спеціальну термічну обробку (високий відпуск). Наприклад, сталь Х17 після зварювання відпаляють за температури 760...780°C.

Для зварювання нержавіючих сталей застосовують автоматичне, механізоване і ручне дугове зварювання, а також плазмове, лазерне та інші. Особливістю застосування дугових методів є те, що зварювання виконують за допомогою постійного струму зворотної полярності (плюс на електроді). Потреба в застосуванні постійного струму для нержавіючих сталей пояснюється тим, що за змінного струму дуга не є стійкою і формування шва виконується незадовільно. З метою захисту металу від окиснення електродугове зварювання виконують короткою дугою; при цьому зменшується розбрикування металу. Основні типи зварювальних дротів, що використовуються для зварювання

нержавіючих сталей, наведено у ГОСТ 10052-62. Для запобігання вигорянню титану, хрому та інших хімічних елементів застосовують зварювання у вакуумі, в середовищі захисних газів - аргону, сумішей аргону з іншими газами тощо.

2.12.5. Зварювання чавуну

Чавун являє собою сплав заліза з вуглецем, що містить більше ніж 2,14 % вуглецю. Така велика кількість вуглецю в порівнянні зі сталями надає йому ряд специфічних властивостей і особливостей, які потрібно брати до уваги перед його зварюванням а саме:

1) при високих швидкостях охолодження відбувається так зване «відбілювання», коли утворюється шар білого крихкого чавуну, який є дуже твердим і майже не обробляється різанням;

2) низькі пластичні властивості чавуну. робить його здатним до перенапружень, в результаті чого при зварюванні можуть утворюватися тріщини;

3) при зварюванні відбувається вигорання вуглецю, в результаті чого виділяється окис CO, який сприяє утворенню пір. Особливість бути крихким стає основним недоліком, коли справа доходить до ремонту об'єктів з чавуну. Це вимагає застосування спеціальних технологій.

Зварювання чавуну може здійснюватися трьома способами: : гаряче зварювання (коли вся заготовка нагрівається), напівгаряче зварювання (зварювання з місцевим нагріванням), холодне зварювання, коли деталь перед зварюванням взагалі не нагрівається. Останній спосіб сьогодні набуває все більшого поширення. Гаряче і напівгаряче зварювання вимагає попереднього підігріву деталей до температури від 250 до 650 °С. Після того, як метал досягає необхідної температури, починають його зварювання на малих струмах, щоб мінімізувати перемішування і залишкові напруги. Велике внесення тепла при зварюванні може привести до розтріскування. Після зварювання виріб повинен охолоджуватися поступово, наприклад, виріб слід помістити в пісок або накрити за допомогою спеціальних ізоляційних матеріалів. Застосування підігріву робить процес складнішим, так як для нього потрібне спеціальне обладнання для підігріву. При технології холодного зварювання (без підігріву) важливо робити короткі зварювальні шви. Найкращим варіантом є такий, коли створюють шви довжиною не більше 25 мм. Також важливо, щоб вони охолоджувались поступово. Для виконання цієї технології застосовують ручне дугове

зварювання електродами (MMA), аргонодугове зварювання (MIG/MAG) і напівавтоматичне зварювання (TIG). При ручному дуговому зварюванні чавуну покритими електродами (MMA) застосовують чотири типи електродів: чавунні електроди, електроди з мідною основою, електроди з нікелевої основою та сталеві електроди. При використанні кожного з цих типів електродів враховують такі особливості, як оброблюваність, міцність і пластичність шва після зварювання. При зварюванні чавунними електродами необхідний розігрів деталі до температури в діапазоні від 120 ° С до 425 ° С, залежно від розміру деталі. Зазвичай чавунні електроди бувають діаметром від 6 до 15 мм, і зварювальний струм для них становить від 200 до 600 А. Краще використовувати електроди малого діаметра і відносно низькі струми. Існують два типи електродів із мідною основою: зі сплаву олова і електроди зі сплаву алюмінію. Електродами зі сплаву олова виконують пайку з отриманням швів із достатньою пластичністю. Алюмінієві електроди застосовують для отримання більш міцного зварного шва. З нікелевої основою існує три типи електродів. Перший тип містить близько 50% нікелю, другий містить близько 85% нікелю і третій тип, який містить нікель і мідь. Застосування цих електродів дає приблизно однакові результати. Ці електроди можуть бути використані для зварювання без підігріву, але рекомендується нагрівання до 40 ° С. Сталеві електроди не рекомендуються для зварювання чавуну, якщо зварювальний шов буде згодом механічно оброблятися. Цей тип електродів повинен використовуватися тільки для дрібного ремонту. При застосуванні напівавтоматичного зварювання (MIG/MAG) використовують малі струми і електроди невеликого діаметра. При цьому процесі може бути використано кілька типів зварювального дроту, в тому числі: сталевий дріт із використанням суміші газів 80% Ar + 20% CO₂, нікелевий дріт із використанням 100% аргону для захисту від кисню зварювальної ванни і кремнієво-бронзовий дріт з використанням 100% аргону (можна також застосувати 50% аргону + 50% гелію). Зварювання чавуну в аргоні (TIG) можливо, але цей процес дуже складний, але при дотриманні технології і врахуванні зазначених вище особливостей можна домогтися відмінної якості зварювання. Однією з автомобільних чавунних деталей є блок циліндрів двигуна. Його ремонтують із застосуванням зварювання. При ремонті застосовують гаряче, напівгаряче та холодне зварювання. Найбільшою проблемою являється зварювання тріщин. Перед початком ремонту з блока в тих місцях, де буде відбуватися зварювання, видаляють всі впресовані деталі. На обох

кінцях виявленої тріщини свердлять отвори діаметром близько 5 мм. У кожусі завчасно прорізаються отвори для можливості доступу до ушкоджених місць.. Нагрівання виконують пальниками з використанням суміші ацетилену і кисню, а для рівномірного нагріву всього виробу застосовують спеціально обладнаний кожух зі сталі з прошарком азбесту. Застосовують також печі. Використовують електроди з чавуну або сталі. Нагрівання деталі ведеться повільно до температури 600...650° С, після чого виконують зварювання і повільно охолоджують. Даний метод є найбільш дорогим і трудомістким, але призводить до відновлення властивостей матеріалу, які практично відповідають початковим параметрам. Спосіб використовується в тому випадку, якщо тріщини з'явилися у важкодоступних місцях, наприклад, при стику стін різної товщини. При такому способі зварювання у виробі виникають незначні внутрішні напруження. Зварювання з місцевим нагріванням застосовують, коли пошкодження з'явилися на поверхні, нагрів якої не призведе до виникнення внутрішньої напруги в різних ділянках всього блоку. Під час зварювання поверхню, що підлягає ремонту, постійно підігрівають. Нагрівання до 600...650° С виконують газовим пальником. Після закінчення робіт поверхню знову нагрівають до зазначеної температури і залишають остигати. Спосіб застосовують нечасто.

Зварювання блоку двигуна без нагріву використовується при ремонті поверхонь, віддалених від ділянок, які несуть навантаження на таку довжину, коли нагрів, що відбувається під час зварювання, і подальше охолодження не вплинуть на їх міцність. Таке зварювання може виконуватися газовими пальниками, електродами зі сталі, чавуну або кольорових металів. Тріщини, що виникли в системі охолодження сорочки, найкраще зварювати електродами із заліза і міді швами невеликої довжини, що не перевищують 5 см. Зварювання блоку циліндрів з чавуну - досить трудомісткий і делікатний процес, який відбувається в кілька етапів. Для цього необхідні спеціальні знання та навички. Блок двигуна рясніє всілякими конструкційними каналами і посадочними отворами, навколо або поруч яких утворюються тріщини. Непрофесійне виконання роботи може призвести до того, що блок, який ремонтують, може розколотися або трісне в іншому місці

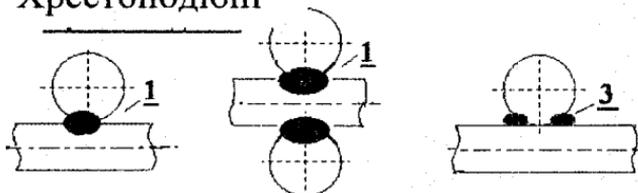
2.12.6. Зварювання арматурних будівельних сталей

Не всі арматурні сталі підлягають зварюванню. Добре зварюються сталі класів А240, А300, гірше - А400, а термічно або термомеханічно

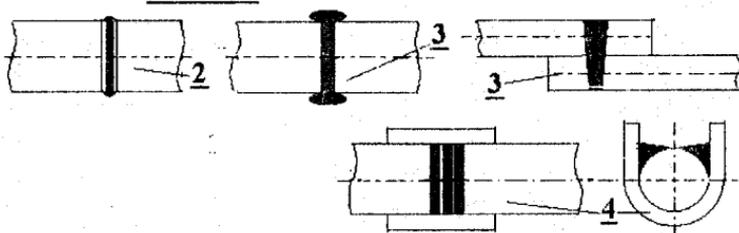
зміцнені сталі мало придатні до зварювання.

Для з'єднання арматурних стрижнів або дротів застосовують переважно електроконтактне зварювання, зварювання тертям і електродугові способи зварювання (ручне дугове, ванний спосіб, механізоване в середовищі вуглекислого газу й зварювання під флюсом), а також газове зварювання. Більш придатними є контактні види зварювання завдяки можливості регулювання процесів нагрівання і швидкості охолодження металу, а механічна деформація нагрітого металу сприяє утворенню більш дрібнозернистої структури. Завдяки цьому зварний шов, зона термічного впливу й основний метал стають рівноміцними. Все це позитивно впливає на якість зварного шва. Крім того, контактні способи зварювання більш продуктивні й економічно вигідні. На рис. 2.57 наведені схеми зварних з'єднань арматури дуговими, електроконтактним і ванним способами.

Хрестоподібні



Стикові



Таврові

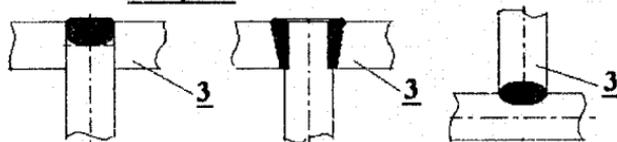


Рис. 2.57. Типи з'єднань арматури різними способами:

1 – контактним точковим; 2 – контактним стиковим;

3 – електродуговим; 4 – ванним

Перед зварюванням здійснюють підготовку арматури. Арматуру

сталь випускають у вигляді стрижнів та бухт. Її ріжуть на правильно-відрізних верстатах, зачищають кінці і місця зварювання. Готують також закладні вироби. Одним із способів зварюють арматурні сітки, каркаси для зв'язки цегляної кладки, а також для виготовлення бетонних виробів. У процесі монтажу залізобетонних виробів закладні вироби, перемички між плитами та інші деталі також зварюють.

Контактне зварювання часто застосовують для виготовлення арматури. *Точковим контактним зварюванням* виконують хрестоподібні з'єднання двох або трьох стрижнів (рис. 2.57) для виготовлення плоских і рулонних арматурних сіток і каркасів. Звичайно діаметр арматурних стрижнів і дроту становить від 3 до 40 мм. Для виконання великих обсягів робіт застосовують спеціальні багатоточкові зварювальні машини. Наприклад, для зварювання сіток і каркасів з арматурних стрижнів до 40 мм застосовують машину МТМ-35УХЛЧ.

Просторові арматурні каркаси складаються з плоских каркасів, з'єднаних за допомогою зварювання (рис. 2.58).

Контактне стикове зварювання застосовують переважно для з'єднання арматури встик за однакових і різних діаметрів стрижнів. Міцність стикових зварних з'єднань за дотримання режиму зварювання звичайно дорівнює міцності основного металу, однак за умови збереження відношень діаметрів стрижнів не вище від 1,25...1,5.

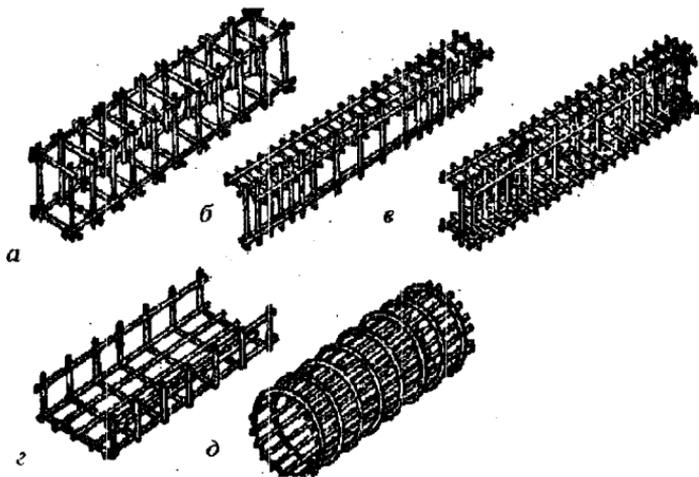


Рис. 2.58. Просторові арматурні вироби:
а - просторовий каркас; б і в - просторові каркаси таврового і двотаврового перерізів; г, д - гнута сітка

Застосовують безперервне і перервне оплавлення торців арматури. У першому випадку процес відбувається послідовно за безперервного нагрівання стику, подальшого стискування заготовок і їх охолодження. За перервного оплавлення стрижні багаторазово зближуються (від 3 до 20 разів) до легкого зіткнення, внаслідок чого вони розігріваються і безперервно оплавляються. При цьому застосовується менша щільність струму, що дає змогу за тієї потужності зварювати стрижні більшого діаметра, зменшувати величину оплавлення та запобігати гартуванню металу в зоні стику. Тривалість проходження струму за такого зварювання дорівнює від 1 до 20 с залежно від площі перерізу стрижня. Щільність струму за перервного оплавлення становить від 3 до 15 А/мм², а за безперервного оплавлення – від 10 до 50 А/мм². Тиск осаджування стрижнів становить для класу арматури А240 – 30...50 МПа, класів А300 і А400 – 60...80 МПа. Для швидкого нагрівання металу і зменшення теплових втрат застосовують великі струми (близько 50000 А). Жорсткі режими дають змогу скоротити час зварювання, натомість значно збільшується потрібна електрична потужність. Вони доцільні для зварювання низьковуглецевих сталей. Зварювання більш міцних сталей потребує м'якших режимів. За зовнішнім виглядом зварного з'єднання можна орієнтовно судити про ретельність дотримання режиму торцевого зварювання. На рис. 4.3 наведено зразки зварних з'єднань, виконаних за правильних і неправильних режимів зварювання.

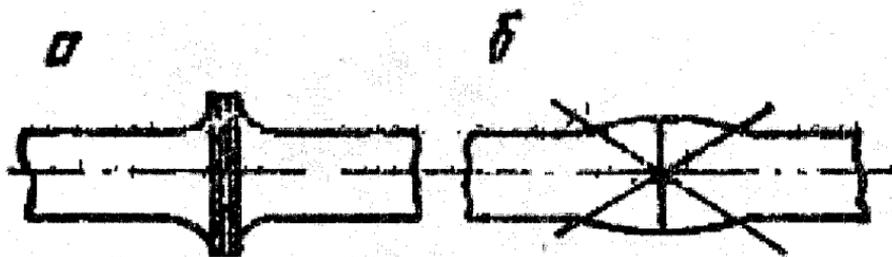


Рис. 2.59. Зовнішній вигляд стикових з'єднань арматури, виконаних контактним зварюванням за правильних (а) і неправильних (б) режимів зварювання.

За правильного режиму зварювання (рис. 2.59, а) деформація металу відбувається саме на кінці арматури завдяки тому, що ця її частина була оптимально прогріта. Такі умови сприяють пластичному

деформуванню, за якого відбувається ефективно подрібнення зерен, у результаті чого утворюється рівномірний зварний шов. У варіанті (рис. 2.59, б) відбувається перегрів металу внаслідок розтягування зони нагрітого металу. Крім того, в цих умовах деформація металу на межі стику відбувається не так ефективно, як у першому випадку, через це зерна металу подрібнюються меншою мірою, що погіршує міцність металу.

Контактним способом добре зварюється низьковуглецева сталь марки Ст.3, низьколегована сталь марки 25Г2С. Гірше зварюється середньовуглецева сталь періодичного профілю Ст.5, зварний шов якої характеризується високою міцністю, але може через крихкість руйнуватися. Для зменшення крихкості застосовують перервне оплавлення та інші методи, наприклад, термічну обробку, за якою після закінчення зварювання на тій же зварювальній машині нагрівають з'єднання до певної температури шляхом увімкнення електродів. Нерівномірний шов, схильний до крихкого руйнування, утворюється під час зварювання низьколегованих арматурних сталей класу А500. Термічно зміцнені арматурні сталі мало придатні для контактного зварювання.

Звичайно контактне зварювання виконують у стаціонарних умовах через масивність зварювального обладнання і потребу в застосуванні високих електричних потужностей. У зварювальних машинах застосовується ручне й автоматичне керування. В машинах з автоматичним керуванням підігрів стрижнів, їхнє зближення, ввімкнення струму, осаджування, видалення виробів виконуються автоматично. Машини часто застосовуються в напівавтоматичних та автоматичних лініях різання і зварювання арматурної сталі. Такі лінії характеризуються високою продуктивністю.

Для стикового зварювання використовують також машини для зварювання тертям. Процес зварювання на таких машинах механізовано. На машинах застосовуються датчики величини осадки стрижнів і реле часу. Принцип роботи машин для зварювання тертям полягає в нагріванні торців стрижнів і їх наступному стискуванні. Один стрижень закріплюють нерухомо, другий – у шпинделі, який швидко обертається. Після того як внаслідок тертя торці нагріються до оплавлення, обертання зупиняють і швидко виконують стискування. При цьому утворюється якісний зварний шов, який має однакову з основним металом міцність.

Для зварювання арматури застосовують також *електродугове зварювання*. На рис. 2.2 схематично показано типи зварних з'єднань,

для яких придатний цей вид зварювання. Але електродугове зварювання менш економічно вигідне і якість зварних з'єднань недостатньо висока, тому його виконують лише у випадках, коли нема можливості застосувати контактне зварювання.

Під час дугового зварювання стрижні з'єднують із застосуванням допоміжних елементів: косинок, накладок тощо. При цьому один зварювальний дріт приєднують до арматури, другий – до електродотримача. Зварюють за допомогою постійного або змінного струму. Якість зварних швів залежить від електродів, що застосовуються. Електрод вибирають відповідно до класу сталі (А240, А300, А400, А500), способів зварювання (ванна або багат шарові шви, короткі або довгі шви, прихватами тощо) і типів з'єднання (хрестоподібні, стикові, таврові, внапуск).

Електродуговим точковим способом зварюють стрижні діаметром до 20 мм зі сталі різних марок. Використовують електроди з якісним покриттям або пістолети-напававтомати, які виконують зварювання точки під шаром флюсу. При цьому накладання точки виконується в нижньому положенні.

Зварювання повздовжніми швами виконують різними способами – ручним дуговим, напівавтоматичними (МІГ/МАГ, ТІГ), автоматичним під шаром флюсу із застосуванням накладок. Дуговим зварюванням з'єднують стрижні великого діаметра до 80 мм, якщо вони виготовлені з низьковуглецевих сталей. Стрижні з низьколегованих сталей, що з'єднуються цим способом, мусять мати менший діаметр. Зварювання виконують у нижньому і вертикальному положеннях.

Ваний спосіб зварювання застосовують для виконання стикових з'єднань стрижнів середнього і великого діаметрів у вертикальному і нижньому положеннях. На рис. 2.57 наведено схему горизонтального розміщення стрижнів і скоби-накладки, яку можна виготовляти зі сталі, міді або графіту для ванного способу зварювання. Мідні або графітові скоби-накладки використовують багаторазово, а сталеві – одноразові, вони залишаються після зварювання разом з виробом. У разі застосування ручного дугового зварювання зі сталевими скобами дугу збуджують між торцем одного зі стержнів і скобою. Зварювання виконують короткою дугою електродом із діаметром 5...8 мм, застосовуючи зварювальний струм у межах 250...550А. Ванне напівавтоматичне зварювання під шаром флюсу виконують за допомогою низьковуглецевого зварювального дроту, який безперервно подається в зону горіння дуги за допомогою механізму подавання, із застосуванням мідних або графітових форм. Для підтримання

оптимальної глибини шлакової ванни (15...20 мм) періодично порціями додають флюс. Для напівавтоматичного ванного зварювання як присаджувальний матеріал використовують також порошковий зварювальний дріт, наприклад ПП-АН19Н. Розплавлення торців стрижнів арматури за цим методом здійснюється завдяки теплу ванни розплавленого металу, яка формується й утримується багаторазовими мідними, графітовими або одноразовими інвентарними (керамічними) формами. Одноразові інвентарні форми залишаються і під час роботи конструкції сприймають частину її навантаження.

2.12.7. Особливості зварювання алюмінієвих сплавів

Для зварювання алюмінію і його сплавів застосовують практично всі промислові способи з'єднання, серед яких найбільш поширеними є сучасні дугові, плазмові, автоматичні, механізовані, в захисних газах тощо. Автоматичне зварювання під шаром флюсу і газове зварювання застосовують дуже рідко.

Основною особливістю зварювання алюмінієвих сплавів є необхідність видалення оксидної плівки з поверхні виробу. Така потреба пов'язана з тим, що на повітрі або в інших умовах, коли наявним є кисень, алюміній ($T_{пл} = 650^{\circ}\text{C}$) дуже швидко окислюється і покривається тугоплавкою плівкою оксиду алюмінію Al_2O_3 з температурою плавлення 2050°C . Це утруднює плавлення крайок металу і призводить до забруднення металу шва частинками оксиду алюмінію. Для зменшення впливу оксиду алюмінію на процес зварювання безпосередньо перед зварюванням слід ретельно очищувати місце майбутнього зварного шва. Алюмінієвий зварювальний дріт слід використовувати своєчасно. Зберігання його після відкриття улаковки на повітрі повинно бути короткочасним, тому що швидке окислення поверхні призводить до погіршення якості зварювання. Для руйнування оксидної плівки застосовують спеціальні зварювальні флюси або зварювання виконують в атмосфері інертних захисних газів. Оксидний шар руйнується також під час зварювання на постійному струмі зворотної полярності або зварювання на змінному струмі завдяки катодному розпиленню.

Крім того, треба мати на увазі інші властивості алюмінію. Через те що алюміній має високу теплопровідність, небажаним є збільшення швидкості зварювання, внаслідок чого зменшується глибина провару. Висока теплопровідність прискорює кристалізацію металу зварної ванни, що утруднює газовиділення й призводить до утворення пор. Для

ліпшого видалення газу збільшують силу струму, виконують попередній і супутній підігрів, а також використовують захисні гази (бажано гелій або суміш аргону з гелієм). Для поліпшення процесу зварювання алюмінію застосовують сучасне обладнання, наприклад, імпульсно-дугові апарати, обладнані спеціальною програмою для зварювання алюмінію. Перед їхнім застосуванням оператор визначає тільки силу струму. Налаштування решти параметрів виконується автоматично мікропроцесором.

Крім дугових способів, застосовують також зварювання тисненням. Останнім часом поширюється зварювання тертям із перемішуванням для з'єднання алюмінієвих листових заготовок, описане у попередньому розділі. Завдяки унеможливленню виникнення тріщин, пористості, зменшення деформації, а також уникненню зміни складу металу зварного шва й утворенню більш дрібної структури цей спосіб забезпечує високу якість зварних з'єднань, а завдяки легкості механізації процесу досягається висока продуктивність.

2.12.8. Особливості зварювання мідних сплавів

Мідні сплави поділені на латуні (сплави міді з цинком), бронзи (сплави міді з легуючими домішками крім цинку) і мідно-нікелеві сплави. Всі ці групи мають спільні риси, а також особливості зварювання.

На зварювання міді та її сплавів впливають їх властивості. Низька температура плавлення (1083°C) та висока теплопровідність зумовлюють велику швидкість охолодження зварювальної ванни, що призводить до росту зерна, утруднення виходу газів і погіршення якості шва. Заради уникнення цих небажаних явищ зварювання виконують, використовуючи збільшені погонні енергії шляхом підвищення сили струму. Високий коефіцієнт термічного розширення й значна усадка спричиняють виникнення великих остаточних напружень та деформацій. Інтенсивне випаровування цинку призводить до появи пор у шві. Легка окислюваність міді за високих температур зумовлює утворення тугоплавких оксидів. За наявності в мідному сплаві водню і закису міді Cu_2O відбувається хімічна реакція $\text{Cu}_2\text{O} + \text{H}_2 = \text{H}_2\text{O} + 2\text{Cu}$. Пари води, які з'явилися внаслідок цієї реакції в нагрітому металі, скупчуються й утворюють тиск, через що виникають тріщини. Це явище має назву "воднева хвороба".

Застосовують дугове (ММА, МІГ/МАГ, ТІГ), автоматичне під флюсом, газове і контактне зварювання.

Підготовчий етап полягає в ретельному очищенні крайків металу і

зварювального дроту безпосередньо перед зварюванням. Зазор між зварюваними поверхнями не повинен перевищувати 2 мм.

За дугового зварювання в середовищі захисних газів застосовують азот, аргон або гелій, а також їх суміші. Найефективнішим є зварювання в середовищі азоту. Зварювання електродом, що не плавиться, виконують графітовим або вольфрамовим електродом (ТІГ) за щільності постійного струму прямої полярності $200 \dots 400 \text{ А/см}^2$. Метал перед зварюванням для відвернення водневої хвороби підігрівають - мідь до температури $250 \dots 300^\circ \text{ С}$, латунь - $300 \dots 350^\circ \text{ С}$, бронзу - $500 \dots 600^\circ \text{ С}$. На рис. 2.60 наведено схему взаємного розміщення пальника, присадного дроту на мідній основі і зварювального дроту під час застосування методу ТІГ. Електрод розміщують під кутом $75 \dots 90^\circ$ до зварюваного виробу, виліт електрода становить $3 \dots 5 \text{ мм}$, довжина зварювальної дуги - $1,5 \dots 3 \text{ мм}$.

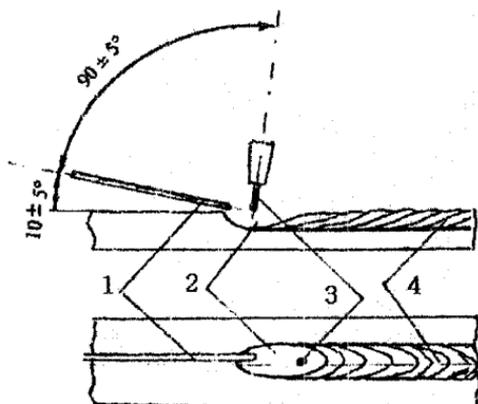


Рис. 2.60. Взаємне розміщення присадного дроту (1), зварювальної ванни (2) і пальника з електродом (3) під час застосування методу ТІГ, 4 - наплавлений метал

Автоматичне зварювання під шаром флюсу мідним дротом виконують на постійному струмі зворотної полярності, застосовуючи флюси марок ЖМ-1, АН-М1. Для газового зварювання латуней використовують окислювальне полум'я (з метою зменшення випаровування цинку), для зварюванні бронз - відновне полум'я (з метою зменшення вигорання легуючих елементів: олова, алюмінію, кремнію).

2.12.9. Особливості зварювання титанових сплавів

За низької щільності ($4,51 \text{ г/см}^3$) сплави титану характеризуються високою межею міцності (до 1250 МПа) і температурою плавлення (титану – 1668°C). Вони корозійно стійкі до температури 500°C . Але за вищих, ніж 500°C , температур титанові сплави стають хімічно дуже активними. За цих температур титан горить у кисневому середовищі, бурхливо реагує з азотом, окислюється водяним паром, вуглекислим газом, розчинює водень. Теплопровідність титану вдвічі нижча, ніж вуглецевих сталей. Тому зварювання титану, незважаючи на високу температуру плавлення, потребує меншої кількості тепла. Титанові сплави можуть мати α - або β -кристалічні ґратки (α -титан має гексагональну кристалічну ґратку, β -титан – об'ємно-центровану кристалічну ґратку). α -титанові сплави (наприклад, BT1, BT5-1) не зміцнюються термічною обробкою, добре зварюються, β -титанові сплави (наприклад, BT15, BT22) термічно зміцнюються, зварюються гірше, схильні до росту зерна і холодних тріщин.

Титанові сплави зварюють дуговим способом у середовищі інертних газів електродом, що плавиться, або електродом, що не плавиться (метод TIG), дуговим зварюванням під шаром флюсу, електронним променем, електрошлаковим та контактним способами. Розплавлений метал є рідкоплинним, добре формується за всіх способів зварювання. Основною трудностю зварювання титану є необхідність захищати метал від повітря за температур, вищих від 500°C . Для захисту його від повітря за дугових способів зварювання звичайно застосовують аргон або його суміш із гелієм, які для збільшення зони захисту подають у зону зварювання за допомогою пальників з насадками. На зворотному боці стику деталей установлюють мідні планки з канавками для подавання аргону. Застосовують також камери, які наповнюють аргоном. Тоді зварювання виконують робітники в скафандрах або роботи. Перед зварюванням крайки металу ретельно зачищають, а зварювальний дріт відпалюють у вакуумі за температури $900\dots 1000^\circ\text{C}$ для усунення з його поверхні оксидів титану.

Для зварювання під шаром флюсу застосовують безкисневі флюси марок АНТ1, АНТ3, АНТ7 й електродний дріт діаметром $2,5\dots 5 \text{ мм}$ з вильотом електрода $14\dots 22 \text{ мм}$. Структура отриманого металу більш дрібнозерниста, ніж у випадку зварювання в інертних газах.

Для електрошлакового зварювання застосовують електроди з того самого металу, що й у зварюваного металу, фторидні флюси АНТ2, АНТ4, АНТ6. Зварні з'єднання мають крупнокристалічну структуру, але їх властивості близькі до властивостей основного металу.

За електронно-променевого зварювання титанових сплавів досягається надійніший захист металу від газів і дрібнозерниста структура шва.

За всіх засобів зварювання титанових сплавів не можна допускати перегріву металу. Для подрібнення структури застосовують електромагнітний вплив, ультразвук, імпульсний цикл дугового зварювання тощо. Це дає змогу досягати добрих властивостей зварних з'єднань.

2.12.10. Особливості зварювання полімерів

Зварюванням отримують нероз'ємні з'єднання деталей з однорідних полімерів за рахунок взаємного проникнення (дифузії) частинок поверхневих шарів в розплавленому стані при певному тиску притиску. Існуючі методи зварювання пластмас можна умовно розділити на 3 групи: 1) зварювання за допомогою зовнішніх джерел теплоти (нагріти газ, інструмент, присаджувальний матеріал, тертя), 2) зварювання за допомогою внутрішніх джерел теплоти (струми високої частоти, ультразвук) і 3) хімічне зварювання. Перші дві групи використовують для з'єднання термопластичних матеріалів. Хімічне зварювання є одним з перспективних методів зварювання термореактивних пластмас на основі фенолоформальдегідних, кремнійорганічних, епоксидних і ненасичених поліефірних смол. Промислове застосування отримали наступні способи зварювання: гарячим газом, контактним нагріванням, тертям, високочастотне і ультразвукове. Вибір способу зварювання обумовлюється природою матеріалу, конструкцією деталей, що з'єднуються, вимогами до зварного з'єднання, умовами роботи виробу, а також необхідною продуктивністю. Зварювання гарячим газом проводиться спеціальними пальниками за допомогою присадного прутка і без нього. Суть методу полягає в тому, що поверхня термопласта, що зварюється, і присадний прутки нагріваються гарячим газом (повітрям, азотом, аргоном) і розм'якшуються настільки, що при невеликому тиску відбувається з'єднання зварювальних елементів. При зварюванні полімерів газовими теплоносіями із застосуванням матеріалу, що присаджується, найбільш раціональними є стикові з'єднання всіх видів - кутові, таврові, торцеві і шви внапусток. При зварюванні встик листів товщиною 2-6 мм виконують V- і X-подібне оброблення крайок. Кут оброблення крайок 55-60 °. При великих товщинах рекомендується збільшення його до 70-90 °. Шви внапусток при зварюванні нагрітим газом застосовуються рідко, так як міцність таких з'єднань при розтягувальних і згинальних навантаженнях майже в

5 разів менша міцності стикових. Зварювання виробів з присадним прутком при нагріванні газовими теплоносіями має низку недоліків, головними з яких є низькі міцність і пластичність зварного шва. Цей метод часто застосовують при виготовленні футеровок електролізних і травильних ванн. Зварювання гарячим газом без присадного матеріалу дає можливість значно підвищити міцність з'єднання в порівнянні з міцністю, що досягається при зварюванні з присадним матеріалом.

Для того, щоб виріб мав однакову товщину у всіх перетинах, кромки листів перед зварюванням зрізають під кутом 20° , потім складають по крайках, які рівномірно нагрівають підігрітим повітрям. Кут нахилу наконечника пальника до поверхні зварного шва вибирають залежно від товщини матеріалу. При товщині листа до 5 мм він дорівнює $20-25^\circ$, а для зварювання листів товщиною 10-20 мм - $30-45^\circ$. Зварювання нагрітим інструментом - найбільш універсальний метод з'єднання виробів із полімерних матеріалів. Метод полягає в тому, що виріб, що зварюється, стикаючись зі спеціальним нагрітим інструментом, розігрівається в місцях з'єднання і спресовується найчастіше під тиском того ж інструмента. При зварюванні тертям для нагріву матеріалу використовують теплоту, одержувану в процесі тертя поверхонь, що зварюються при додатку тиску. Режим процесу підбирають так, щоб протягом декількох секунд кінці деталей нагрілися до температури переходу полімеру у в'язкотекучий стан, при якому можливе зварювання. У цей момент рух деталей припиняється і під дією осьового тиску вони міцно з'єднуються. Процес зварювання закінчується природним охолодженням виробу, стисненого осьовим зусиллям. Цим методом у виробництві можна приварювати горловину до ємностей із термопластів. Недоліком методу є обмеженість конфігурації виробів, що зварюються. При зварюванні струмами високої частоти деталі нагріваються у високочастотному електричному полі до пластичного стану з одночасним здавлюванням. Нагрівання відбувається рівномірно по всій масі матеріалу, що розміщується між електродами. Спосіб заснований на принципі перетворення електроенергії, отриманої від високочастотного генератора, в теплову. Цим методом в даний час зварюються матеріали товщиною до 5 мм.

Ультразвукове зварювання належить до найбільш перспективних способів з'єднання пластмас в автомобілебудуванні. Під впливом ультразвукових коливань більше 20 кГц в деталях, що зварюються, виникають механічні високочастотні коливання, які перетворюються в теплову енергію, що йде на створення шва між зварними поверхнями. Можна зварювати ультразвуком матеріали, товщина яких становить

від 0,1 до 10 мм. Можна застосовувати цей метод також при зварюванні еластичних полімерів невеликої товщини 0,05-1,5 мм. Хімічне зварювання застосовується для термореактивних полімерних матеріалів, як правило, з наповнювачем у вигляді скляних волокон. Цей метод заснований на тому, що поверхня плівки термореактивної смоли має хімічно активні функціональні групи, які можуть вступати в реакцію і утворювати хімічні зв'язки. До здійснення зварювання необхідно здійснювати тісний контакт між сполучними поверхнями. Іноді для прискорення процесу і підвищення надійності з'єднання на поверхню наносять присадки. При зварюванні фенольних склопластиків типу АГ-У, ДСВ застосовують плівку на основі сполучного БФ-4. Питомий тиск зварювання для фенольних склопластиків становить 4-5 МПа. Якщо в даний час застосування зварювання пластмас як технологічного процесу для з'єднань автомобільних вузлів застосовується рідко, то при створенні великогабаритних конструкцій з полімерів, таких як панелі приладів, паливні баки, воно може набути значного поширення.

Контрольні запитання для самостійної підготовки

1. Якими є особливості зварювання низьковуглецевих сталей?
2. У чому полягають особливості зварювання низьколегованих будівельних сталей?
3. Які засоби слід застосовувати для покращення зварності середньо- і високовуглецевих сталей?
4. Які з хромистих і хромомангановистих сталей зварюються добре, а які погано?
5. Якого класу міцності арматурні сталі рекомендовані до зварювання?
6. Які способи зварювання застосовують для з'єднання арматури?
7. Які труднощі виникають під час зварювання алюмінієвих, мідних, титанових сплавів?
8. Які способи зварювання застосовують для з'єднання полімерів?

2.13. ТЕРМІЧНЕ РІЗАННЯ МЕТАЛІВ

Термічним різанням називають спосіб розділення металу шляхом нагрівання лінії розділу джерелом тепла до температур, що перевищують температуру плавлення або згоряння, і видалення

продуктів розплавлення або згоряння. Різання, що виконується на всю товщину металу, називається *роздільним різанням*, а коли ріжеться лише частина товщини металу – *поверхневою строжкою* (рис. 2.61). Розрізняють електродугове, кисневе, плазмове і лазерне різання металів.

Електродугове різання металів виконують вугільними, графітовими або металевими електродами. Воно дає змогу розділяти заготовки на частини шляхом виплавлення металу. Застосовують металеві електроди, які покривають спеціальною товстою обмазкою. Глибина різання сталі сягає 15 мм. Дугове різання виконують постійним або змінним струмом. За дугового різання сила струму повинна перевищувати силу струму зварювання не менше, ніж у 1,2 рази. Різання вугільними або графітовими електродами здійснюють постійним струмом на прямій полярності, тому що за такого режиму якість різання вища, ніж за різання змінним струмом.

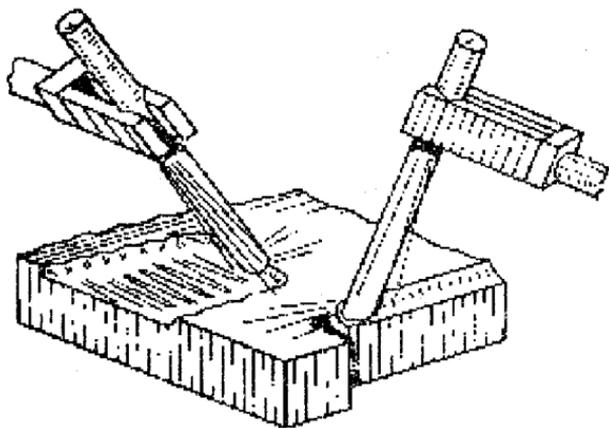


Рис. 2.61. Поверхнева строжка металів

Застосовують також повітряно-дугове різання графітовим електродом постійним струмом із подаванням повітря під тиском 0,4 МПа крізь спеціальний електродотримач. У конструкції цього електродотримача передбачено пристрій, що спрямовує струмінь стиснутого повітря у зварювальну ванну, завдяки чому відбувається часткове згоряння, а також видування розплавленого металу. Застосовують електроди діаметром 6 - 12 мм. Повітряно-дугове різання використовують для різання високолегованих сталей, чавуну й кольорових металів. Цей спосіб дає змогу підвищити продуктивність та

якість різання. Ще кращі показники різання металів досягаються, коли замість повітря використовується кисень. Часто повітряно-дугове різання застосовують для усунення макродефектів із поверхонь деталей. Цей процес називають повітряно-дуговою строжкою. Коли замість повітря застосовують кисень, процес різання називають киснево-дуговим різанням, а процес строжки - киснево-дуговою строжкою.

Електродугове різання застосовують поки що обмежено, оскільки утруднено видалення розплавленого металу з порожнини різа, а утворена поверхня є нерівною, оплавленою і забрудненою шлаковими й газовими включеннями.

Газове різання базується на властивості металів і сплавів згорати в струмені кисню з виділенням значної кількості тепла. Кисневе різання застосовують до металів, які мають температуру займання (інтенсивного окислення), нижчу за температуру плавлення, тобто коли метал горить у твердому нерозплавленому стані. Крім того, температура плавлення оксидів металів, що виділяються під час різання, повинна бути нижчою за температуру плавлення самого металу, що сприяє легкому видуванню оксидів із зони різання. Бажано також, щоб метал мав невисоку теплопровідність. Такі властивості у заліза, сталі із умістом вуглецю до 0,7% та низьколеговані конструкційні сталі. Чавун, алюміній, мідь і їх сплави, а також високовуглецеві, хромові сталі безпосередньо струменем кисню не ріжуть.

Залізо й сталь ріжуть спеціальними різальними пальниками – різачками (рис. 2.62), які відрізняються від зварювальних пальників наявністю каналу для проходження кисню. По кільцеподібному каналу мундштука 1 проходить горюча суміш, яка згорає, утворюючи полум'я, потрібне для підігрівання металу до температури горіння. Коли метал розігрівається до температури інтенсивного окислення (для сталі це інтервал температур 1050...1150 °С), через канал 2, який проходить центральною частиною мундштука 1, пропускають струмінь кисню за допомогою вентиля 3. Кисень спалює метал і видуває окисли (шлак). Схема процесу роздільного кисневого різання показана на рис. 2.63.

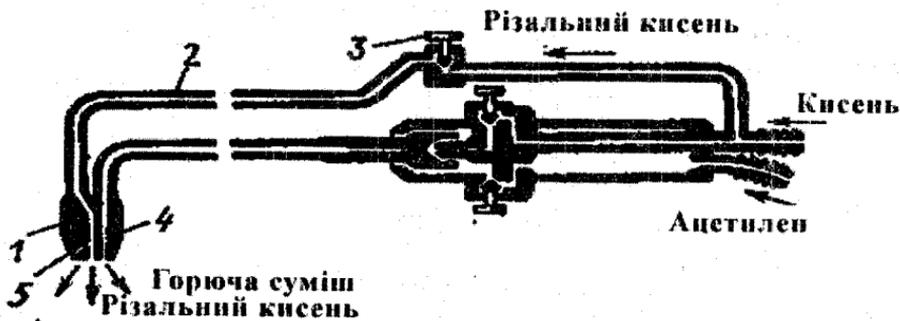


Рис. 2.62. Схема газокисневого різака:

- 1 – мундштук; 2 – трубка для подавання різального кисню; 3 –
 вентиль; 4 – канал для газокисневої суміші;
 5 – канал для кисню, що різє метал

На поверхні розрізаного металу залишаються характерні лінії запізнення, які являють собою виступи і западини, глибина яких становить десятки частки міліметра.

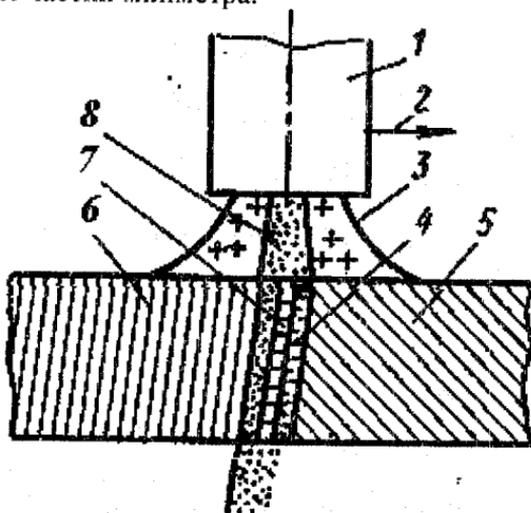


Рис. 2.63. Схема процесу роздільного кисневого різання:

- 1 – мундштук; 2 – напрям різання; 3 – полум'я для підігріву;
 4 – рідкий метал; 5 – метал, який різуть, 6 – лінії запізнення; 7 – шар
 оксидів; 8 – струмінь кисню

Кисневе різання придатне для деталей великої товщини – до 300 мм.

Крім ацетилену, застосовують водень або пари бензину і гасу. Кисневе різання легко автоматизується. Пристрої для термічного різання з ЧПУ портальної конструкції виготовляють завод "Електромаш" (Харків), ОАО "ЗОНТ" (Одеса) та інші. Керування пристроями відбувається безпосередньо з персонального комп'ютера за наперед розробленими програмами. Площа поверхні стола для різання металевих листів може сягати декількох квадратних метрів. Ці пристрої для автоматичного різання можна застосовувати також для різання плазмою або лазером. Для цього треба замінити газовий різак на плазмотрон або лазерний пальник.

Для різання високолегованих сталей, чавуну, кольорових металів, газове різання яких неможливе або утруднено, може застосовуватись киснево-флюсове різання, для цього у зону різання подають порошок заліза і шлакоутворювальні компоненти. Залізо згоряє і дає високу температуру, а шлак розчиняє оксиди.

Плазмове різання металів. Носієм теплової енергії в плазмовому різанні є плазма, що утворюється внаслідок пропускання під тиском аргону, азоту, повітря та інших газів і їх сумішей крізь дуговий розряд. Для різання вуглецевих і низьколегованих сталей як газоутворювальний газ звичайно застосовують стиснене повітря. Завдяки цьому плазмове різання стає більш безпечним, тому що не потребує застосування балонів із різними газами. Плазмовий струмінь має температуру до 30 000 °С. Для плазмового різання зазвичай використовують різні плазмові пальники, частіше – із залежною дугою, схема якої показана на рис. 2.64. За цією схемою дуга утворюється між вольфрамовим електродом і металом, який ріжуть. На виході із сопла пальника утворюється гостре полум'я. Є також конструкції пальників із незалежною дугою, коли дуга утворюється між вольфрамовим електродом і мідним водоохолоджувальним мундштуком. Такі пальники можна застосовувати для різання матеріалів, що не проводять електричного струму.

Плазмове різання завдяки перевагам широко застосовується в різних галузях виробництва, зокрема в будівництві. Плазмове різання якісніше і продуктивніше, ніж газове. Завдяки дуже високій температурі плазми різання відбувається з великою швидкістю. Наприклад, швидкість різання низьковуглецевої сталі завтовшки 6 мм становить 3,8 м/хв. Розрізають як товсті листи (наприклад, алюмінієві до 100 мм), так і дуже тонкі.

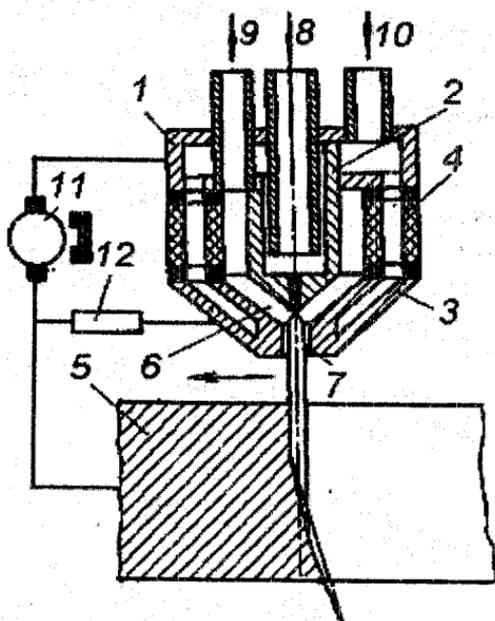


Рис. 2.64. Плазмотрон для різання металів:

- 1 – корпус; 2 – електрод вольфрамовий; 3 – наконечник, що формує струмінь; 4 – ізолятор; 5 – метал, який різуть;
 6 – дугова камера; 7 – стовп дуги; 8 – вода, що охолоджує;
 9 – робочий газ; 10 – відвід води; 11 – джерело струму;
 12 – пристрій для запалення дуги

Плазмове різання дає змогу отримувати поверхню різання з меншою шорсткістю, з меншою кількістю шлаку і грата, а також точні розміри. Цим способом, крім вуглецевих сталей, можна різати будь-які матеріали – алюміній і його сплави, мідь, латунь, нержавіючі та інші високолеговані сталі, чавуни, тугоплавкі метали, неметалеві матеріали тощо. При цьому утворюється вузький шов (різ) з невеликою зоною термічного впливу.

Лазерне різання. Відомо, що лазери можуть бути твердотільними (наприклад, рубіновими) і газовими. Останні більш економічно вигідні та дають можливість генерувати більшу енергію променя. З огляду на це для різання різних матеріалів використовують саме їх. Важливим фактором у роботі газових лазерів є чистота газів і система подавання чітко визначеної їх кількості та з належним тиском. Залежно від типу обладнання як лазерний газ використовують чистий вуглекислий газ

(чистота 99,995%), а також його суміші з газами високої чистоти: азотом, гелієм, іноді додають ще CO, H₂, O₂ та інші. Видатковими матеріалами для виконання лазерного різання і зварювання є лінзи, кремнієві дзеркала із золотим покриттям, сопла для різальної головки, які часто треба замінювати.

Швидкість різання залежить від товщини металу. Наприклад, для листа сталі 08 кп товщиною 0,5 мм швидкість різання становить 5 м/хв, а якщо товщина листа сягає 5 мм, то - 0,6 м/хв. Крім високої швидкості, лазерне різання дає змогу отримувати гладку поверхню і високу точність. За допомогою лазерів можна отримати фокальну пляму діаметром 0,1 мм та завдяки цьому – потужність випромінювання у фокусі до 5 МВт/см². Це значення в кілька разів перевищує поріг для випаровування сталей, який становить 1 МВт/см². Завдяки тому, що лазерне різання відбувається за великої швидкості і товщина шва невелика, біля поверхні різання утворюється дуже мала зона термічного впливу. Це позитивно впливає на якість заготовок, тому що зміна структури в металі внаслідок термічного впливу майже завжди погіршує його властивості.

Лазерні пристрої виготовляються різними фірмами. Наприклад, фірмою MultiCam створено високоточні координатні лазерні верстати для розкрюваних листових вуглецевих і легованих сталей, деревини, фанери, гуми, шкіри, пластиків. Звичайно їх потужність становить від 100 до 400 Вт, габаритні розміри – від 638 x 160 x 142 до 1359 x 386 x 185 мм. Лазери застосовують також для утворення мікроскопічних і великих отворів.

Контрольні запитання для самостійної підготовки

1. Які є види термічного різання металів?
2. Які недоліки і переваги має кожний вид термічного різання металів?
3. Яка фізична сутність газового різання? Для різання яких металів можна застосовувати струмінь кисню?
4. На якому явищі засновано процес плазмового різання? Які переваги він має перед газовим різанням?
5. На якому явищі засновано процес лазерного різання? В яких випадках його можна застосовувати у будівництві?

2.14. Робототехнологічні комплекси для зварювальних робіт при виробництві автомобілів

Зварювальні роботи при виробництві автомобілів проводяться на робото-технологічних комплексах, для яких характерними рисами є: якість, точність, потужність. На Запорізькому автомобілебудівному заводі зварювання кузовів ведеться на лініях, оснащених унікальним обладнанням (рис.2.65).

За якість цих процесів відповідає система управління якістю, яка відповідає міжнародному стандарту ISO 9001: 2000. До складу зварювального виробництва входять гнучкі автоматичні лінії виробництва фірм «Камау» (Італія), «Кука» (Німеччина) - понад 150 роботів фірми «Кука», системи управління «Texas-500» і «Alen-Bredley» (США), « Simatik-110 » (« Сіменс », Німеччина). Продукція виготовляється робото-технологічними комплексами (Рис. 2.66, 2.67) Максимальна механізація й автоматизація зварювального виробництва дозволяє при невеликих трудовитратах не тільки забезпечувати якість відповідно до найжорсткіших вимог, а й контролювати його сучасними засобами діагностики.

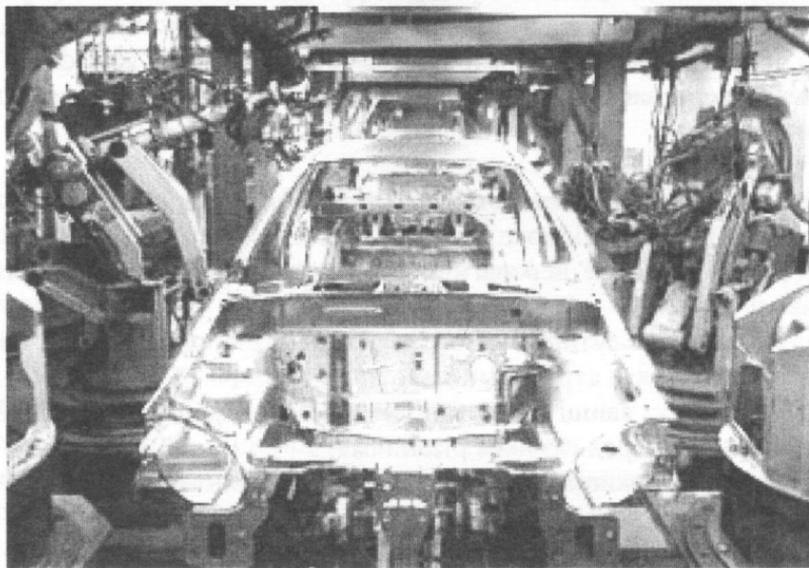


Рис. 2.65. Лінія зварювання кузовів на робото-технологічних комплексах (ЗАЗ).

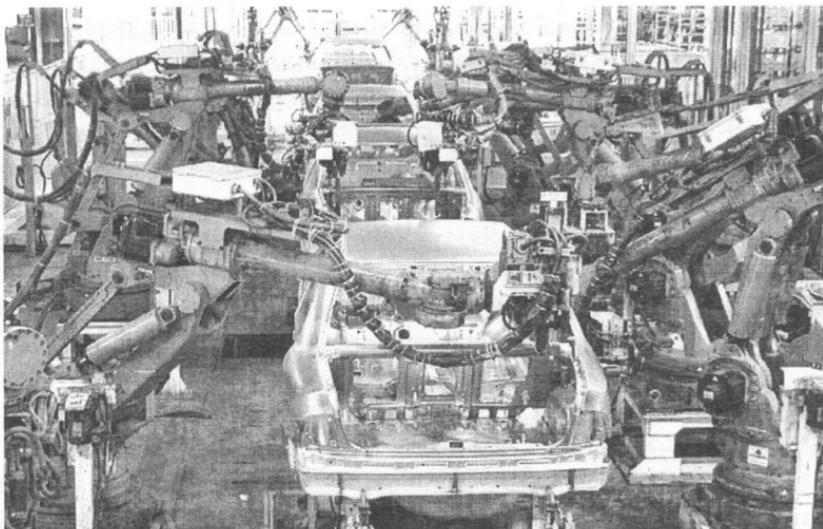


Рис. 2.66. Робото-технологічні лінії збирання-зварювання кузовів автомобілів BMW

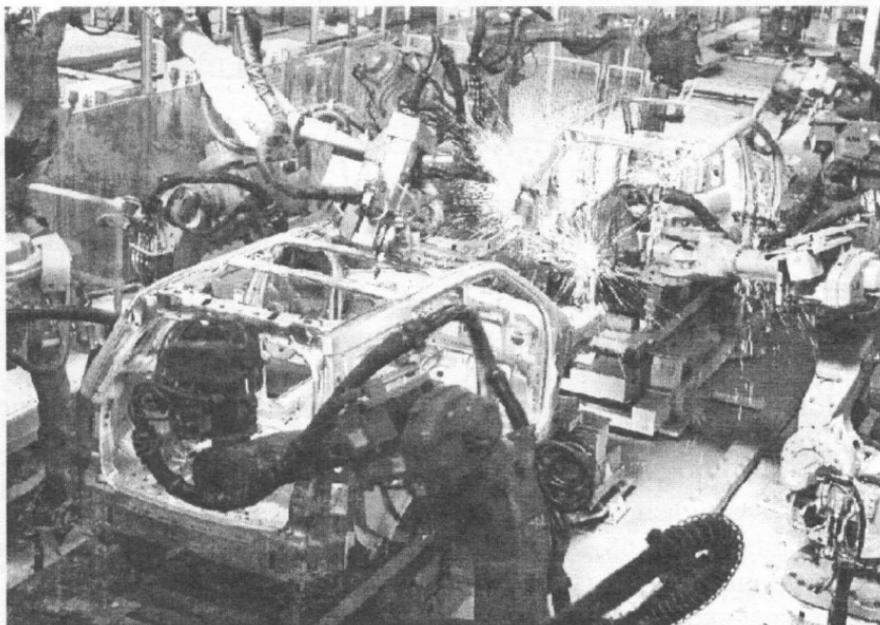


Рис. 2.67. Зварювання та збирання кузовів автомобілів на робото-технологічних лініях (General Motors)

Рівень якості зварених кузовів визначається в лабораторії геометрії кузова із застосуванням сучасного обладнання, що відповідає світовим стандартам. Таким стандартам відповідає координатно-вимірювальна машина PRO Compact, що встановлена в лабораторії. Вона багатопрофільна, виконує вимірювальні функції, сканує поверхні і за допомогою програмного забезпечення перетворює їх у поверхні тривимірного зображення. Якість зварних з'єднань контролюється руйнівним та неруйнівним методом. Якість лицьової поверхні і відповідність зазорів навісних вузлів контролюється на 100% у кузовів, які виготовляються. Продуктивність становить 22 вузли на годину.

2.15. Дефекти і контроль за якістю зварних з'єднань

Структура і її дефекти визначають властивості зварних з'єднань. Характеристики дефектів наведено в ДСТУ 3491-96 (ГОСТ 30242-97). На рис. 2.68 схематично показано види найпоширеніших дефектів, які виникають під час зварювання.

Дефекти можуть бути явними, прихованими, виправними і не виправними. До них належать такі дефекти:

- Напливи (рис. 2.68, а) знижують міцність, можуть бути концентраторами напружень і причиною утворення тріщин.

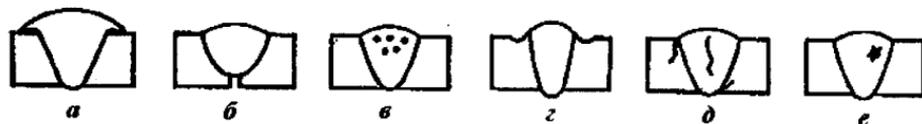


Рис. 2.68. Види дефектів зварних з'єднань: а - наплив; б – непровар; в – пори; г – підрізи; д – тріщини; е – вкраплення.

- Непровари (рис. 2.68, б) - утворюють напруження і знижують міцність шва.

- Пори (рис. 2.68, в) знижують міцність металу і герметичність з'єднання.

- Підрізи (рис. 2.68, г), зменшують переріз шва і можуть бути концентраторами напруження і причиною утворення тріщин.

- Тріщини (рис. 2.68, д), (мікро-і макротріщини) знижують механічні властивості шва.

- Шлакові вкраплення (рис. 2.68, е) знижують механічні властивості виробу.

- Дефект форми шва, який характеризується зменшенням перерізу або підсиленням шва.

- Незаварені кратери, які можуть бути концентраторами напруження і причиною утворення тріщин.

- Пропали, що звичайно виникають під час зварювання тонкого металу.

Крім згаданих дефектів, можуть бути бризки, свищі, ввігнутість кореня, короблення деталі тощо.

На рис. 2.69 наведено приклади стикових швів без дефектів і таких, що мають найбільш поширені дефекти: непровар (рис. 2.69, б і з) і пропал (рис. 2.69, д). Виникнення цих дефектів найчастіше зумовлює форма перерізу шва, яка характеризується розмірами b і h або коефіцієнтом форми $c = b/h$. Для утворення бездефектного шва треба, щоб перекриття шва p під час зварювання в захисних газах становило 1,5...2 мм, а за автоматичного зварювання під флюсом – 3...4 мм.

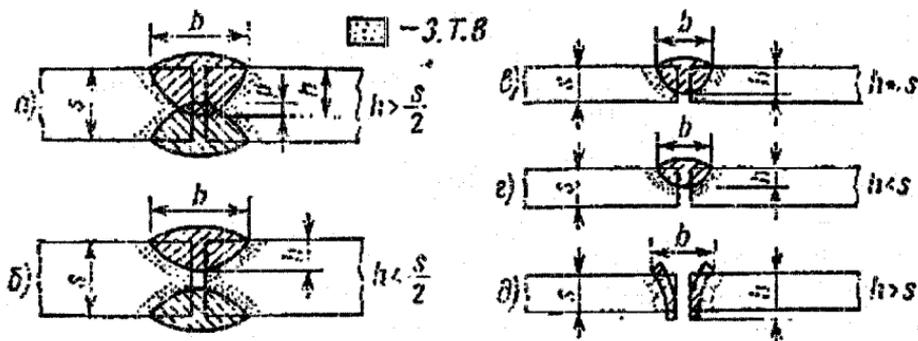


Рис. 2.69. Стикове з'єднання: а і б – двобічний шов відповідно без дефекту і з дефектом (непроваром); в – односторонній шов без дефекту; г і д – однібічні шви з непроваром і пропалом

Причинами виникнення дефектів є низька якість зварювальних матеріалів, неправильне складання і підготовка стиків, порушення технології зварювання, низька кваліфікація робітника тощо. Для їх усунення виконують попередній і поопераційний контроль матеріалів і технологічного процесу.

Контроль якості зварних швів здійснюється за стандартом ДСТУ 3021-95, ДСТУ ISO 17635:2015, в якому зазначено методи контролю залежно від виду і розміру дефектів, їх розміщення, товщини металу, а також способів зварювання. Для контролю якості зварних з'єднань під час монтажу залізобетонних конструкцій застосовують ДСТУ Б EN 1090-2-201X, в якому наведено допустимі значення параметрів зовнішніх і внутрішніх

дефектів в арматурних виробках та закладних деталях, а також методики випробування.

Застосовують дві групи способів контролю зварних з'єднань: руйнівний і неруйнівний.

Руйнівні випробування виконують на зразках, на моделях, а іноді на самих деталях. Механічні властивості зварних з'єднань на розтягання, згинання, ударну в'язкість та ін. визначають на спеціальних зразках. На зразках виконують також металографічні дослідження шляхом мікро- і макроаналізу, завдяки яким виявляють будову шва й зони термічного впливу, а також мікро- і макродефекти. Перевіряють також твердість зварного з'єднання.

Неруйнівні випробування зварних з'єднань виконують звичайно на виробках. Застосовують такі основні методи контролю.

- *Візуально-оптичний*, коли під час зовнішнього огляду виявляють форми і розміри шва, зовнішні вади зварного з'єднання: підрізи, непроварені частини, пропали, тріщини, раковини і т.п. Дрібні тріщини виявляють за допомогою лупи за збільшенням у 8-10 раз;

- *Контроль проникності зварних з'єднань* виконують після зовнішнього огляду і застосовують для проміжного контролю і контролю готової продукції.

Застосовують такі способи.

Гідравлічні випробування виконують для різних посудин. Виріб, сміність заповнюють рідиною під тиском у 1,25-1,5 рази більшим від робочого. Струминка води, запітніння або падіння рівня води вказують на дефектну частину виробу.

Стиснутим повітрям випробовують посудини і трубопроводи. Контролюють при цьому якість зварювання за падінням тиску, а також за іншими ознаками: звуком повітря, що виходить через нещільності, за запахом речовин, які додаються до повітря в трубопровід і т.п.

Проба крейдою і гасом (з одного боку шов змащують розчином крейди, зворотній змащують гасом, якщо є тріщини, пори, то місця з боку крейди пожовкнуть).

- *Магнітна дефектоскопія* проводиться за допомогою магнітного поля. Вади можна виявити на глибині до 25 мм. Метод дає можливість виявити шлакові вкраплення, раковини і т.п.

- *Просвічування рентгенівськими (до 100 мм) і гамма-променями (до 300 мм)* дає можливість виявляти у зварному шві наявність газових пухирів, оксидних плівок, тріщин, непроварів тощо.

- *Ультразвуковий контроль* побудовано на здатності

ультразвукових коливань прямолінійно поширюватись у метали і відбиватися від межі розділу середовищ, які мають різні акустичні властивості. Метод дає змогу виявляти у зварному шві наявність газових пухирів, оксидних плівок, тріщин, непроварів тощо.

Контрольні запитання для самостійної підготовки

1. Які дефекти можуть виникати під час зварювання?
2. Опишіть способи руйнівного контролю зварних з'єднань.
3. Опишіть способи неруйнівного контролю зварних з'єднань.

2.16. Техніка безпеки під час зварювання

Порушення правил техніки безпеки під час зварювальних робіт може спричинити травмування і навіть загибель людей. Загрозливими факторами, які призводять до травматизму, є ураження електричним струмом, вплив температури і променевої енергії, бризків розплавленого металу й шлаку, виділення у повітря шкідливих речовин (аерозолів, парів, газів), механічна дія деталей, вибухи та пожежі.

Електричний струм уражує нервову систему, органи дихання, серце, мозок, виникають опіки шкіри, тканин м'язів і кровоносних судин, можливе знепритомнення. Вважають, що ураження електричним струмом є небезпечним, якщо напруга перевищує 24 В, а струм – 0,1 А. Проте для визначення граничних факторів безпеки орієнтуються не на безпечну силу струму, а на безпечну напругу, яка для сухих приміщень становить 36 В, а для вологих – 12 В. На ці показники негативно впливає електроопір людського організму і його шкірної поверхні, який різко знижується, якщо людина втомилася, перебуває в нервовому або нетверезому стані, а також за вологої поверхні тіла та ураженнях шкіри.

Для захисту людини від ураження електричним струмом необхідно, щоб усі зовнішні провідники джерела живлення, проводка, пристрої і держакі перемикачів, електродотримач мали надійну ізоляцію, зварні агрегати й трансформатори були заземлені, а робітник працював у сухому спецодязі і рукавицях. У разі ураження електричним струмом треба негайно вимкнути струм первинного ланцюга, не торкаючись постраждалого, забезпечити доступ свіжого повітря, викликати лікаря, зробити штучне дихання.

Шкідлива дія випромінювання (ультразвукові, інфрачервоні та світлові промені) електричної зварювальної дуги поширюється в радіусі 10 м, а далі суттєво знижується. Вплив цих променів на незахищені очі впродовж короткого часу викликає сильний біль,

слізливість та світлобоязнь. Більш тривалий вплив може призвести до важких захворювань і навіть до втрати зору. Опромінювання дугою відкритої шкірної поверхні спричинює опіки, такі самі, як і сонячні. Для захисту очей та обличчя використовують захисний щиток, маску або шолом із спеціальними світлофільтрами, а для захисту шкіри – брезентовий костюм і брезентові рукавиці. Вплив променевої енергії газового полум'я значно слабший, однак виконувати газове зварювання без захисних окулярів не дозволяється.

Бризки розплавленого металу і шлаків також спричиняють опіки, тому зварник має працювати в головному уборі, рукавицях, у брезентовому спецодязі.

Шкідливі речовини виділяються під час плавлення металу і складових покриття електродів, флюсів, а також реакції захисних газів з хімічними елементами за високих температур. Це оксиди вуглецю, мангану, цинку, свинцю, фтористі сполуки тощо. Найбільш шкідливими є оксиди мангану, кремнію, азоту та газоподібні фтористі сполуки, а також цинк, свинець і кадмій. Під час дугового зварювання електродами з покриттям виділяється значна кількість аерозолів, які складаються переважно з оксидів заліза, мангану, кремнію та фтористих сполук. Зварювання під флюсом, який містить плавиковий шпат, супроводжується виділенням фтористих сполук. У процесі зварювання алюмінієвих сплавів у середовищі аргону спостерігається значне виділення озону. Під час зварювання в середовищі вуглекислого газу виділяються CO, CO₂, оксиди заліза та інші гази. Для видалення газів та аерозолів у закритих приміщеннях, згідно з чинними стандартними нормами, треба влаштувати загальну припливно-витяжну вентиляцію, за допомогою якої завдяки обміну повітря можна досягти гранично допустимих концентрацій шкідливих речовин. У зимовий період припливна вентиляція повинна забезпечувати подавання в приміщення підігрітого повітря.

Вибух може статися через неправильне поводження з ацетиленовими генераторами, карбідом кальцію, кисневими та іншими балонами для стиснених газів, а також під час зварювання ємностей, які перебувають під тиском, і тари з-під горючих речовин.

Чистий ацетилен здатен вибухати, якщо тиск перевищуватиме 1,5 ат. Суміш ацетилену з повітрям вибухає за атмосферного тиску, якщо вміст ацетилену становить від 2,2 до 81 %, а суміш із киснем – за його вмісту від 2,8 до 93% об'єму. Вибух сумішей ацетилену з повітрям або киснем стається від іскри, полум'я, нагрівання тощо. Вибух супроводжується виділенням тепла, підвищенням тиску, внаслідок чого можливі

руйнування і нещасні випадки. Тому під час роботи з карбідом кальцію й ацетиленом треба суворо дотримуватись правил техніки безпеки.

Кисень для зварювальних робіт постачають у кисневих балонах блакитного кольору в газоподібному стані під тиском 150 ат. Через нехтування правилами техніки безпеки кисневі балони здатні вибухати з великою руйнівною силою. Балони треба зберігати в окремому приміщенні тільки у вертикальному положенні в комірках, утворених спеціальними стійками; порожні балони слід зберігати окремо від наповнених. Балони не повинні зазнавати ударів, поштовхів, забруднення мастилом або жиром, їх слід оберігати від прямих сонячних променів. Особливу увагу треба приділяти тому, щоб на кисневі балони й апаратуру не попадали навіть незначні сліди мастила або жирів. Від контакту стиснутого кисню з жиром останній може загорятися за звичайних умов без стороннього підпалювання, що є основною причиною вибухів.

Пожежі найчастіше виникають через займання горючих матеріалів поблизу місць виконання зварних робіт, а також через дефекти електричної проводки. Для запобігання пожежам треба звільнити місця роботи від самозаймистих матеріалів і не допускати попадання іскри від зварної дуги та бризок від газового пальника на газогенератори, барабани з карбідом кальцію, шланги, зварні дроти і кисневі балони. Поблизу зварних робіт треба завжди мати вогнегасники.

До зварювальних робіт допускаються робітники, що досягли 18-річного віку, пройшли медичне обстеження та навчання за встановленою програмою і отримали свідоцтво про дозвіл на виконання зварювальних робіт. Кожен зварник допускається до роботи тільки після інструктажу з охорони праці й техніки безпеки на робочому місці. Повторний інструктаж має проводитися раз на три місяця. Знання робітниками правил техніки безпеки перевіряються щороку.

Правила захисту працівника та допоміжного персоналу від факторів ураження викладено в інструкціях із техніки безпеки під час електрозварювання та газового зварювання (різання) металів.

Контрольні запитання для самостійної підготовки

1. Охарактеризуйте небезпечні для здоров'я людини фактори, які можуть виникати під час зварювання.
2. Охарактеризуйте застереження зварників від факторів ураження.
3. За яких умов можна допускати зварників до роботи?

Список літератури

1. Попович В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство: навч. посібник. Кн., I. – Львів: Папуга, 2003. – 264 с.
2. Попович В., Голубець В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство: навч. посібник. Кн. II/ В. Попович, В. Голубець – Суми: Університетська книга, 2002. – 160с.
3. Добровольський О. Г. Матеріалознавство та матеріали у машинобудуванні/ Навчальний посібник. Київ, КНУБА, 2014 – 168 с.
4. Косенко В.А., Кущевська Н.Ф., Добровольський О.Г., Малишев В.В. Матеріалознавство та матеріали в автомобільному транспорті. Навчальний посібник. К.: Університет «Україна», 2015. –313 с.
5. Матеріалознавство: підручник для ВТУзів /В.І. Большаков, О.Ю. Береза, О.Ю. Міронова, В.І. Марченко. – Торонто: Базіліан прес, 1998. – 216 с.
6. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах / В.А. Ленивкин, Н.Г. Дюргеров, Х.Н. Сагиров - М.: 2001. Машиностроение. – 264 с.
7. Справочник по сварочному оборудованию/ Л.Ц Прох и др. – К.: Техника, 2003, – 208 с.
8. Николаев Г.А. Сварные конструкции. Расчет и проектирование: учебник для вузов / Г.А. Николаев., В.А. Винокуров. – М.: Высшая школа. 2000. – 446 с.
9. Гладкий П.В. Плазменная наплавка./ П. В. Гладкий. – К.: Экотехнология, 2007. – 292 с.
10. Потальевский А.Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом. Часть 1. Сварка в активных газах: навч. посіб./ А.Г. Потальевский 2-е изд. – К.: Экотехнология, 2007. – 192 с.
11. Жизняков С.Н. Ручная дуговая сварка. Материалы. Оборудование. Технология./ С. Н. Жизняков, З. А. Сидмен. – К.: Экотехнология, 2006. – 360с.
12. Лащенко Г.И. Энергосберегающие технологии послесварочной обработки металлоконструкций./ Г. И. Лащенко, Ю. В. Демченко. – К.: Экотехнология, 2008. – 168 с.
13. Корольков П.М. Термическая обработка сварных соединений./ П. М. Корольков. – 3-е изд. – К.: Экотехнология, 2006. – 176 с.

ДОДАТКИ

Додаток 1

Характеристики деяких трансформаторів

Тип	Напруга, В		Струм, А		Потужність, кВ·А	Габарити, мм	Маса, кг
	Номинальний	Холостого ходу	Номинальний	Межі регулювання			
СТЭ-24	30	65	350	70-500	24	646X314X660	140
СТН-500	30	60	500	150-700	38,5	796X410X840	270
ТС-300	30	63	300	30-395	20	765X524X1010	1080
ТС-350	30	60-70	350	60-450	24	610X310X650	185
ТС-500	30	60	500	40-650	32	845X600X110	250
ТД-300	30	61-79	300	60-380	19,4	640X490X715	137
ТД-500	30	60-76	500	90-650	32	720X580X350	210
ТДМ-180	30	-	180	-	13	360X360X940	46
ТДМ-250	30	-	250	-	18	360X360X940	48
ТДМ-505	30	-	500	-	41	815X700X935	166
КИ009-315	32	63	315	90-315	20	550X544X455	120
КИ 002-500	40	63	500	100-500	38	670X665X680	200
СТШ-300	30	63	300	110-405	20,5	545X720X750	158
СТШ-500	30	60	500	145-650	33	670X666X753	220
ТСП-1	25	65-70	160	105-180	12	254X424X435	35

Додаток 2

Характеристики деяких генераторів і зварювальних агрегатів

Тип	Струм, А		Напруга, В		Потужність, кВ·А
	Номинальний	Межі регулювання	Номинальна	Холостого ходу	
ГСО-120	120	30-120	25	48-65	3
ГСО-300А	300	75-300	30	65	9
ГС-1000П	1000	300-1200	45	90	45
ПГС-300	300	75-340	30	65	9
ГД-101	125	15-135	25	80	3,1
ГД-500	500	120-600	40	62-80	20
СГ-300М	300	80-340	35	72	12
СГ-300М-1	340	80-380	30	70	14
АДД-200 I M	220	40-220	28	80	6,5
АДД-400 I M	400	30-400	36	73	10

Приклади характеристик деяких випрямлячів

Тип	Напруга, В		Струм, А		Потужність, кВ·А	Маса, кг
	Номинальна	Холостого ходу	Номинальний	Межі регулювання		
Для зварювання вкритими електродами (режим ММА)						
ВД-101	25	65-68	125	20-125	9	170
ВД-201	21-28	64-71	200	30-200	15	120
ВД-301	32	65-68	300	45-300	21	230
ВД-306 Д	36	-	315	-	25	115
ВД-506 Д	36	-	500	-	36	165
ВД-502-1	40	65-80	500	50-500	40	348
ВКС-120	25	55-65	120	15-130	9	142
ВКС-500	40	65-74	500	60-550	36	410
ГАРТ-160	21-26	85	125	20-160	7,2	45
Для механізованого й автоматичного дугового зварювання, призначені для зварювання в середовищі захисних газів (режим МИГ/МАГ) і зварювання та наплавлення під шаром флюсу						
ВС-300Б	45	-	320	40-385	18	115
ВДГ-401	67		400	80-500	30	175
ВДУ1000	55		1000	150-1000	50	360
ВДУ-1250	55		1250	250-1250	73	520

Приклади характеристик деяких інверторів

Тип	Струм, А		Напруга, В		Потужність, кВА	Діаметр електрода, мм	Габаритні розміри, мм	Маса, кг
	Номинальний	Межі регулювання	Номинальна	Холодного ходу				
ВДЧ-201/3	200	5-200	28	80	8,5	2-5	400x170x280	9
ВДЧ-270/3	270	5-270	30	100	11	2-6	500x220x300	10
ВДЧ-270/3	350	20-350	32,4	10-32,4	14	2-6	548x240x365	22
РІСО 162, ФРН	150	10-150	-	105	6	2-4	365x116x224	4,5
РІСО 300, ФРН	300	10-300	-	99	13,7	-	490x186x350	16,5
Caddi 250, Швеція	250	4-250	-	50-80	30	До 6	472x142x256	11
Дніпро-М САБ-255	250	20-250	-	60	5	1,6-5		2,8
Кентавр СВ-245ТРЕ	250	20-250	-	60	5,32, 5	1,6-4	330x195x250	
ТехАС ТА-00-101	250	20-250	-	50	6,4	1,6-4	250x170x160	3,8
Зенит ЗСИ-МН	200	20-200	-	60	-	1,6-4	-	2,5
Белмаш ММА-270270	270	20-270	-	45	4,5	1,6-5	-	6
ПАТОН ВДИ-250	250	24-250	-	-	-	-	265x140x270	7,5
ВДУ-207 "Патриот"	210	10-210		75	5,8 і 7,0	0,6-1,0	280x145x340	-

Автомати (трактори) для дугового зварювання під флюсом

Тип	Зварювальний струм, номінальний, А	Електродний дріт		Габаритні розміри, мм	Маса, кг	Швидкість зварювання, м/год
		Діаметр, мм	Швидкість подавання, м/год			
АДФ-500	500	1,6-2,5	150-720	590x265x425	28	15
АДФ-501	500	1,6-2,0	30-720	940x365x670	55	12-120
АДС-17М	1000	1,6-5,0	52-400	640x300x570	42	16-126
АДС-17Р	1000	1,6-5,0	56-435	740x300x520	42	16-126
АДС-1000-	1000	3,0-6,0	30-120	1010x344x662	65	15-70
АДФ-1001	1000	2,0-5,0	13-160	1050x365x655	60	12-120
АДФ-1004	1000	2,0-5,0	18-360	1050x365x655	60	12-120

Напівавтомати пересувні для дугового зварювання у вуглекислому газі

Тип	Зварювальний струм, А		Електродний дріт		Габаритні розміри механізму подавання дроту, мм	Маса, кг
	Номінальний	Межі регулювання	Діаметр, мм	Швидкість подавання, м/год		
А-825	250	—	1,0-1,2	90-350	364x290x130	20
ПДГ-302-1	300	60-300	0,8-2,0	120-720	300x360x100	5
ПДГ-305	315	50-315	0,8-1,4	120-1200	362x284x153	12,5
А-929	350	—	1,0-2,0	120-620	305x175x245	11
ПГШ-4М	500	—	1,2-2,0	90	—	—
А537У	500	100-500	1,6-2,0	80-590	330[280]325	25
А-1197	500	150-500	1,6-2,0	120-720	516x390x321	40
А-1503П	630	160-630	1,6-3,0	90-920	960x660x560	26

Ацетиленові генератори для газового зварювання

Марка	Продукти вність, $1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$	Система роботи *	Тиск робочий, кПа	Об'єм, м^3	Маса, кг
АСК 05	0,14	ВВ	10-30	0,024	9,5
ГВЗ-08	0,22	ВВ	2,0	0,055	15
АНВ-1, 25-73	0,35	ВК, ВВ	3,5	0,146	42
АСВ-1, 25-4	0,35	ВВ	10-70	0,04	19
АСВ-1,25	0,35	ВВ	10-70	0,04	7
ГМВ-1,25	0,35	ВК	3,0	0,146	42
МГ-5И	0,55	ВК	3,5	—	65
ГВП-3	0,83	ВК, ВВ	30	—	110
АСК-1	1,4	ВК, ВВ	15-40	—	170

*ВК – вода на карбід; ВВ – витискання води

Додаток 8

Зв'язок між одиницями сили

Одиниця	Н	дина	кгс	сн (стен)
1 Н	1	10^5	0,102	10^{-3}
1 дина	10^{-5}	1	$1,02 \cdot 10^{-6}$	10^{-8}
1 кгс	9,81	$9,81 \cdot 10^5$	1	$9,81 \cdot 10^{-3}$
1 сн (стен)	10^3	10^8	102	1

Приставки та множники для утворення десяткових кратних і дільних одиниць

Приставка	Множник	Позначення		Приклади		
		українське	міжнародне			
екса	10^{18}	Е	E	ексабекерель	ЕБк	ЕВq
пета	10^{15}	П	P	петагерц	ПГц	PHz
тера	10^{12}	Т	T	тераджоуль	ТДж	TJ
гіга	10^9	Г	G	гіганьютон	гн	GN
мега	10^6	м	M	мегаом	МОм	МЦ
кіло	10^3	к	k	кілогauss	кГс	kGs
гекто	10^2	г	h	гектоват	гВт	hW
дека	10	да	da	декалітр	дал	dal
деци	10^{-1}	д	d	дециметр	дм	dm
санти	10^{-2}	с	c	сантипуаз	сП	cP
мілі	10^{-3}	м	m	міліампер	мА	mA
мікро	10^{-6}	мк	μ	мікровольт	мкВ	μV
нано	10^{-9}	н	n	наносекунда	нс	ns
піко	10^{-12}	П	p	пікофарада	пФ	pF
фемто	10^{-15}	Ф	f	фемтограм	фг	fg
атто	10^{-18}	а	a	аттокулон	аКл	aC

Навчальне видання

Косенко Валерій Анатолійович
Добровольський Олександр Георгійович
Красовський Анатолій Петрович,
Баліцький Леонід Станіславович,
Малишев Віктор Володимирович

**Зварювання в автомобілебудуванні:
металознавство та технології**

Навчальний посібник

В авторській редакції

Дизайн обкладинки Бабинець Н.А.

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 13.9
Наклад 100 пр. Зам. №. 07.02-18

Видавець і виготовлювач Університет «Україна»
03115, м. Київ, вул. Львівська, 23, тел./факс (044) 424-40-69, 424-56-26
E-mail: ukraina.vdk@email.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 405 від 06.04.2001



Косенко Валерій Анатолійович,
кандидат технічних наук, професор кафедри автомобільного транспорту Університету «Україна».

Автор понад 110 наукових праць.



Добровольський Олександр Георгійович,
кандидат технічних наук, доцент кафедри основ професійного навчання Національного Університету будівництва та архітектури.

Автор понад 100 наукових праць.



Красовський Анатолій Петрович,
Директор Київського професійного ліцею транспорту, викладач вищої категорії.



Баліцький Леонід Станіславович,
заст. директора по навчально-виробничій роботі Навчально-наукового центру академії педагогічних наук України, викладач вищої категорії, старший викладач.



Малишев Віктор Володимирович,
доктор технічних наук, професор, Заслужений діяч науки і техніки України, директор Інженерно-технологічного інституту Університету «Україна».

Автор понад 800 наукових праць.

